

Universität Leipzig
Fakultät für Physik und Geowissenschaften
Institut für Geophysik und Geologie
Talstraße 35
04103 Leipzig

Diplomarbeit

Nutzung der Codawelleninterferometrie zur Strukturüberwachung im Ingenieurbau

vorgelegt von **Simon Christian Stähler**

14. September 2009

Betreut durch Prof. Dr. Michael Korn und
Dr. Christoph Sens-Schönfelder

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Fragestellung	11
2 Theoretische Grundlagen	13
2.1 Wellenausbreitung in elastischen Medien	13
2.2 Spannungsinduzierte Geschwindigkeitseffekte in Medien	14
2.2.1 Akustoelastischer Effekt	15
2.2.2 Rissbildung	18
2.3 Codawelleninterferometrie	21
2.3.1 Moving-Window-Cross-Spectral-Analysis	23
2.3.2 Streckkorrelation	24
3 Vorbereitende Messungen	25
3.1 Messungen im Keller des Institut	25
3.1.1 Verwendete Geräte	25
3.1.1.1 Vibrationsquelle Inertialerreger TV 51125-IN	25
3.1.1.2 Auslesesystem SUMMIT compact	25
3.1.2 Testmessungen	27
3.1.3 Hintergrundrauschen	27
3.1.4 Zusammenfassung	29
3.2 Messungen auf der Elsterbrücke	30
3.2.1 Ziele der Messungen	30
3.2.1.1 Beschreibung der Brücke	30
3.2.1.2 Messablauf	30
3.2.2 Coherent Backscattering Enhancement	32
3.2.3 Hammerschlagseismik	36
3.2.3.1 Hochfrequenter Anteil	36
3.2.3.2 Niederfrequenter Anteil	36
3.2.4 Vibrationsseismik	37
3.2.5 Weitere Erkenntnisse	38
3.2.6 Zusammenfassung	38
4 Messungen an Steinachtalbrücke	39
4.1 Beschreibung der Brücke	39
4.1.1 Beschreibung des Vorhabens	39
4.2 Messungen	41
4.2.1 Hammerschlagseismik	41
4.2.1.1 Methode	41

Inhaltsverzeichnis

4.2.1.2	Codawelleninterferometrie	43
4.2.2	Vibrationsseismik	45
4.2.2.1	Methode	45
4.2.2.2	Durchführung	47
4.2.2.3	Auswertung	47
4.2.2.4	Codawelleninterferometrie	48
4.2.3	Ultraschall	49
4.2.3.1	Motivation	49
4.2.3.2	Durchführung	49
4.2.3.3	Ergebnisse	50
4.3	Theoretische Abschätzung der Laufzeitänderungen	51
4.3.1	Spannungsmodell	51
4.3.2	FD-Simulation der Wellenausbreitung	52
4.3.3	Erzeugte Seismogramme	53
4.4	Auswertung und Ergebnisse	55
5	Labormessungen	57
5.1	Überprüfung der Stabilität unserer Ultraschallapparatur	57
5.1.1	Experiment Temperaturabhängigkeit	57
5.2	Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton	58
5.2.1	Absicht	58
5.2.2	Versuchsablauf	59
5.2.2.1	Verwendete Geräte	59
5.2.2.2	Pressablauf	59
5.2.2.3	Auswertung	60
5.2.3	Ergebnisse	64
5.2.3.1	Seismogramme	64
5.2.3.2	Vergleich mit Diffusionsgleichung	65
5.2.3.3	Geschwindigkeitsänderungen	66
5.2.3.4	Vergleich P-Wellen und S-Wellen	70
5.2.3.5	Messungen über große Spannungsbereiche	71
5.3	Zusammenfassung	73
6	Zusammenfassung und Ausblick	75
A	Fotos der Messungen	77
B	Brückenpläne	81
	Literaturverzeichnis	85

Abbildungsverzeichnis

2.1	Skizze der Geschwindigkeits-Spannungs-Beziehung in Beton. Die Spannung ist in Anteilen der Bruchspannung aufgetragen	19
2.2	Skizze des Hystereseeffektes einer Last deutlich unter der Bruchlast. Die Spannung ist in Anteilen der Bruchspannung aufgetragen	20
3.1	Schnittzeichnung des Inertialerregers	26
3.2	Seismogrammuspuren einer Hammerschlagmessung im Keller. Bandpassgefiltert auf 100 bis 400 Hz.	28
3.3	Aus Vibrationsseismik rekonstruierte Seismogramme im Keller. Quellsignal: Sweep von 100 bis 400 Hz.	28
3.4	Aus Vibrationsseismik erzeugte Seismogramme im Keller. Quellsignal: Weißes Rauschen von 100 bis 400 Hz.	28
3.5	Rauschgenerierte Seismogramme im Keller Talstraße	29
3.6	Längsschnitt durch die Elsterbrücke	30
3.7	Querschnitt des Hohlkastens der Elsterbrücke mit eingezeichneter Vibrationsquelle.	31
3.8	Schematische Darstellung des Prinzips der kohärenten Rückstreuung	32
3.9	Gemessene Energie $S(\Delta r, t)$ an der Quelle und zwei Geophonen mit $\Delta r = 5\text{m}$ im zeitlichen Verlauf	34
3.10	Gemessene Energie $S(\Delta r, t)$ an Geophonen mit Abstand Δr zum Schlagpunkt im Zeitfenster 200 bis 700 Millisekunden	34
3.11	FK-Darstellung einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen (logarithmische Darstellung des Amplitudenspektrums).	35
3.12	Seismogramme einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Hochpass-filterung bei 1 kHz. rechts: AGC mit Zeitfenster 5 ms	36
3.13	Seismogramme einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Bandpass-filterung zwischen 20 und 400 Hz. rechts: AGC mit Zeitfenster 20 ms	36
3.14	Rohseismogramme einer Vibrationsseismik-Messung an der Elsterbrücke. Sweep von 20 bis 400 Hz.	37
3.15	Seismogramme aus Vibrationsseismik mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Sweep 20 bis 400 Hz, links, Bandpass 20 bis 400 Hz, rechts: Hochpass 400 Hz.	37

Abbildungsverzeichnis

4.1	Längsschnitt durch die Steinachtalbrücke	39
4.2	Skizze des Verschubes der Steinachtalbrücke mit der Messstrecke (Situation bei der ersten Messfahrt). Die Lage der Pfeiler ist durch die kleinen Dreiecke gekennzeichnet.	41
4.3	Darstellung aller Seismogramme einer Hammerschlagmessung an der Steinachtalbrücke	42
4.4	Darstellung der ausgewählten Seismogramme einer Hammer- schlagmessung. Fünffache Stapelung, Hochpassfilter bei 1 kHz. Für die rechte Darstellung wurde die Coda verstärkt (AGC mit Zeitfenster 2,5 ms).	43
4.5	Ausschnitte aus Seismogrammen zweier Hammerschlagmessungen. Fünffache Stapelung, Hochpassfilter 1 kHz.	44
4.6	Laufzeitveränderungen an allen Geophonen für alle Messungen. Zeitfenster 200 bis 700 ms, ungünstiges Zeitfenster wegen großer Streuung der Werte	45
4.7	Laufzeitveränderungen an allen Geophonen für alle Messungen. Zeitfenster 100 bis 200 ms	46
4.8	Integrierte Spannungsänderungen zwischen Quelle und Geophonen	46
4.9	Seismogramme für Geophone 6-18, erhalten aus vibrationsseismischer Messung mit Sweep (1000 bis 2000 Hz).	48
4.10	Laufzeitänderungen während der Messungen, bestimmt aus Vibra- tionsseismik mit Sweep von 1000 bis 2000 Hz.	48
4.11	Ultraschallquelle und -empfänger auf der Steinachtalbrücke.	49
4.12	Seismogramm einer Ultraschallmessung an der Steinachtalbrücke. .	50
4.13	Aus Ultraschallmessungen bestimmte Geschwindigkeitsänderungen.	50
4.14	Y-Komponente der Spannung im Hohlkasten. Dargestellt ist ein Längsschnitt durch den Steg des Hohlkastens.	52
4.15	Zwei synthetische Seismogramme aus der FD-Simulation. Berech- net sind Zeitpunkte 1 und 4 aus der Abb. 4.14.	54
4.16	Vergleich der Laufzeitänderungen aus Hammerschlagmessungen und FD-Simulation für ein ausgewähltes Geophon	54
5.1	Messreihen des sich erwärmenden Messkopfes	58
5.2	Versuchsanordnung spannungsinduzierte Geschwindigkeitsvaria- tionen	60
5.3	Messprogramm spannungsinduzierte Geschwindigkeitsvariationen (Würfel 2)	60
5.4	Skizze der vier möglichen Typen gestreuter Wellen: 1. Zwischen der Quell- und der Empfängerseite reverbrierende Welle 2. Um den Pro- bekörper laufende Oberflächenwelle 3. Komplex an den Seiten des Körpers reflektierte Welle 4. An Bestandteilen des Betons gestreute Welle	61
5.5	Vergleich des Spektrums von Rauschen und Signal	64

Abbildungsverzeichnis

5.6 Vergleich des Spektrums von Rauschen und Signal nach Anwendung eines 50 kHz Hochpassfilters	64
5.7 Energiedichte des Seismogramms (Pressdruck: 50 kN), angepasst durch Gleichung 5.1.	66
5.8 Vergleich der Seismogramme zweier Messungen mit leicht verschiedenen Spannungen.	67
5.9 Streckkorrelation CC_k , berechnet zwischen Referenzmessung 2,04 MPa und Messungen mit 2,27 MPa und 2,4 MPa. Zeitfenster 500 bis 1000 μ s.	67
5.10 Streckkorrelation CC_k , berechnet zwischen Referenzmessung 2,04 MPa und Messungen mit 2,27 MPa und 2,4 MPa (Ausschnitt). Zeitfenster 500 bis 1000 μ s.	68
5.11 Geschwindigkeitsvariationen im niedrigen Spannungsbereich	68
5.12 Geschwindigkeitsvariationen der ersten Messung. Auffällig ist der „Knick“ oberhalb 5 MPa, der in beiden Zeitfenstern zu sehen ist und der auf eine Vorbelastung des Würfels hindeuten könnte.	69
5.13 Vergleich frühes Zeitfenster (überwiegend P-Wellen) mit spätem Zeitfenster (überwiegend S-Wellen), Würfel 1	70
5.14 Vergleich frühes Zeitfenster (überwiegend P-Wellen) mit spätem Zeitfenster (überwiegend S-Wellen), Würfel 2	70
5.15 Gemessene Hysteresekurve. Zeitfenster: 500 μ s bis 1000 μ s, Würfel 2. .	72
5.16 Gemessene Hysteresekurve. Zeitfenster: 50 μ s bis 150 μ s, Würfel 2. .	72
 A.1 links: Betonsockel für die Vibrationsquelle (ohne diese); rechts: Keller in der Talstraße 35 mit Testgeophonen, Summit-Auswerteeinheit und Vibrationsquelle	77
A.2 Sockel für die Vibrationsquelle mit bzw. ohne die Quelle. Aufgenommen auf der Steinachtalbrücke	78
A.3 Messaufbau im Hohlkasten der Elsterbrücke	78
A.4 Steinachtalbrücke in Endlage von der Fahrbahnplatte aus fotografiert. .	79
A.5 Messaufbau auf der Steinachtalbrücke. Im Vordergrund: Geophon-Messstrecke. Im Hintergrund links: Vibrationsquelle und Ultraschallgeräte. In den Zelten befinden sich die Aufzeichnungscomputer der Summit.	79
A.6 Messeinrichtungen auf der Steinachtalbrücke nach Abschluss des dritten Messeinsatzes	80
A.7 Baustelle am Widerlager der Steinachtalbrücke. Direkt an der Brücke ist das Betonieren des nächsten Taktes zu sehen, im Vordergrund wird die Bewehrung des übernächsten Taktes erstellt. . .	80
 B.1 Regelquerschnitt der Elsterbrücke	81
B.2 Bauwerksplan der Steinachtalbrücke	82
B.3 Taktübersicht der Steinachtalbrücke	83
B.4 Regelquerschnitt der Steinachtalbrücke	84

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

2.1	Beispielergebnisse der Laméparameter für Beton, (C60-Beton, vergleichbar mit dem von uns verwendeten, nach <i>Payan et al.</i> (2009). Werte für λ, μ von mir abgeleitet.)	18
2.2	Abschätzung der Geschwindigkeitsänderungen unter Verwendung der Werte aus Tabelle 2.1	18
3.1	Spezifikation des Inertialerregers	26
3.2	Kenndaten Elsterbrücke	31
3.3	Geophonauslage	32
4.1	Kenndaten Steinachtalbrücke	40
4.2	Übersicht über die drei durchgeföhrten Messfahrten	40
4.3	Übersicht über die einzelnen Hammerschlagmessungen	41
4.4	Übersicht über den Status der Geophone auf der Steinachtalbrücke	42
4.5	Algorithmus zur Berechnung der Streckkorrelation bei den Messungen auf der Steinachtalbrücke	44
4.6	Messprogramm Vibrationsseismik auf der Steinachtalbrücke	47
5.1	Schema der Datenverarbeitung der Ultraschallmessungen bei der BAM	63
5.2	Algorithmus zur Berechnung der Streckkorrelation bei Ultraschallmessungen	63

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung und Fragestellung

Codawelleninterferometrie ist ein neues Verfahren der Geophysik zur Detektion von Veränderungen in elastischen Medien. Dabei wird der späte Teil des seismischen Signals, die Coda, verwendet. Diese wird von Wellen erzeugt, die lange Laufzeiten innerhalb des Mediums hatten. Durch die langen Laufzeiten wirken sich selbst kleine Veränderungen in der Wellengeschwindigkeit oder dem Absorptionsverhalten stark auf die Signalform der Coda aus.

Das Verfahren geht auf Coda-Studien von Keiti Aki in den Siebziger und Achtziger Jahren¹ zurück und wurde 1984 von G. Poupinet et al. zur Detektion von Geschwindigkeitsänderungen an einer Störungszone verwendet². Rolf Snieder leistete später erhebliche Anteile bei der Etablierung des Verfahrens und prägte den Namen *Coda Wave Interferometry*³. Seit den späten Neunziger Jahren wurde das Verfahren, ergänzt durch die *Passive Image Interferometry* vielfach angewandt, so zur Messung von Geschwindigkeitsänderungen in Vulkankegeln⁴, Überwachung seismischer Parameter in der Erdkruste⁵ oder zum Abschätzen der Temperaturentwicklung der Mondkruste⁶.

Versuche zur Anwendung der Codawelleninterferometrie im kleinen Maßstab wurden 2005 von Larose durchgeführt, wobei in Betonproben Geschwindigkeitsänderungen aufgrund von Spannungsänderungen gemessen wurden⁷. Interessant erscheint aber insbesondere die Anwendung der Codawelleninterferometrie zur Messung von Geschwindigkeits- und damit Spannungsänderungen in ganzen Bauwerken. Die Tatsache, dass die Schallwellen in der Coda ein großes Gebiet der untersuchten Struktur durchlaufen haben und gleichzeitig hochsensitiv auf Veränderungen im Medium sind, böte Möglichkeiten bei der Verwendung als Strukturüberwachungsverfahren. Mit wenigen wiederholten Einzelmessungen könnte die Existenz von Veränderungen in der Struktur festgestellt werden und eventuell eine erste Aussage über die Art der Veränderungen getroffen werden.

Hierzu wurde bisher nur eine Messung durchgeführt, die gemessene Geschwindigkeitsänderungen auf den Tagesgang der Temperatur zurückführte (*Larose et al. (2006)*).

Eine systematische Messung, die die gemessenen Geschwindigkeitsänderungen mit einem Vorhersagemodell vergleicht, fehlte jedoch bisher. Dies war daher Aufgabe

¹Aki (1985)

²Poupinet et al. (1984)

³siehe Snieder (2006)

⁴Sens-Schönfelder & Wegler (2006)

⁵Campillo et al. (2008)

⁶Sens-Schönfelder & Larose (2008)

⁷Larose & Hall (2009)

1 Einleitung und Fragestellung

der vorliegenden Diplomarbeit. Um das Gebiet überschaubar zu halten, habe ich mich dabei auf spannungsinduzierte Veränderungen, speziell der Geschwindigkeit beschränkt. Weitere interessante Effekte, z.B. durch Korrosion oder Beschädigungen sind zu schlecht quantifizierbar und überstiegen unsere Messmöglichkeiten. Für die Messung verwendet wurden kleinskalige seismische Verfahren, speziell Hammerschlag- und Vibrationsseismik sowie Ultraschall. Für alle Verfahren wurden außerdem Testmessungen durchgeführt. Mit der Ultraschall-Laborversuchen sollten darüber hinaus noch einzelne Effekte beim Pressen von Beton quantifiziert werden. Diese Messungen wurden in Kooperation mit der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung durchgeführt.

Die Arbeit besteht aus vier Teilen: Zunächst wird eine Einführung in relevante theoretische Grundlagen gegeben, anschließend werden die verwendeten Komponenten und mit ihnen durchgeführte Testmessungen beschrieben. Der dritte Teil beschreibt die eigentlichen Messungen auf einer im Bau befindlichen Talbrücke, während der vierte Teil Labormessungen an dem Brückebeton vorstellt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Wellenausbreitung in elastischen Medien

Das in der Geophysik verwendete Modell der Wellenausbreitung basiert auf dem Hookeschen Gesetz:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (2.1)$$

Die Spannung σ_{ij} ist dabei definiert als die j -te Komponente der auf einer Normalfläche des Einheitsvektors x_i angreifenden Kraft. Die Deformation ϵ_{kl} ist wie folgt definiert:

$$\epsilon_{kl} = \epsilon_{lk} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) \quad (2.2)$$

Der 81-komponentige Tensor 4. Stufe c_{ijkl} hat für einen allgemeinen anisotopen Körper maximal 21 verschiedene Komponenten. Im Falle eines isotropen Mediums lässt er sich sogar durch zwei konstanten beschreiben, die beiden Laméparameter zweiter Ordnung λ, μ^1 :

$$c_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (2.3)$$

Die Spannungs-Deformationsrelation (2.1) wird damit (in Einsteinscher Summationskonvention²) zu:

$$\sigma_{ij} = \lambda\epsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} \quad (2.4)$$

Mit der Gleichgewichtsbedingung

$$F_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0 \quad (2.5)$$

(wobei \vec{F} die Volumenkraft ist, die nach Newtons zweitem Axiom abzüglich äußerer Spannungen f_i durch $F_i - f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$ ausgedrückt werden kann) ergibt sich die Wellengleichung

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial(\nabla \vec{u})}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 u_i + f_i \quad (2.6)$$

bzw.

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) - \mu \nabla \cdot (\nabla \times \vec{u}) + \vec{f}. \quad (2.7)$$

¹Die Erklärung folgt zunächst Müller (1994)

²Wenn in einem Produkt derselbe Index zweifach vorkommt, wird über diesen summiert. $g_i = a_{ij}f_j$ ist also äquivalent zu $\sum_{j=1}^3 g_i = a_{ij}f_j$. Diese Notation dient ausschließlich der Übersichtlichkeit. Wo sie im folgenden verwendet wird, habe ich es angegeben.

2 Theoretische Grundlagen

Das Verschiebungsfeld \vec{u} aus Gleichung (2.7) lässt sich in einen Kompressionsanteil und einen Scheranteil aufspalten, die man über

$$\vec{u} = \nabla\Phi + \nabla \times \vec{\Psi} \quad (2.8)$$

als Gradient eines skalaren Kompressionspotentials Φ mit $\nabla \times (\nabla\Phi) = 0$ und eines vektorielles Scherpotentials $\vec{\Psi}$ mit $\nabla \cdot \vec{\Psi} = 0$ definiert. Die Wellengleichung (2.7) lässt sich somit separieren nach Φ und Ψ :

$$\nabla^2\Phi - \frac{\rho}{\lambda + 2\mu} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\Phi = \frac{\phi}{\lambda + 2\mu} \quad (2.9)$$

$$-\nabla \times (\nabla \times \vec{\Psi}) - \frac{\rho}{\mu} \frac{\partial^2}{\partial t^2}\vec{\Psi} = -\frac{\psi}{\mu} \quad (2.10)$$

wobei die äußere Kraft \vec{f} analog zum Verschiebungspotential \vec{u} nach

$$\vec{f} = \nabla\phi + \nabla \times \vec{\psi} \quad (2.11)$$

aufgespalten wurde. Hieraus liest man nun ohne weiteres ab, dass falls ρ , μ und λ orts- und richtungsunabhängig sind³, im isotropen Medium nur zwei Wellentypen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auftreten, nämlich Kompressions- bzw. Longitudinalwellen und Scher- bzw. Transversalwellen. Die Geschwindigkeiten der beiden so definierten Wellentypen:

$$v_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.12)$$

$$v_{SV} \equiv v_{SH} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.13)$$

sind mithin unabhängig von der Ausbreitungsrichtung und der äußeren Spannung \vec{f} , auch die beiden möglichen Polarisationen der Transversalwelle sind äquivalent. Eine Geschwindigkeitsänderung kann also nur durch eine Veränderung der Dichte oder der elastischen Parameter erzielt werden. Die Dichte ist proportional zu $\sqrt[3]{\sigma_{jj}}$, die Elastizitätsparameter sind im linearen Bereich konstant, beides ist im Falle kleiner äußerer Spannungen vernachlässigbar. Um Geschwindigkeitsvariationen in Folge von Spannungsänderungen beschreiben zu können, ist also eine Erweiterung der als Spannungs-Deformations-Relation (2.1) vonnöten.

2.2 Spannungsinduzierte Geschwindigkeitseffekte in Medien

Die Effekte externer Spannung auf die Geschwindigkeit in einem Medium lassen sich grob in zwei Klassen einteilen:

³Dieser Fall ist natürlich unrealistisch, da ein homogener Vollraum nicht existieren kann. Solange man eventuelle Grenzflächen als weit entfernt und Inhomogenitäten als sehr klein annehmen kann, ist diese Näherung aber gültig.

1. Reversible Effekte Bei recht kleinen Spannungsänderungen treten reversible Geschwindigkeitsänderungen auf, die sich durch eine nichtlineare Erweiterung der Elastizitätstheorie beschreiben lassen (akustoelastischer Effekt).
2. Irreversible Effekte Bei großen Spannungen treten irreversible Schädigungen im Medium auf, die die Geschwindigkeit seismischer Wellen beeinflussen (Risse).

Im folgenden seien beide Effekte kurz skizziert:

2.2.1 Akustoelastischer Effekt

Das Hookesche Gesetz (Gleichung 2.1) gilt nur in erster Näherung und kann erweitert werden:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}\epsilon_{kl} + c_{ijklmn}\epsilon_{kl}\epsilon_{mn} \quad (2.14)$$

Der zweite Term auf der rechten Seite von (2.14) erweitert die Spannungs-Deformationsbeziehung um erste nichtlineare Effekte. Glücklicherweise reduziert sich der Tensor 6. Stufe c_{ijklmn} (mit 729 Komponenten!) nach *Hughes & Kelly* (1953) für den isotropen Fall auf eine relativ einfache Form:

$$\begin{aligned} c_{ijklmn} = & l \delta_{ij} \delta_{kl} \delta_{mn} \\ & + m [\delta_{ij} (\delta_{km} \delta_{ln} + \delta_{kn} \delta_{lm}) + \delta_{kl} (\delta_{im} \delta_{jn} + \delta_{in} \delta_{jm}) + \delta_{mn} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk})] \\ & + n [\delta_{ik} (\delta_{jm} \delta_{ln} + \delta_{jn} \delta_{lm}) + \delta_{jl} (\delta_{im} \delta_{kn} + \delta_{in} \delta_{km}) \\ & + \delta_{il} (\delta_{jm} \delta_{kn} + \delta_{jn} \delta_{km}) + \delta_{jk} (\delta_{im} \delta_{ln} + \delta_{in} \delta_{lm})] \end{aligned}$$

wodurch die Laméparameter dritter Ordnung, l, m, n (nicht zu verwechseln mit den Dimensionsindizes in obiger Gleichung) eingeführt werden.

Gleichung 2.14 lautet dann (wiederum in Einsteinscher Summenkonvention):

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} = & \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} + l \delta_{ij} \epsilon_{kk} \epsilon_{mm} \\ & + m [2\delta_{ij} \epsilon_{kl} \epsilon_{kl} + 2\epsilon_{ij} (\epsilon_{kk} + \epsilon_{mm})] \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} & + n [4\epsilon_{il} \epsilon_{jl} + 4\epsilon_{ik} \epsilon_{jk}] \\ = & \lambda \epsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij} + l \delta_{ij} \epsilon_{kk} \epsilon_{mm} \\ & + m [2\delta_{ij} \epsilon_{kl}^2 + 4\epsilon_{ij} \epsilon_{kk}] \\ & + n [8\epsilon_{ik} \epsilon_{jk}] \end{aligned} \quad (2.16)$$

Berechnet man für dieses Modell die Wellengeschwindigkeiten, ergeben sich nach *Toupin & Bernstein* (1961) zwei neue Effekte:

1. Die Wellengeschwindigkeiten sind abhängig von einer externen Spannung.
2. Die Isotropie des Systems ist durch die externe Spannung aufgehoben. Damit ergeben sich auch für ein isotropes elastisches Medium unterschiedliche Wellengeschwindigkeiten für die 9 möglichen Ausbreitungs- und Polarisationsrichtungen.

2 Theoretische Grundlagen

Eine finite, uniaxiale Deformation in Z-Richtung ($\epsilon_{33} = e, \epsilon_{11} = \epsilon_{22} = -\nu e$)⁴ bewirkt folgende Geschwindigkeitsänderungen für Wellen, die sich senkrecht zur Spannungsrichtung, also in der XY-Ebene ausbreiten:

$$\frac{d(\rho v_p^2)}{de} \Big|_{e=0} = -\nu(4\lambda + 8\mu + 2l + 8m + 8n) + (l + 2m) \quad (2.17)$$

$$\frac{d(\rho v_{SH}^2)}{de} \Big|_{e=0} = -\nu(4\mu + 2m + 4n) + m \quad (2.17)$$

$$\frac{d(\rho v_{SV}^2)}{de} \Big|_{e=0} = -\nu(2\mu + 2m + 2n) + (2\mu + m + 2n) \quad (2.18)$$

Zunächst soll das wenig nützliche Geschwindigkeitsquadrat in der Ableitung entfernt werden:

$$\frac{dv^2}{de} \Big|_{e=0} = 2v^0 \frac{dv}{de} \Big|_{e=0}$$

$$\Rightarrow \frac{dv}{de} \Big|_{e=0} = \frac{1}{2v^0} \frac{dv^2}{de} \Big|_{e=0} \quad (2.19)$$

Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen dem Elastizitätsmodul E und der Deformation e

$$E = \frac{\sigma_{ii}}{\epsilon_{ii}} = \frac{\sigma_{33}}{e} \quad (2.20)$$

lässt sich die Geschwindigkeitsänderung dann durch die Spannung statt durch die Deformation ausdrücken:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{dv}{de} \Big|_{e=0} \frac{de}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} \\ &= \frac{dv}{de} \Big|_{e=0} \frac{1}{E} \\ &= \frac{1}{2v^0 E} \frac{dv^2}{de} \Big|_{e=0} \end{aligned} \quad (2.21)$$

v steht hierin für eine beliebige Geschwindigkeit, da keine weiteren Annahmen über diese Größe verwendet wurden. $v^0 = v(e = 0)$ ist die Wellengeschwindigkeit im unbelasteten Medium.

⁴ ν ist die Poissonzahl, also das Verhältnis von Querdilatation zu Längskontraktion.

Und so erhalten wir folgenden Spannungs-Geschwindigkeits-Zusammenhang:

$$\begin{aligned} \frac{d(v_p)}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E\rho v_p^0} [-\nu(4\lambda + 8\mu + 2l + 8m + 8n) + (l + 2m)] \\ \frac{d(v_{SH})}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E\rho v_{SH}^0} [-\nu(4\mu + 2m + 4n) + m] \\ \frac{d(v_{SV})}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E\rho v_{SV}^0} [-\nu(2\mu + 2m + 2n) + (2\mu + m + 2n)] \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$(2.23)$$

Dieser soll nun noch nach der relativen Geschwindigkeitsänderung umgeformt werden, da diese im Rahmen der Codawelleninterferometrie einfacher zu bestimmen ist. Bei dieser Gelegenheit wird noch die Geschwindigkeit im Nenner auf der rechten Seite durch die elastischen Parameter ausgedrückt, was auch die Dichte ρ beseitigt.

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_p^0} \frac{d(v_p)}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E(\lambda + 2\mu)} [-\nu(4\lambda + 8\mu + 2l + 8m + 8n) + (l + 2m)] \\ \frac{1}{v_{SV}^0} \frac{d(v_{SV})}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E\mu} [-\nu(4\mu + 2m + 4n) + m] \\ \frac{1}{v_{SH}^0} \frac{d(v_{SH})}{d\sigma_{33}} \Big|_{\sigma_{33}=0} &= \frac{1}{2E\mu} [-\nu(2\mu + 2m + 2n) + (2\mu + m + 2n)] \end{aligned} \quad (2.24)$$

$$(2.25)$$

Die Terme hängen nicht von der Spannung ab⁵, die Spannungs-Geschwindigkeitsbeziehung ist also für kleine Spannungen linear.

Tabelle 2.1 zeigt aus einer Messung mit Codawelleninterferometrie erhaltene Werte der fünf Laméparameter für Beton. Daraus ist ersichtlich, dass die Werte der Laméparameter dritter Ordnung l, m, n um zwei Größenordnungen größer als die Werte der bekannten Parameter λ, μ sind. Nutzt man diese Werte, um die Spannungsabhängigkeit der Geschwindigkeit abzuschätzen, erhält man Werte um 10^{-3}MPa^{-1} (siehe Tabelle 2.2). Auffällig ist, dass die Geschwindigkeitsänderungen für orthogonal zur Spannungsrichtung polarisierte Wellen (also P- und SH-Wellen) ungefähr gleich sind und um eine Größenordnung unter denen für parallel zur Spannungsrichtung polarisierte liegen.

Diese Spannungsabhängigkeit der Geschwindigkeit wird als akustoelastischer Effekt bezeichnet. Man beachte, dass die Rechnung weiterhin von einem isotropen, elastischen Körper ausgeht. Die spannungsinduzierten Effekte (Geschwindigkeitsänderung und Anisotropie) sind vollständig reversibel. Nicht geklärt ist aber, bis zu welchen Spannungen die gemachten Näherungen gültig sind. Sicher ist jedenfalls, dass Effekte, die mit einer Änderung der Elastizitätsparameter erster und zweiter Ordnung einhergehen, von diesem Modell nicht berücksichtigt werden, es gilt also nur für den Bereich annähernd linearer und reversibler Elastizität.

⁵nota bene: Dies liegt mutmaßlich daran, dass Gleichung 2.17 auf einer Reihenentwicklung um den Punkt $\sigma_{33} = 0$ basiert (siehe Toupin & Bernstein (1961)).

2 Theoretische Grundlagen

λ	12,57 GPa
μ	17,36 GPa
l	-3007 GPa
m	-2283 GPa
n	-1813 GPa

Tabelle 2.1: Beispieldaten der Laméparameter für Beton, (C60-Beton, vergleichbar mit dem von uns verwendeten, nach *Payan et al.* (2009). Werte für λ, μ von mir abgeleitet.)

$$\begin{aligned}\frac{1}{v_p^0} \frac{d(v_p)}{d\sigma} &= 0,135 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1} \\ \frac{1}{v_{SH}^0} \frac{d(v_{SH})}{d\sigma} &= 0,136 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1} \\ \frac{1}{v_{SV}^0} \frac{d(v_{SV})}{d\sigma} &= 1,59 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}\end{aligned}$$

Tabelle 2.2: Abschätzung der Geschwindigkeitsänderungen unter Verwendung der Werte aus Tabelle 2.1

2.2.2 Rissbildung

Inhomogene Medien haben bereits im ungeschädigten Zustand Stellen, die nicht von einem der Hauptbestandteile ausgefüllt sind. Während diese in Gesteinen in der Regel nach einiger Zeit durch ausgefällte Lösungsmittel (in erster Linie Quarz) gefüllt werden, sind sie im extrem inhomogenen Beton meist mit Luft oder Wasser gefüllt. Aus Sicht seismischer Wellen haben sie damit einen sehr hohen Impedanzkontrast und können hochfrequente Wellen streuen. Aus der Sicht niederfrequenter Wellen verändern die Risse die elastischen Parameter und die mittlere Dichte des Mediums, sodass die Wellengeschwindigkeit sich ändert.

Die Entstehung und Ausbreitung von Rissen in Beton ist ein vielfach untersuchtes Feld. Generell haben sich nach *Hsu et al.* (1963) folgende Erkenntnisse durchgesetzt:

- Frischer Beton enthält bereits mikroskopische Risse im Übergang zwischen der Zementmatrix und den Zuschlagskörnern. Diese Risse sind wenige Millimeter lang und unter einem Millimeter breit und nicht verbunden.
- Bei einer leichten (uniaxialen) Belastung des Betons kommt es zur Vergrößerung von Rissen, deren Hauptausrichtung parallel zur Lastrichtung ist. Diese vergrößerten Risse bleiben nach dem Entspannen des Mediums teilweise bestehen. Gleichzeitig werden Risse senkrecht zur Lastrichtung zusammen gedrückt und teilweise sogar geschlossen. Dieser Effekt ist fast vollständig reversibel.

2.2 Spannungsinduzierte Geschwindigkeitseffekte in Medien

- Ab ca. 30 % der Bruchlast kommt es zu Verbindungen zwischen Rissen, erste Abweichungen von der elastischen linearen Spannungs-Stauchungs-Beziehung sind feststellbar.
- Ab ca. 70 % der Bruchlast verbinden sich Risse in größerem Ausmaß, die Risslänge nimmt nun bei weiterer Belastung nahezu exponentiell zu, da sich die Risse bereits auf die Belastbarkeit des Mediums auswirken. Der Elastizitätsmodul ist erheblich herabgesetzt.

Daraus ergeben sich für die Geschwindigkeitsänderungen durch die Rissbildung folgende Effekte:

- Bei leichter Spannung heben sich die Effekte durch Schließen der senkrechten Risse und Vergrößerung der parallelen Risse nahezu auf.
- Ab ca. 30 % der Bruchlast beginnt der geschwindigkeitsmindernde Anteil der neu entstehenden Risse zu überwiegen. Der lineare Bereich wird verlassen. Die Effekte der Rissbildung überlagern nun die des akustooelastischen Effektes.
- Ab 70 % der Bruchlast sinkt die Geschwindigkeit rapide ab. (Siehe Abb. 2.1)
- Die Wellengeschwindigkeit ohne Last ist in einem vorbelasteten Körper gegenüber der Ursprungsgeschwindigkeit erheblich herabgesetzt. (Siehe Abb. 2.2)

Berücksichtigt man zusätzlich noch den akustooelastischen Effekt (der wie gesagt eigentlich nur für den linearen Bereich berechnet wurde), ergibt sich folgendes Bild für die Geschwindigkeitsänderungen:

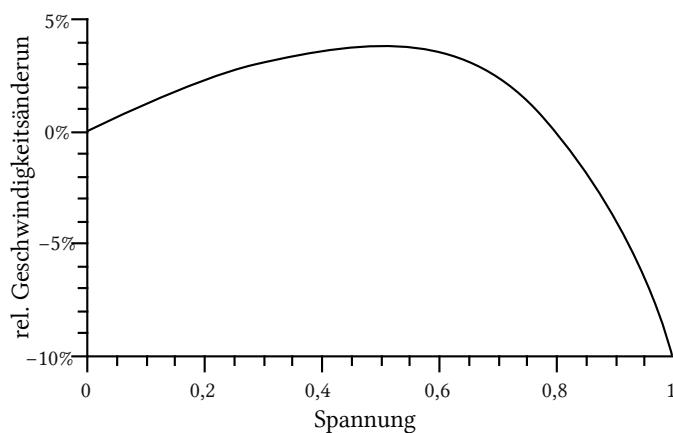


Abbildung 2.1: Skizze der Geschwindigkeits-Spannungs-Beziehung in Beton. Die Spannung ist in Anteilen der Bruchspannung aufgetragen

2 Theoretische Grundlagen

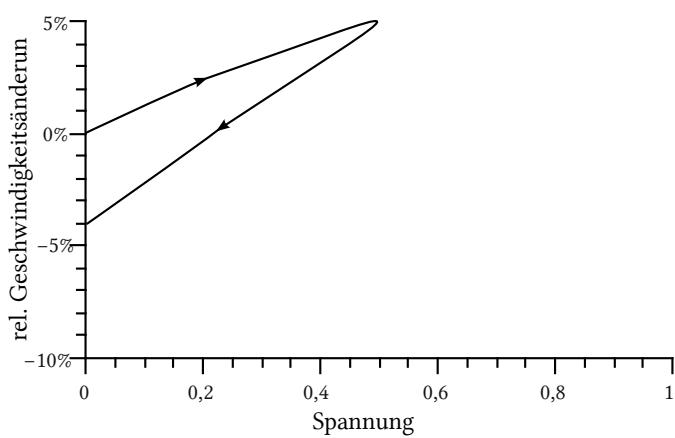


Abbildung 2.2: Skizze des Hystereseeffektes einer Last deutlich unter der Bruchlast.
Die Spannung ist in Anteilen der Bruchspannung aufgetragen

2.3 Codawelleninterferometrie

Um die oben beschriebenen Geschwindigkeitsänderungen zu messen, lässt sich die Laufzeit zu verschiedenen Zeitpunkten vergleichen. Laufzeitänderungen $\Delta\tau/\tau$ lassen sich dabei in Geschwindigkeitsänderungen $\Delta v/v$ umrechnen:

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta v}{v} &= \frac{1}{v} (v' - v) = \frac{1}{v} \left(\frac{s}{\tau'} - \frac{s}{\tau} \right) \\
 &= \frac{1}{v} \frac{s(\tau - \tau')}{\tau \tau'} \\
 &= \frac{1}{v} \frac{-s\Delta\tau}{\tau \tau'} \\
 &\approx -\frac{1}{v} \frac{s\Delta\tau}{\tau^2} \\
 &= -\frac{\Delta\tau}{\tau}
 \end{aligned} \tag{2.26}$$

Die Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessungen ist dabei gleich der Genauigkeit der Laufzeitmessungen. In unserem Fall, der Detektion von Spannungsänderungen in Beton liegen die gesuchten Effekte in der Größenordnung von einem Prozent. Die Laufzeiten direkter Wellen sind bei Geschwindigkeiten von mehreren Kilometern pro Sekunde und Entfernungen von wenigen Metern im Millisekundenbereich. Die Laufzeit der direkten Welle müsste also auf unter 10 Mikrosekunden genau gemessen werden, was selbst unter Idealbedingungen kaum möglich ist, da die Quellcharakteristik nicht reproduzierbar genug ist. Unter den realen Bedingungen eines verrauschten Signals ist es noch weniger vorstellbar, solch kleine Veränderungen zu detektieren.

Die relative Genauigkeit der Geschwindigkeitsmessung lässt sich aber nicht nur erhöhen, indem man die absolute Laufzeitmessung Genauigkeit erhöht, sondern auch, indem man den absoluten Messwert erhöht. Dies ist das Prinzip der Codawelleninterferometrie.

Statt nur die Einsätze direkter oder zumindest nur einfach gestreuter Phasen zu betrachten, wird die Coda des seismischen Signals verglichen. Diese besteht aus den überlagerten Beiträgen vielfach gestreuter Phasen. Wie in einem Interferometer sind diese Wellenzüge unter Beibehaltung der Phaseninformationen überlagert. Diese Coda ist hochsensitiv gegenüber Veränderungen der Wellenparameter im durchlauften Medium, wie Wellengeschwindigkeit, Dämpfung, Reflexionskoeffizienten an Mediumsgrenzen.

Das Wellenfeld der Coda $h(t)$ ist zusammengesetzt aus den Beiträgen $S_P(t)$ aller möglichen Pfade P :

$$h(t) = \sum_P S_P(t) \tag{2.27}$$

2 Theoretische Grundlagen

Veränderungen im Medium können nun für jeden Pfad eine individuelle Veränderung der Amplitude A_P oder eine Veränderung τ_P der Laufzeit bewirken⁶:

$$h'(t) = \sum_P A_P S_P(t - \tau_P) \quad (2.28)$$

Eine Abschätzung verschiedener Effekte⁷ zeigte dabei, dass sich verschiedene Veränderungen wie folgt auf die Coda auswirken:

homogene Geschwindigkeitsänderungen Die Form der Coda bleibt erhalten.

Durch die veränderte Laufzeit der Wellen ist das gesamte Seismogramm aber auf der Zeitachse „gestaucht“, aus dem Urseismogramm $h(t)$ ist also das neue Seismogramm $h'(t) = h(t(1 + \varepsilon))$ geworden.

inhomogene Geschwindigkeitsänderungen Die Form der Coda wird teilweise verzerrt, da sich die Laufzeit der verschiedenen Phasen nicht mehr um den gleichen Faktor verändert. Die neue Coda wird also aus mit verschiedenen Faktoren verzerrten Phasen $h_j(t)$ bestehen, die in verschiedenen Zeitfenstern (ausgedrückt durch Fensterfunktionen $w_j(t)$) unterschiedlich stark beitragen:

$$h'(t) = \sum_j h_j(t(1 + \varepsilon_j)) w_j(t)$$

Für eine genauere Betrachtung müsste ein Sensitivitätskernel $S(\vec{r}, \tau)$ berechnet werden⁸, der die Aufenthaltswahrscheinlichkeit einer Wellenphase mit Laufzeit τ am Ort \vec{r} beschreibt. Mit der räumlichen Geschwindigkeitsperturbationsverteilung $\frac{\Delta v}{v}(\vec{r})$ kann dann nach *Pacheco & Snieder* (2005) unter Annahme kleiner Δ/v die Verzögerung einzelner Codaphasen $\Delta\tau(\tau)$ berechnet werden:

$$\Delta\tau(\tau) = \int_V S(\vec{r}', \tau) \left(\frac{\Delta v}{v}(\vec{r}') \right)^{-1} dr'^3 \quad (2.29)$$

Verschiebung von Empfänger oder Quelle Nach *Snieder* (2006) kommt es hier zu keiner eindeutigen Verschiebung der Phasen, da sich kürzere Laufzeiten von Wegen in Richtung der Verschiebung mit verlängerten Laufzeiten von Wegen aus der anderen Richtung ausgleichen. Da die Phasen nun aber anders interferieren, verändert sich die Wellenform signifikant.

Sonstige Effekte im Medium Die Auswirkungen anderer Veränderungen im Medium, wie Verschiebung eines Streukörpers oder einer Streuschicht lassen sich nur schwer quantifizieren und ließen sich am ehesten durch numerische Simulationen des Mediums abschätzen.

Für den einfachsten Fall einer homogenen Geschwindigkeitsänderung im Medium, bei dem die relative Laufzeitänderung konstant ist, lässt sich die Geschwindigkeitsänderung mit einfachen Algorithmen recht gut und stabil bestimmen. Diese seien im Folgenden vorgestellt:

⁶Dispersive Effekte seien vernachlässigt

⁷*Snieder* (2006)

⁸Den Sensitivitätskernel $S(\vec{r}, \tau)$ zu berechnen, ist nicht trivial und verlangt zumindest eine gewisse Kenntnis über das betrachtete System. Grundsätzlich ist es aber möglich, auf diesem Wege zu einer Wellenforminversion zu gelangen.

2.3.1 Moving-Window-Cross-Spectral-Analysis

Bei diesem Algorithmus werden N Zeitfenster aus der Coda ausgeschnitten. Diese haben eine Länge T und seien um t_k zentriert. Anschließend berechnet man für jedes Fenster der Coda h' die Kreuzkorrelation mit dem entsprechenden Fenster einer Referenzmessung h .

$$CC_k(\tau) = \frac{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h' [t - \tau] h[t] dt}{\sqrt{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h'^2 [t - \tau] dt \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h^2 [t] dt}} \quad (2.30)$$

Der Wert τ , für den diese Funktion das Maximum annimmt, wird nun als Laufzeitänderung τ_k dieses Zeitfensters betrachtet. Trägt man nun alle τ_k über t_k ab, kann man aus der Steigung der Kurve die relative Laufzeitänderung abschätzen. Außerdem gibt die entstehende Kurve eine Aussage über die Qualität der Abschätzung homogener Geschwindigkeitsänderung.

Diese Methode ist recht naheliegend, hat aber einen gewichtigen Nachteil: Die Fensterlänge T sollte einerseits möglichst groß sein, um im Signal vorhandenes Rauschen zu unterdrücken. Da der Nenner primär der Normierung dient, will ich mich in der Argumentation auf den Zähler konzentrieren: Dieser enthält das Produkt der Pfadsumme aus Gleichungen 2.27 und 2.28, dass sich in eine Summe über gleiche und ungleiche Pfade aufteilen lässt:

$$N(\tau) = \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h' [t - \tau] h[t] dt \quad (2.31)$$

$$= \sum_P \sum_{P'} (\dots) = \sum_{P=P} (\dots) + \sum_{P \neq P'} (\dots) \quad (2.32)$$

$$= \sum_{P=P} \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} S_P [t - \tau - \tau_P] S_P [t] dt + \sum_{P \neq P'} \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} S_P [t - \tau - \tau_P] S_{P'} [t] dt \quad (2.33)$$

Nach Abschätzung von *Snieder* (2006) ist in zwei Messungen das Verhältnis des Beitrags gleichbleibender Pfade zu dem unterschiedlicher Pfade

$$\frac{|\text{Diagonalterme}|}{|\text{Kreuzterme}|} \propto \sqrt{\Delta f 2T} \quad (2.34)$$

jeweils proportional zur Wurzel von Fensterlänge und Bandbreite und damit proportional zur Wurzel der Anzahl der Samples, die das untersuchte Fenster enthält. Da nur die Diagonalterme ein zur CWI nutzbares Signal erhalten, ist eine größere Fensterlänge von Vorteil.

Andererseits darf die Fensterlänge nicht zu groß sein, schließlich ist die Laufzeitänderung am Beginn des Fensters $\Delta\tau_B = (t_k - \frac{T}{2}) \frac{\Delta\tau}{\tau}$ unterschiedlich von der am Fensterende $\Delta\tau_E = (t_k + \frac{T}{2}) \frac{\Delta\tau}{\tau}$.

$$\Delta\tau_E - \Delta\tau_B = \Delta\tau \frac{T}{\tau} \quad (2.35)$$

2 Theoretische Grundlagen

Aus diesem Dilemma bieten sich verschiedene Auswege: Zum einen kann die Fensterlänge mit zunehmendem τ vergrößert werden, es können auch überlappende Fenster gewählt werden. Ersteres Verfahren empfiehlt sich nicht, da die Fehlerabschätzung dadurch erheblich erschwert wird, bei letzterem sind die resultierenden τ_k eher ein laufender Mittelwert, was ebenfalls nicht sinnvoll erscheint.

2.3.2 Streckkorrelation

Eine jüngere Idee, die dieses Dilemma recht elegant umgeht, ist die Streckkorrelation nach *Sens-Schönfelder & Wegler* (2006). Dabei verwendet man sehr große Zeitfenster, korreliert diese aber nicht mit einer um einen konstanten Faktor τ auf der Zeitachse verschobenen Referenzmessung $h' [t - \tau]$, sondern stattdessen mit einer um einen konstanten Faktor ε gestreckten Referenzmessung $h' [t(1 - \varepsilon)]$:

$$CC_k(\varepsilon) = \frac{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h' [t(1 - \varepsilon)] h[t] dt}{\sqrt{\int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h'^2 [t(1 - \varepsilon)] dt \int_{t_k - \frac{T}{2}}^{t_k + \frac{T}{2}} h^2 [t] dt}} \quad (2.36)$$

Der Streckfaktor ε , der die Korrelationsfunktion $CC_k(\varepsilon)$ maximiert, entspricht dann der im betrachteten Fenster vorherrschenden Laufzeitänderung $\Delta\tau/\tau$.

3 Vorbereitende Messungen

3.1 Messungen im Keller des Institut

3.1.1 Verwendete Geräte

3.1.1.1 Vibrationsquelle Inertialerreger TV 51125-IN

Das Konzept der Diplomarbeit sah vor, eine kleine Vibrationsquelle für seismische Messungen im Skalenbereich weniger Meter zu verwenden. Da für diesen Anwendungszweck keine speziellen Geräte angeboten werden, verwendete ich einen Inertialerreger aus der Materialfestigkeitsprüfung. Dieser dient eigentlich dazu, an Strukturen oder Maschinen angebracht zu werden, um deren Ansprechverhalten auf Schwingungen zu messen, z.B. um die Eigenfrequenzen zu bestimmen. Mit diesen Informationen kann dann die Schwingungsanfälligkeit des Systems (man denke an eine Fahrzeugchassis) beurteilt und letztendlich verringert werden.

Solche kleinen Vibrationsquellen wurden zwar bereits verschiedentlich für seismische Experimente verwendet, trotzdem schien es mir ratsam, die Eignung zunächst im Labor zu überprüfen.

Die verwendete Vibrationsquelle *TV 51125-IN* der Firma *TIVA GmbH* (Schnitzzeichnung: siehe Abbildung 3.1, Spezifikationen: siehe Tabelle 3.1) wird von einem eigenen Verstärker mit Strom versorgt, der eine maximale Nennleistung von 500 W anbietet. Dieser verstärkt das über eine BNC-Buchse eingegebene Quellsignal im Frequenzbereich von 0 Hz bis 2 KHz angeblich verzerrungsfrei. Informationen über den Klirrfaktor oder die Linearität des Frequenzgangs liegen nicht vor. Das Quellsignal erzeugten wir über die Soundkarte eines PCs aus einer vorher erstellten Audiodatei. Handelsübliche Soundkarten können in diesem Frequenzbereich als praktisch linear verstärkend angesehen werden.

3.1.1.2 Auslesesystem SUMMIT compact

Zum Aufzeichen der Geophondaten wurde das in der Seismik weitverbreitete System *SUMMIT compact* der Firma *DMT GmbH* verwendet. Dieses kann in der vorhandenen Konfiguration bis zu 48 Geophone auslesen. Die maximale Samplerate beträgt 125 kHz, die maximale Aufzeichnungsdauer 128 Sekunden. Dabei wirkt aber in erster Linie die maximale Samplelänge von 16384 Samples einschränkend.

Ein weiteres Problem stellte die Triggerung dar. Diese erfolgt über einen Spannungspuls oder -abfall an einem BNC-Eingang. Bei Verwendung eines Schlaghammers als Quelle wird diese Triggerung durch einen Beschleunigungssensor geleistet,

3 Vorbereitende Messungen

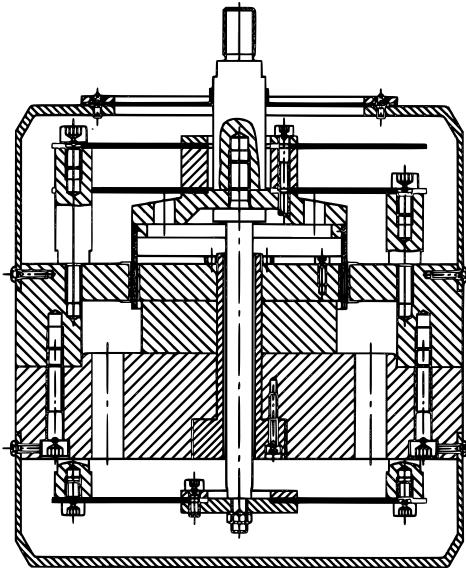


Abbildung 3.1: Schnittzeichnung des Inertialerregers

System	TV 51125-IN
Schwingerreger	S 51125-IN
Verstärker	BAA 500
Nennkraft (Sinus)	250 N
Frequenzbereich	DC - 2000 Hz
Max. Schwingweg	9 mm
Max. Geschwindigkeit	1,5 m/s
Beschleunigung (Sinus)	2 g
max. Spannung	45 V
max. Strom	11 A
Axiale Federsteifigkeit	20 N/mm
Masse Schwingsystem	0,35 kg
Ankopplung (Gewinde ø/mm)	M12
Gewicht	13 kg

Tabelle 3.1: Spezifikation des Inertialerregers

der kurzzeitig einen Stromkreis schließt, was das System als Spannungsabfall wahrnimmt. Für unsere Messungen mit der Vibrationsquelle aber war eine neue Art der Triggerung vonnöten, die möglichst automatisch und exakt ablaufen sollte. Idealerweise sollte der PC bzw. seine Soundkarte diese auslösen. Dazu wurde auf dem linken Kanal der Quelldatei das eigentliche Schallsignal und auf dem rechten Kanal ein Impuls gespeichert. Das linke Signal wird an den Verstärker geleitet, das rechte an die Diodenseite eines Optokopplers. Dieser setzt den Spannungspuls der Sound-

karte in einen Spannungsabfall auf seiner Ausgangs- bzw. Transistorseite um. Auf diese Art wird die Triggerung zu einem exakt definierten Zeitpunkt im Verhältnis zum Quellsignal ausgelöst.

3.1.2 Testmessungen

Im Keller des Instituts für Geophysik und Geologie in der Talstraße 35 in Leipzig führte ich verschiedene Testmessungen durch. Dazu betonierten wir einen Sockel mit Gewinde, in das der Inertialerreger fest eingeschraubt werden konnte. Eine Geophon-Messstrecke wurde zusätzlich ausgelegt, um die Signale messen zu können und das Zusammenspiel der Komponenten zu testen.

Von den zahlreichen durchgeführten Versuchen sollen nur drei kurz präsentiert werden. Da sie alle im Frequenzbereich zwischen 100 und 400 Hz durchgeführt wurden, sind ihre Ergebnisse vergleichbar.

Ein einfacher erster Versuch war eine Hammerschlagmessung (Abbildung 3.2). Auf die Messwerte wurde ein Bandpassfilter mit Eckfrequenzen 100 und 400 Hz angewandt. Das Resultat zeigt eine langsame Oberflächenwelle mit ca. 200 m/s und eine deutlich schnellere Kopfwelle mit ca. 1600 m/s.

Als nächstes wurde eine Vibrationsmessung mit einem Sweep von 100 bis 400 Hz (8 Sekunden) versucht (Abbildung 3.3). Diese zeigt ein ziemlich ähnliches Bild wie die Hammerschlagmessung, die Kopfwelle ist hier weniger deutlich. Da weißes Rauschen eine kürzere Autokorrelationszeit als ein Sweep hat, versuchte ich noch, ein Rauschsignal mit ebenem Frequenzverlauf von 100 bis 400 Hz als Quellsignal zu verwenden. Dieses erzeugte ich aus einem Rausch-Signal mit Frequenzen von 10 bis 1000 Hz, auf den ich einen Butterworth-Bandpassfilter anwendete. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.4 zu sehen. Dieser Quellsignaltyp ist aber doch nicht so gut geeignet wie ein Sweep, vor allem, da die Quelle ein sinusartiges Signal mit höherer Amplitude erzeugen kann.

Versuchsweise wurde noch statt eines Sweeps eine Messung mit einem künstlichen Rauschsignal mit Frequanzanteilen zwischen 100 und 400 Hz durchgeführt (Abbildung 3.4). Die Qualität des Seismogramms ist mit dem des Sweeps zu vergleichen.

3.1.3 Hintergrundrauschen

Interesseshalber wurde auch eine Messung mit rauschgenerierten Seismogrammen vorgenommen. Dazu wurden die Geophone in unregelmäßigen Abständen auf einer Linie angeordnet. Für die Messung wurde hinter und entlang der Messstrecke von einer Personengruppe Rauschen erzeugt. Anschließend wurde die Kreuzkorrelation zwischen den Rausch-Seismogrammen zweier Geophone berechnet und über die Entfernung zwischen den beiden Geophonen aufgetragen (Abbildung 3.5). Diese Kreuzkorrelation konvergiert bei gleichverteiltem Rauschen gegen die Greensche Funktion zwischen den beiden Geophonen¹. Diese Bedingung ist in unserem Fall

¹Bewiesen in Snieder (2004), Experimente für nicht völlig gleichverteilte Quellen finden sich bei Hadjioannou et al. (2009)

3 Vorbereitende Messungen

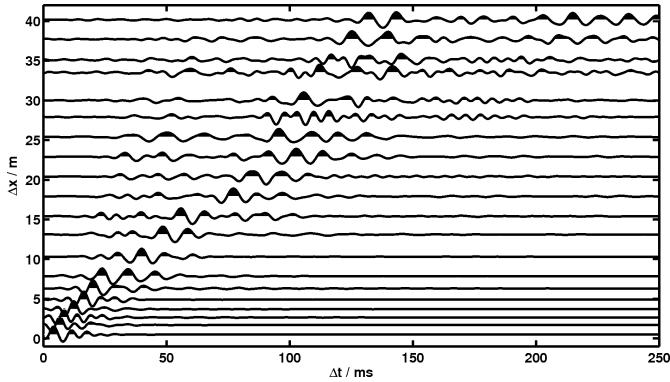


Abbildung 3.2: Seismogrammsspuren einer Hammerschlagmessung im Keller. Bandpassgefiltert auf 100 bis 400 Hz.

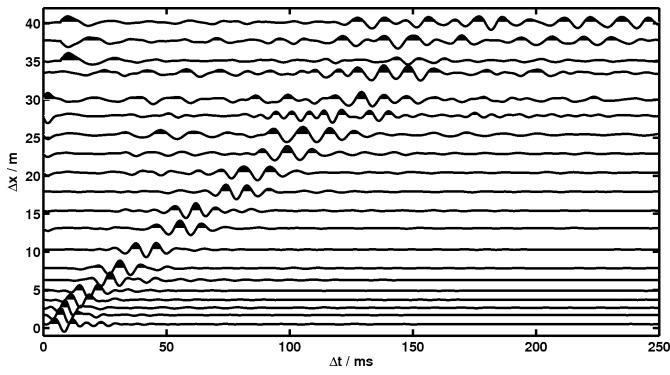


Abbildung 3.3: Aus Vibrationsseismik rekonstruierte Seismogramme im Keller. Quellsignal: Sweep von 100 bis 400 Hz.

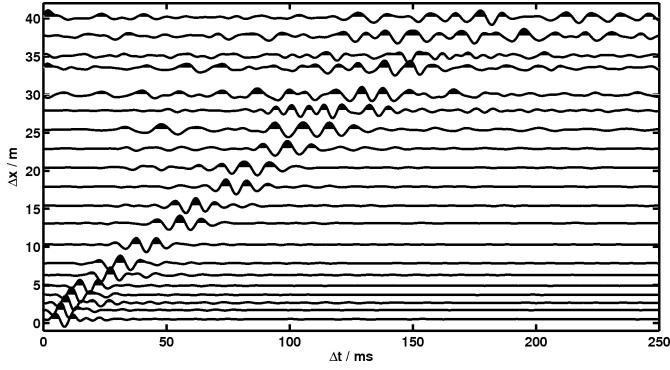


Abbildung 3.4: Aus Vibrationsseismik erzeugte Seismogramme im Keller. Quellsignal: Weißes Rauschen von 100 bis 400 Hz.

sicher nicht erfüllt. Trotzdem erkennt man in der Abbildung gut die bereits aus aktiven Messungen bekannte Oberflächenwelle mit ungefähr 200 m/s. Interessanterweise ist deren genaue Geschwindigkeit aber von der Richtung abhängig, wobei dies mutmaßlich ein Artefakt durch nichtisotrop verteilt Rauschen ist.

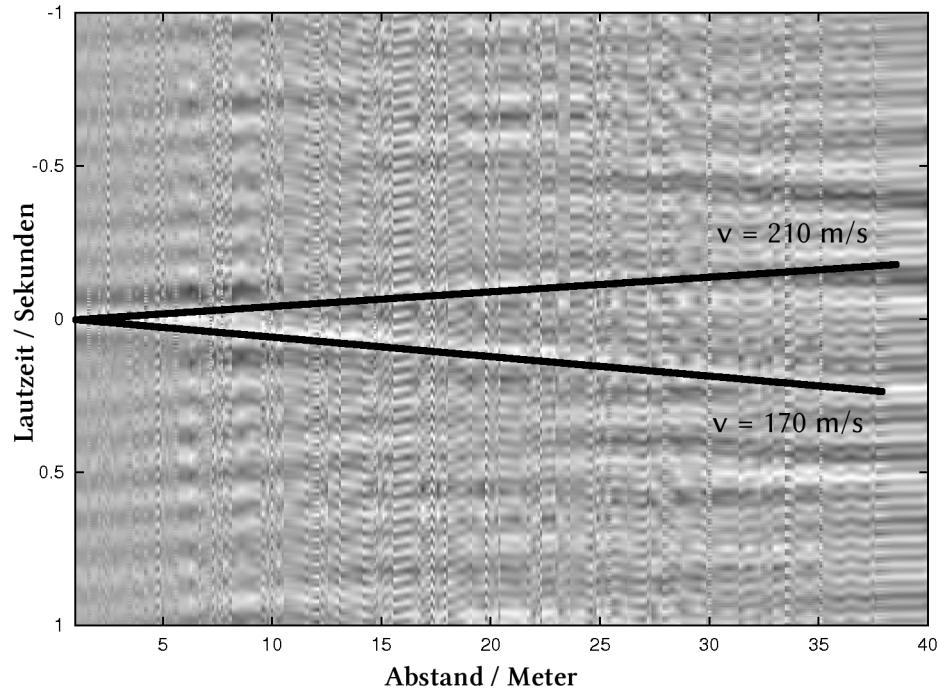


Abbildung 3.5: Rauschgenerierte Seismogramme im Keller Talstraße

3.1.4 Zusammenfassung

Die Komponenten konnten als funktionierend erkannt werden und auch ihr Zusammenspiel schien zunächst keine Probleme zu machen. Die nächste Testmessung sollte daher unter Freiluftbedingungen durchgeführt werden.

3 Vorbereitende Messungen

3.2 Messungen auf der Elsterbrücke

3.2.1 Ziele der Messungen

Um für die Messungen auf der Steinachtalbrücke besser eingerichtet zu sein, wurde eine Vorbereitungsmessung auf einer fertigen Autobahnbrücke ähnlicher Bauart in der Nähe Leipzigs unternommen. Dabei sollten primär folgende Fragen geklärt werden:

- Erprobung der Ankopplung von Quelle und Geophonen auf „harter“ Oberfläche
- Ermittlung spezieller Wellentypen und -geschwindigkeiten in Spannbeton, Abschätzung der Dämpfung in Abhängigkeit von der Frequenz
- daraus folgend: Festlegung geeigneter Frequenzbereiche für Messung.
- Vor-Ort-Besichtigung einer Autobahnbrücke und Abstimmung der zu verwendenden Messgeräte

3.2.1.1 Beschreibung der Brücke

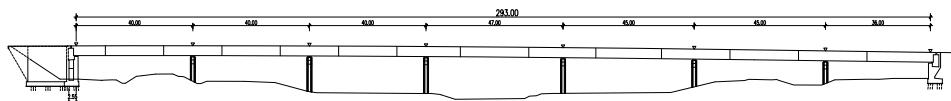


Abbildung 3.6: Längsschnitt durch die Elsterbrücke

Für diese Messung stand uns die Elsterbrücke zur Verfügung, auf der die BAB 38 im Leipziger Südraum eine Landstraße, den Fluß Weiße Elster und eine Bahnlinie überquert. Ähnlich wie die Steinachtalbrücke wurde sie im Taktschiebeverfahren errichtetet und hat eine vergleichbare Feldlänge und Hohlkastenabmessung (Siehe Tabelle 3.2, die Kenndaten der Steinachtalbrücke finden sich in Tabelle 4.1 auf Seite 40). Da die Brücke bereits unter Verkehr ist, fanden die Messungen auf der Bodenplatte des Hohlkastens statt (siehe Abbildung 3.7).

3.2.1.2 Messablauf

Für die Messung wurden 17 Geophone, in Füße geschraubt, aufgebaut. Die Anbringung der Vibrationsquelle stellte ein Problem dar, da in den Beton der Brücke nahegelegenderweise nicht gebohrt werden konnte. Unsere Lösung war ein transportabler Sockel, der aus einer 25 mm starken Stahlplatte bestand, auf die eine Mutter in zum Anschluss der Quelle passender Gewindegröße aufgeschweißt war. Zusätzlich waren auf dem Sockel Halterungen angebracht, mit denen Bleigewichte fixiert werden konnten, um den Sockel hinreichend zu beschweren. Da die Quelle bei einem Eigenwert von 13 kg eine maximale Beschleunigung von 2 g aufweisen sollte, legten

3.2 Messungen auf der Elsterbrücke

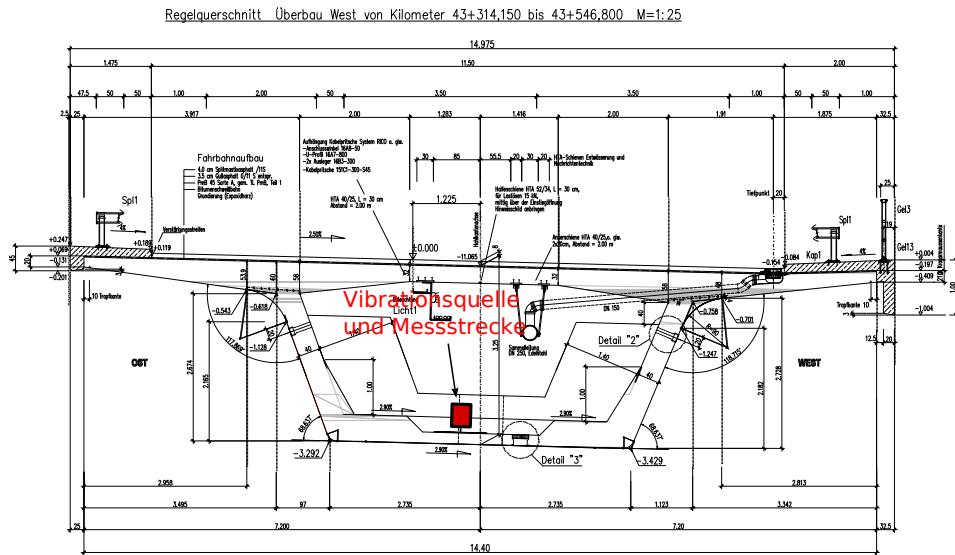


Abbildung 3.7: Querschnitt des Hohlkastens der Elsterbrücke mit eingezeichneter Vibrationsquelle.

wir den Sockel zunächst auf ein Gewicht von ungefähr 40 kg aus. Fotos des Sockels sind in der Abbildung A.2 zu sehen.

Folgende Messungen wurden vorgenommen:

1. Hammerschlag, Quelle bei $x=0$ m, 4-fach gestapelt und 10-fach gestapelt,
2. Aufnahme mit gleicher Geophonkonfiguration ohne Hammerschlag (Abschätzung des Rauschlevels),
3. Sweep 20 bis 400 Hz, gleiche Geophonkonfiguration,
4. Versuche zu Coherent Backscattering Effect: Hammerschläge neben jedem zweiten Geophon,

Konstruktionstyp:	4-spurige Balkenbrücke in Takschiebebauweise
Länge:	238 Meter
Anzahl Felder:	7
Stützweiten:	40-40-40-47-45-45-36 m
Breite (Fahrbahnplatte):	14,40 m
Breite (Bodenplatte):	5,47 m
Querneigung (Bodenplatte):	2,9 %
Dicke (Bodenplatte, Mitte/Rand):	20/45 cm

Tabelle 3.2: Kenndaten Elsterbrücke

3 Vorbereitende Messungen

5. Hammerschläge bei $x = -11, 14, 20, 30, 45$ Meter,
6. Sweep 20 bis 400 Hz, Geophone um 7,50 Meter verschoben..

3.2.2 Coherent Backscattering Enhancement

Um zu überprüfen, ob in der gemessenen Coda tatsächlich vielfach gestreute Wellen vorliegen, wurde eine Messung auf Verstärkung durch kohärente Rückstreuung (Coherent Backscattering Enhancement) durchgeführt. Die Erläuterung des Effektes lehnt sich an *Larose et al.* (2006) an.

Im Fall vielfacher Streuung in einem Medium gibt es - wenn Quelle und Emp-

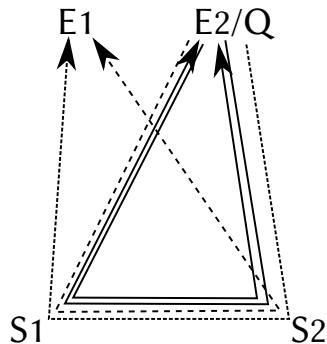


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung des Prinzips der kohärenten Rückstreuung

fänger sich am selben Ort befinden - zu jedem Pfad auch den umgekehrten Pfad gleicher Länge und gleicher Welleneigenschaften (siehe Abbildung 3.8). Sind Quelle und Empfänger am gleichen Ort, entsteht bei mehrfacher Streuung kohärente Interferenz zwischen einem Wellenweg und dem umgekehrten (durchgezogene Pfade). Sind Quelle (Q) und Empfänger (E₁) nicht am gleichen Ort lokalisiert, gibt es keine reziproken Wellenwege, die kohärent interferieren könnten. Folglich ist zu erwarten, dass, wenn die Streuung im Medium zeitlich konstant und stochastisch verteilt ist, die integrierte Wellenenergie an diesem Empfänger höher ist als an den anderen Orten im Medium. Der Durchmesser dieser Zone erhöhter Energie ist im zweidimensionalen Fall proportional zur Wellenlänge der betrachteten Wellen. Die relati-

Typ Geophone:	vertikal
Eigenfrequenz:	10 Hz
Anzahl:	17
Abstand:	50 cm
Auslagelänge:	8,50 m
Anbringung:	Eingeschraubt in Stativfüße (Dreibeine)

Tabelle 3.3: Geophonauslage

ve Energie $S(\Delta r)$ in Abhängigkeit von der Entfernung zur Quelle Δr ist dann nach *de Rosny et al.* (2000) für eine Wellenlänge λ gegeben durch die Gleichung:

$$S(\Delta r) = 1 + J_0^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \right) \quad (3.1)$$

$$\text{mit } J_0(x) = \sum_{r=0}^{\infty} \frac{(-1)^r (\frac{x}{2})^{2r}}{\Gamma(r+1)r!} \quad (3.2)$$

Dabei ist $J_0^2(x)$ das Quadrat der Besselfunktion erster Gattung mit Ordnung 0. Es nimmt Werte zwischen Null und Eins an, die relative Energie sollte also zwischen 1 und 2 schwanken. Wie man an den Ergebnissen unserer Messung (Abb. 3.9 und 3.10) sehen kann, liegt das Maximum eher in der Größenordnung von $S = 1,6$, während der Wert für größere Abstände leicht unter $S = 1$ sinkt. Insgesamt lassen sich diese Abweichungen recht gut dadurch erklären, dass die vorherrschenden Wellenlängen größer als die Querabmessung der Struktur sind und der Empfänger und die Quelle nicht exakt am gleichen Ort lokalisiert sind. Das Absinken des Energieniveaus am Ort der Quelle nach ungefähr einer Sekunde entspricht dem Verschwinden der Signalenergie im Umgebungsrauschen.

In Abbildung 3.10 ist eine Anpassung von Gleichung 3.1 an die Messdaten gezeichnet, die für die Wellenlänge einen Wert von 21 Metern ergibt. Sie ist allerdings nicht sehr zuverlässig, der R^2 -Wert beträgt lediglich 0,82 und ist damit nur wenig höher als für andere Fit-Resultate (z.B. $\lambda = 7\text{m}$: $R^2 = 0,75$). Jedenfalls legt das Ergebnis eine Wellenlänge deutlich über fünf Meter und damit deutlich über der Querabmessung der Bodenplatte nahe.

Folgt man dem von Larose verwendeten Modell der Biegeschwingung eines schmalen, langen Balkens mit Dicke h und Raumwellengeschwindigkeiten c_p und c_s , kann man folgende Dispersionsrelation annehmen:

$$c_\phi = \sqrt{\frac{2\pi}{\sqrt{3}} f h c_s} \sqrt{1 - \frac{c_s^2}{c_p^2}} \propto \sqrt{f} \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{c_\phi}{f} \propto f^{-\frac{1}{2}} \quad (3.4)$$

Uns interessiert hier lediglich die Abschätzung der Geschwindigkeiten und der Frequenzabhängigkeit der Wellenlänge. Nimmt man für Beton die Raumwellengeschwindigkeiten $c_p \approx 4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ und $c_s \approx \sqrt{\frac{1}{3}} c_p = 2300 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ an und verwendet die Dicke der Bodenplatte von $h = 20\text{cm}$, kommt man für eine Frequenz von 1000 Hz auf folgende Werte:

$$c_\phi \approx 1170 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (3.5)$$

$$\lambda \approx 37 \cdot f^{-\frac{1}{2}} = 1,16\text{m} \quad (3.6)$$

3 Vorbereitende Messungen

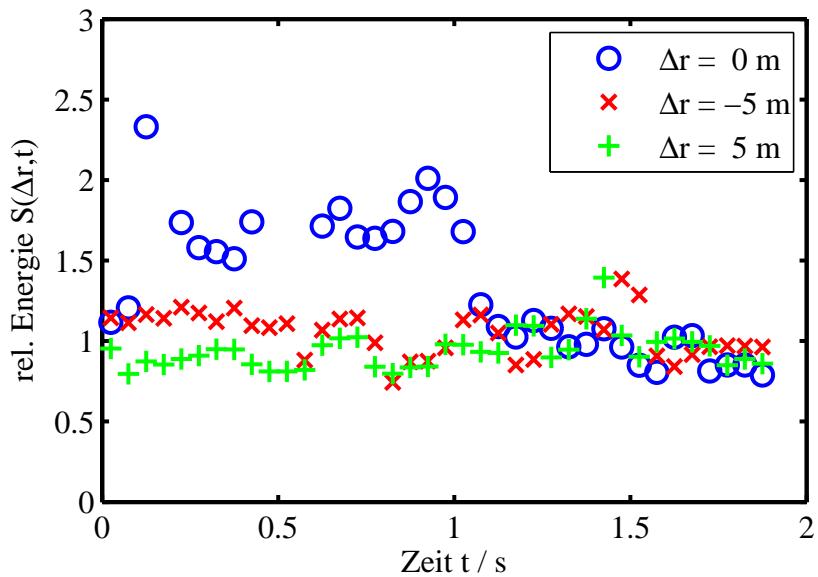


Abbildung 3.9: Gemessene Energie $S(\Delta r, t)$ an der Quelle und zwei Geophonen mit $\Delta r = 5 \text{ m}$ im zeitlichen Verlauf

Diese Werte passen somit weder zu den Messwerten für die Wellenlänge, noch für die der Wellengeschwindigkeit, die aus den hochfrequenten Seismogrammen (Abb. 3.12) mit ca. $2200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ abzuschätzen ist. Die Annahme einer reinen Biegeschwingung ist also für die betrachtete Bodenplatte mit seitlicher Fixierung durch die Stege zu

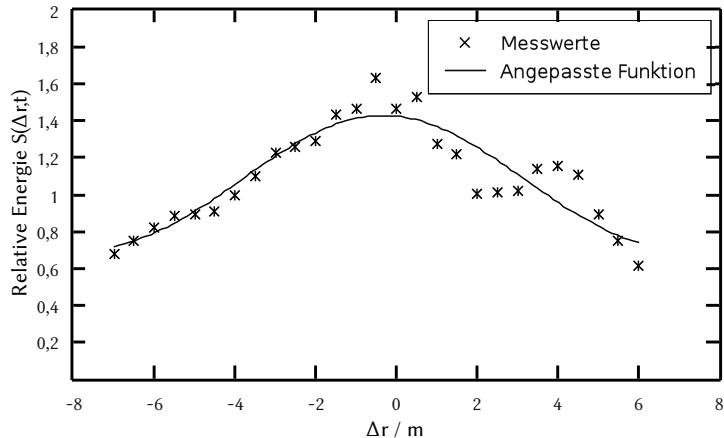


Abbildung 3.10: Gemessene Energie $S(\Delta r, t)$ an Geophonen mit Abstand Δr zum Schlagpunkt im Zeitfenster 200 bis 700 Millisekunden

simpel.

Um noch etwas mehr über den Wellentyp zu erfahren, wurde eine FK-Analyse durchgeführt (Abb. 3.11). Es ist dabei sehr schwer, typische Dispersionskurven auszumachen. Betrachtet man lediglich die Amplituden in Abhängigkeit von der Wellenzahl, fällt auf, dass das Energiemaximum bei einer Wellenzahl von $k = 0,12\text{m}^{-1}$ (bei entsprechend einer Wellenlänge von 8 Metern) recht deutlich ist.

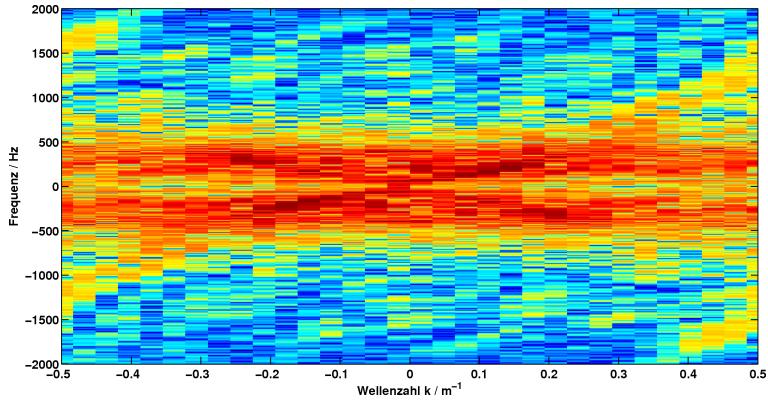


Abbildung 3.11: FK-Darstellung einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen (logarithmische Darstellung des Amplitudenspektrums).

3 Vorbereitende Messungen

3.2.3 Hammerschlagseismik

3.2.3.1 Hochfrequenter Anteil

Betrachtet man die Seismogramme selbst, so ist im hochfrequenten Anteil (3.12) zu erkennen, dass das Wellenfeld primär aus Wellenzügen zu bestehen scheint, die die Längsachse der Brücke entlanglaufen. Es sind insbesondere keine hyperbolischen Kurven zu erkennen, die auf eine Reflexion an den Plattenrändern hindeuten würden. Starke Signale, die auf einzelne Spuren beschränkt sind, können als Konversionen niederfrequenterer Wellen an Strukturen innerhalb der Platte (Spannglieder und Bewehrung) interpretiert werden.

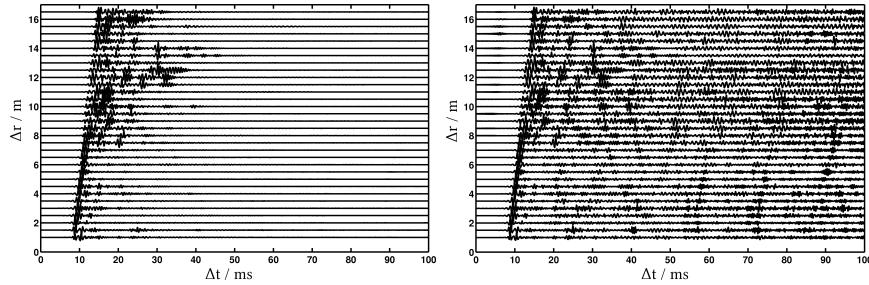


Abbildung 3.12: Seismogramme einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Hochpassfilterung bei 1 kHz. rechts: AGC mit Zeitfenster 5 ms

3.2.3.2 Niederfrequenter Anteil

Das Bild der in der Struktur reverbierenden Wellen wird noch deutlicher, wenn man den tieffrequenten Anteil der Coda betrachtet (Abbildung 3.13). Hier sind deutlich mehrere Wellenzüge erkennbar, die in beide Richtungen den Messbereich durchlaufen und dabei ihre Form fast nicht verändern.

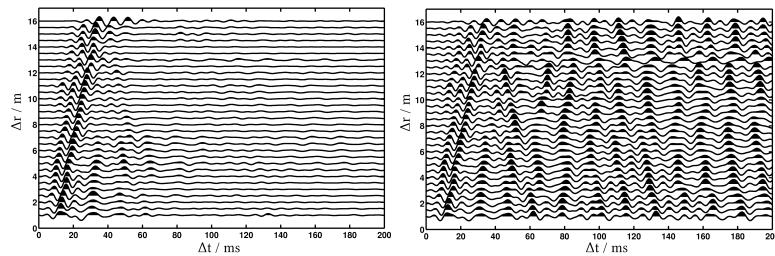


Abbildung 3.13: Seismogramme einer Hammerschlagmessung mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Bandpassfilterung zwischen 20 und 400 Hz. rechts: AGC mit Zeitfenster 20 ms

3.2.4 Vibrationsseismik

Die Vibrationsseismik wurde nur mit einem Sweep von 20 bis 400 Hz durchgeführt. Die Seismogramme sind in Abbildung 3.2.4 dargestellt. Aus diesen wurde das Quellsignal herausgefaltet². Die so erzeugten Seismogramme wurden zum einen im Frequenzbereich von 20 bis 400 Hz ausgewertet. Dabei ist die gleiche Welle wie im tief-frequenten Bereich der Hammerschlagseismik zu erkennen (Abbildung 3.15, links). Versuchsweise betrachtete ich den hochfrequenten Anteil der gleichen Messung. Die sichtbare Welle hat die gleiche Geschwindigkeit wie die tieffrequente, es handelt sich also nur um den oberen Frequenzanteil der gleichen Wellen, mutmaßlich der Biegewelle aus der Hammerschlagmessung.

Um eine Körperwelle anzuregen, müsste die Anregung durch die Vibrationsquelle also mit einem hochfrequenten Sweep geschehen.

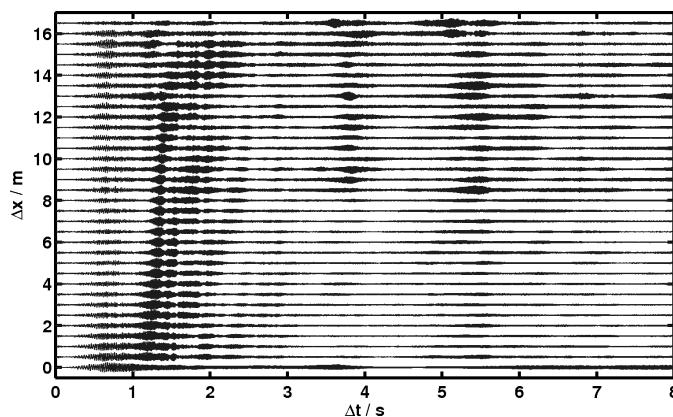


Abbildung 3.14: Rohseismogramme einer Vibrationsseismik-Messung an der Elsterbrücke. Sweep von 20 bis 400 Hz.

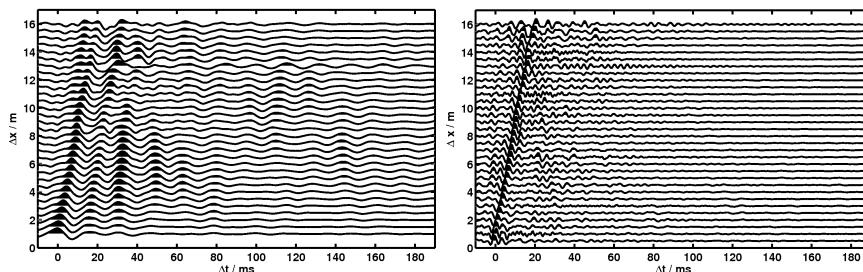


Abbildung 3.15: Seismogramme aus Vibrationsseismik mit 36 Geophonen, kombiniert aus zwei Messungen mit je 18 Geophonen. Sweep 20 bis 400 Hz, links, Bandpass 20 bis 400 Hz, rechts: Hochpass 400 Hz.

²siehe z.B. Buttkus (2003)

3 Vorbereitende Messungen

3.2.5 Weitere Erkenntnisse

Die verwendete Konstruktion zur Arretierung der Quelle auf einer festen Oberfläche erwies sich als zu leicht, da sie bei voller Ansteuerung der Vibrationsquelle zu springen begann. Diesem Umstand kann aber durch weiteres Beschweren abgeholfen werden.

Die Verwendung von 100 Hz-Geophonen wurde wieder verworfen, da diese im höherfrequenten Bereich fast äquivalent zu den verwendeten 10 Hz-Geophonen waren, aber den Frequenzbereich unterhalb 60 Hz stark dämpften. Da dieser eventuell nützliche Informationen enthielt und im Bedarfsfall auch durch nachträgliche Frequenzfilterung ausgeschaltet werden kann, schienen die breitbandigeren 10 Hz-Geräte angemessener.

Den Messungen ist weiterhin zu entnehmen, dass die Dämpfung innerhalb der ersten zehn Meter fast unerheblich ist.

3.2.6 Zusammenfassung

Die Messungen auf der Elsterbrücke haben gezeigt, dass mit der verwendeten Apparatur Messungen seismischer Wellen in Betonstrukturen möglich sind. An den verwendeten Geräten waren noch geringfügige Veränderungen vorzunehmen. Insbesondere entschied ich mich, die Geophone an den Beton anzukleben, statt sie nur über Dreifüße aufzustellen.

Die CBE-Messung ergab, dass für Hammerschlagmessungen einige Meter um die Quelle herum zwischen 200 und 1000 ms Energiegleichverteilung herrscht, dass also deterministische Streuung an den Strukturen ein gleichmäßiges Wellenfeld erzeugt. Nach *Larose et al.* (2006) ist dies eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Codawelleninterferometrie.

Als problematisch erwies sich bereits hier die Geländegängigkeit der vielfältigen Gerätschaften.

4 Messungen an Steinachtalbrücke

4.1 Beschreibung der Brücke

4.1.1 Beschreibung des Vorhabens

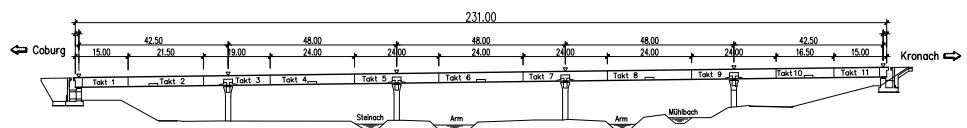


Abbildung 4.1: Längsschnitt durch die Steinachtalbrücke

Um eine Messung unter realen Bedingungen vornehmen zu können, brauchte ich eine Bauwerkstruktur mit hinreichender Komplexität, bei der aber trotzdem große Spannungsänderungen in überschaubaren Zeiträumen auftraten. Diese sollten außerdem zumindest annähernd bekannt sein. Meine Wahl fiel dabei auf eine Brücke im Bauzustand, die im sogenannten Taktschiebeverfahren hergestellt wird.

Dabei wird der Überbau der gesamten Brücke in Takte von jeweils ca. 24 Meter Länge unterteilt. Hinter dem einen Widerlager wird nun eine Fabrikationsanlage aufgebaut, in der pro Woche ein solcher Takt hergestellt werden kann. Nachdem der Unterbau, also Gründung und Pfeiler, fertiggestellt sind, wird der erste Takt konstruiert und über das Widerlager hinweg 24 Meter in Richtung der Pfeiler geschoben. In der folgenden Woche wird der zweite Takt erstellt, die beiden Takte werden über Spannlitzen verbunden und gemeinsam weitere 24 Meter verschoben. Auf diese Art und Weise wird jede Woche ein Takt gebaut und an einem festen Termin (in der Regel montags früh) mit den bereits fertigen Takten verschoben, bis der erste Takt schließlich am gegenüberliegenden Widerlager angekommen ist. Ein einzelner Verschubvorgang dauert ca. 2 Stunden. Das bedeutet, dass jeder Abschnitt der Brücke in diesen zwei Stunden einmal in der Feldmitte hängt und einmal auf einem Pfeiler aufliegt, also sehr unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt ist.

Im vorliegenden Fall bestand die Brücke aus 11 Takten zu je 24 Metern (die ersten und die letzten Takte haben oft abweichende Längen, damit der erste Takt im Bauzustand möglichst wenig frei in der Luft hängt), der Abstand zwischen zwei Pfeilern (die Feldlänge) betrug 48 Meter. Unsere Messstrecke befand sich zwischen der Mitte von Takt 4 und der Mitte von Takt 5. Dies hat den Vorteil, dass der Beton bei allen Messungen über zwei Wochen, bei der letzten - erfolgreichsten - sogar über sechs Wochen alt war und somit Abbindungeffekte keine Rolle mehr gespielt haben dürfen.

4 Messungen an Steinachtalbrücke

Konstruktionstyp:	2-spurige Balkenbrücke in Taktschiebebauweise
Länge:	229 Meter
Anzahl Felder:	5
Stützweiten:	42,5-48-48-48-42,5 m
Breite (Fahrbahnplatte):	12 m
Breite (Bodenplatte):	5,00 m
Querneigung (Bodenplatte):	5,5 %
Dicke (Fahrbahnplatte, Mitte/über Steg):	25/55 cm

Tabelle 4.1: Kenndaten Steinachtalbrücke

Da bei der zweiten Messfahrt keine Messungen möglich waren und bei der ersten Messfahrt nur für einen recht kurzen Zeitraum gemessen werden konnte, konzentriere ich mich in der Auswertung auf die dritte Messfahrt. Diese hat überdies den Vorteil, dass der letzte Verschub über 40 statt über 24 Meter ging, sodass mehr Messmöglichkeiten bestanden. Wie man Tabelle 4.3 entnehmen kann, wurden je 9 Messungen mit variierenden zeitlichen Abständen durchgeführt.

Als Problem erwies sich im Nachhinein, dass die Verschubpläne offenbar kurzfristig geändert wurden. Beim letzten Verschub herrschte für die Baufirma kein Zeitdruck, da kein weiterer Taktplan erfüllt werden musste, so dass der Verschub langsamer durchgeführt wurde. Mutmaßlich wurde der Verschub sogar zu irgendeinem Zeitpunkt unterbrochen. Bei einem Verschubtempo von ca. 50 cm pro Minute hätten die 40 Meter in knapp drei Stunden verschoben sein müssen. Tatsächlich dauerte der Verschub aber fast vier Stunden. Da uns dieses Problem erst im Nachhinein auffiel und der präzise zeitliche Ablauf nicht protokolliert worden war, konnte die Lage der Brücke bei unseren Messungen nur geschätzt werden.

Eingeschobener Takt	Alter des Betons	Qualität der Messung	Bemerkungen
Takt 7	17 / 24 Tage	Mäßig	Ausfall der Messinstrumente durch Tauwasser nach 1 Stunde
Takt 9	31 / 38 Tage	keine Messung	sofortiger Ausfall der Messinstrumente durch Regen
Takt 11	45 / 52 Tage	Gut	niedrigere Leistung der Vibrationsquelle wegen Betrieb mit Generatorstrom, längere Schubstrecke.

Tabelle 4.2: Übersicht über die drei durchgeführten Messfahrten

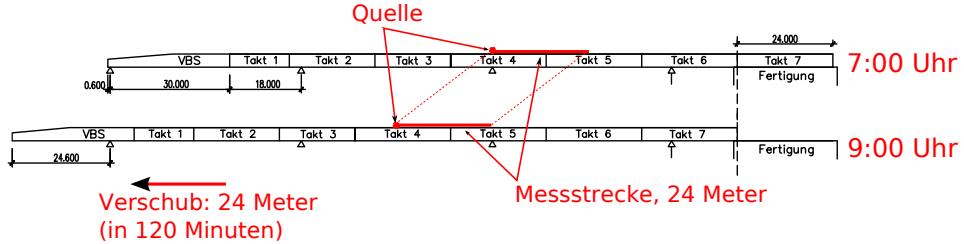


Abbildung 4.2: Skizze des Verschubes der Steinachtalbrücke mit der Messstrecke (Situation bei der ersten Messfahrt). Die Lage der Pfeiler ist durch die kleinen Dreiecke gekennzeichnet.

4.2 Messungen

4.2.1 Hammerschlagseismik

4.2.1.1 Methode

Nummer der Messung	Uhrzeit	Abstand zur vorherigen Messung (in Minuten)
Messung 1:	8:54	-
Messung 2:	9:13	19:07
Messung 3:	9:30	17:10
Messung 4:	10:01:29	30:43
Messung 5:	10:27:38	26:09
Messung 6:	11:11:56	44:18
Messung 7:	11:28:29	16:33
Messung 8:	11:52:28	23:59
Messung 9:	12:21:02	28:34

Tabelle 4.3: Übersicht über die einzelnen Hammerschlagmessungen

Die nächstliegende Messmethode ist die Hammerschlagseismik. Wie sich bei den Testmessungen auf der Elsterbrücke gezeigt hatte, ist die Anbringung der Vibrationsquelle nicht fest genug, um das gleiche Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erreichen wie es mit der Hammerschlagmethode möglich ist. Bei der dritten Messfahrt, auf deren Darstellung ich mich hier beschränke, wurden insgesamt neun Messungen durchgeführt. Eine Übersicht bietet Tabelle 4.3.

Die Problematik der Zuordnung von Messzeiten und Verschubstatus ist im vorherigen Abschnitt bereits angesprochen, in Ermangelung besserer Informationen werde ich im Folgenden davon ausgehen, dass der Verschub kontinuierlich abgelaufen sei. Unsere Messungen wurden mit dem bereits bekannten 5 kg-Hammer und einer Aluminiumplatte durchgeführt, die für diesen Zweck in der Verlängerung der Geophonmessstrecke möglichst nahe an die Vibrationsquelle gelegt wurde (Siehe Abbil-

4 Messungen an Steinachtalbrücke

dung 4.3). Zur Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses wurden bei jeder Messung fünf einzelne Hammerschläge durchgeführt und bereits im Gerät (also vor Durchführung eventueller Filterungen) gestapelt. Die Seismogramme wurden direkt nach der Messung auf dem Auswertungscomputer schnell geprüft, um z.B. durch unsaubere Schläge entstandene schlechte Quellsignale zu erkennen und die Messung wiederholen zu können.

Abbildung 4.3 zeigt die Seismogramme einer Hammerschlagmessung. Dabei ist direkt zu erkennen, dass einige der Geophone offenbar schlecht angebracht waren (siehe Tabelle 4.2.1.1).

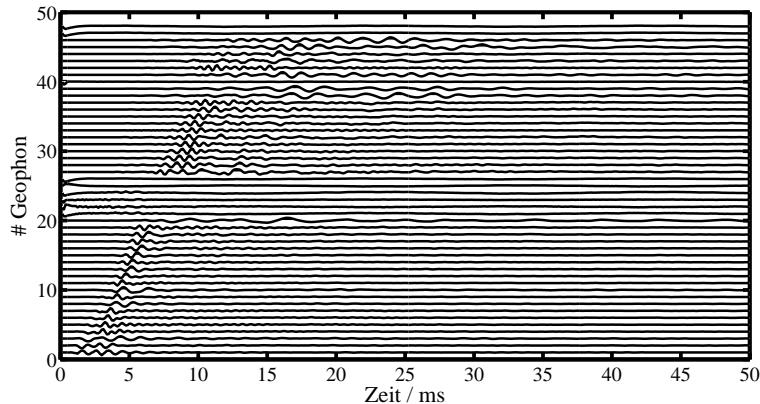


Abbildung 4.3: Darstellung aller Seismogramme einer Hammerschlagmessung an der Steinachtalbrücke

Gephon	Status
1 bis 5	schlechte Anbringung
6 bis 19	in Ordnung
20 bis 26	schlechte Anbringung (Pfütze)
27 bis 37	in Ordnung
38 bis 41	kein Signal
42	in Ordnung
43 bis 48	schlechte Anbringung

Tabelle 4.4: Übersicht über den Status der Geophone auf der Steinachtalbrücke

Da für die entfernteren Geophone das S/R-Verhältnis sowieso zu schlecht wurde, habe ich mich weiterhin dafür entschieden, die Auswertung auf die erste Gruppe intakter Geophone von Nummer 6 bis Nummer 19 zu beschränken. Damit standen 14 Messungen zur Verfügung. Die Seismogramme dieser 14 Geophone sind in Abbildung 4.4 zu sehen. Bei der rechten Grafik wurde ein Automatic Gain Control mit einer Fensterlänge von 2,5 Millisekunden durchgeführt, um die Coda besser untersuchen zu können. Im Gegensatz zu den Messungen in der Bodenplatte der

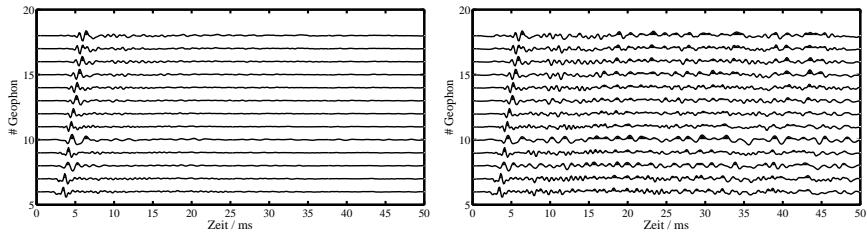


Abbildung 4.4: Darstellung der ausgewählten Seismogramme einer Hammerschlagmessung. Fünffache Stapelung, Hochpassfilter bei 1 kHz. Für die rechte Darstellung wurde die Coda verstärkt (AGC mit Zeitfenster 2,5 ms).

Elsterbrücke sind hier keine reflektierten Wellenzüge zu erkennen, die die Struktur durchlaufen. Dies ist aber nicht unplausibel, wenn man bedenkt, dass nun in der Fahrbahnplatte gemessen wurde, die erheblich breiter ist als die Bodenplatte, so dass das System nicht mehr quasi-eindimensional betrachtet werden kann. Damit haben einfache Wellenzüge, die entlang der Fahrbahnachse vor- bzw. zurücklaufen, relativ weniger Energie und sind somit schlechter zu erkennen.

Die Geschwindigkeit der primären Schallwelle konnte aus dem Ersteinsatz mit ungefähr $2300 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ bestimmt werden. Sie ist damit vergleichbar mit der in der Elsterbrücke gemessenen.

Von Interesse ist nun weiterhin, ob die Wellenform zweier Messungen vergleichbar ist. Dazu sind zwei Ausschnitte aus Seismogrammen in Abbildung 4.5 abgebildet, dargestellt sind die Messungen 1 und 4. Die Form der frühen Coda ist nahezu gleich, aber auch in der Coda bei 90 ms sind ähnliche Formen zu erkennen. Diese 90 ms entsprechen immerhin einem Wellenweg von ungefähr 200 Metern.

4.2.1.2 Codawelleninterferometrie

Hauptziel der Messung war aber natürlich die Nutzung der Codawelleninterferometrie um Laufzeit- und damit Geschwindigkeitsänderungen in der Brücke zu detektieren. Dazu wurde folgendes Schema angewandt: Das Hochsampeln der Messungen auf 80 kHz verfolgte den Zweck, die geringen Streckungen im dritten Schritt überhaupt sichtbar zu machen. Bei einer Fensterlänge von 8000 Samples hätte eine Streckung um den Faktor 10^{-5} eine maximale Verschiebung um gerade einmal 0,08 Samples bedeutet. Durch das Hochsampeln wurde dem abgeholfen.

Die Fensterauswahl traf ich rein empirisch. Dazu wurden die Laufzeitänderungen aller Geophone (siehe Abbildung 4.6) in eine Grafik gedruckt mit den Ergebnissen anderer Zeitfenster verglichen, um zu sehen, ob diese Änderungen erhebliche Auswirkungen auf die dargestellten Laufzeitänderungen hatte. Dabei stellte ich fest, dass ein Zeitfenster zwischen 100 und 200 ms die stabilsten Resultate lieferte.

Ergebnisse für dieses Fenster sind in Abbildung 4.7 zu sehen.

Beim Betrachten dieser Daten fällt eine tendenzielle Geschwindigkeitszunahme

4 Messungen an Steinachtalbrücke

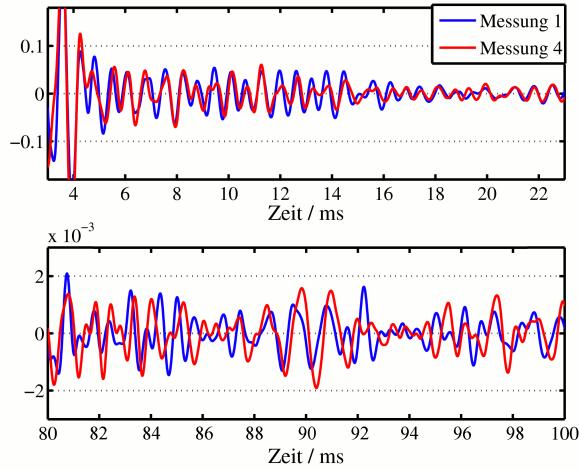


Abbildung 4.5: Ausschnitte aus Seismogrammen zweier Hammerschlagmessungen.
Fünffache Stapelung, Hochpassfilter 1 kHz.

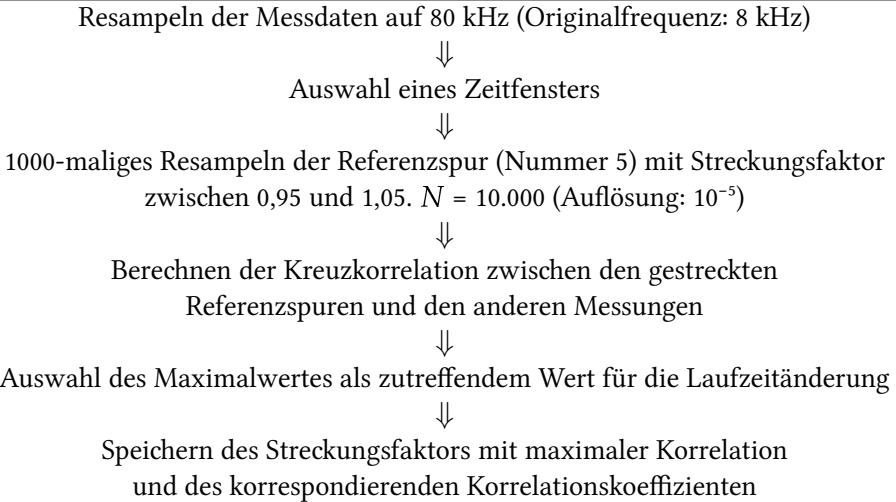


Tabelle 4.5: Algorithmus zur Berechnung der Streckkorrelation bei den Messungen auf der Steinachtalbrücke

im Laufe der Messung auf. Diese ist im Rahmen der vorhergesagten Spannungswerte aber nur teilweise zu erwarten. Wäre die Brücke nach dem vorher festgelegten Plan geschoben worden, hätte die Fahrbahnplatte zu Beginn am Messort in einem Zustand relativ geringer Spannung (und damit niedriger Geschwindigkeit) sein müssen, die Spannung hätte ca. bis zur dritten Messung weiter abnehmen (bis sich die Messstrecke genau über dem Pfeiler befände), dann schnell zunehmen und auf einem hohen Niveau verbleiben sollen. Abbildung 4.8 zeigt die integrierte Spannungsänderung von der Quelle bis zum Messort der jeweiligen Geophone.

Dazu wurde die mittlere Spannungsänderung zwischen Quelle und Geophon für 9 äquidistante Zeitpunkte während des Verschubes berechnet und von dem Wert der Messung 5 als Referenzwert abgezogen. Diese einfache Kalkulation berücksichtigt noch nicht unseren nicht gleichmäßigen Messrythmus (siehe Tabelle 4.3) und eventuelle Abweichungen des Verschubes vom Plan. Außerdem berücksichtigt sie nicht den Einfluss von Wellen, die Bereiche durchlaufen, die nicht im Abschnitt zwischen Quelle und Empfänger liegen, sondern z.B. an einem hinter dem Empfänger befindlichen Bereich reflektiert werden.

Zur Berücksichtigung dieser wurde eine Finite-Differenzen-Simulation der Wellenausbreitung in dem Brückenkasten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 4.3, Seite 51ff dargestellt.

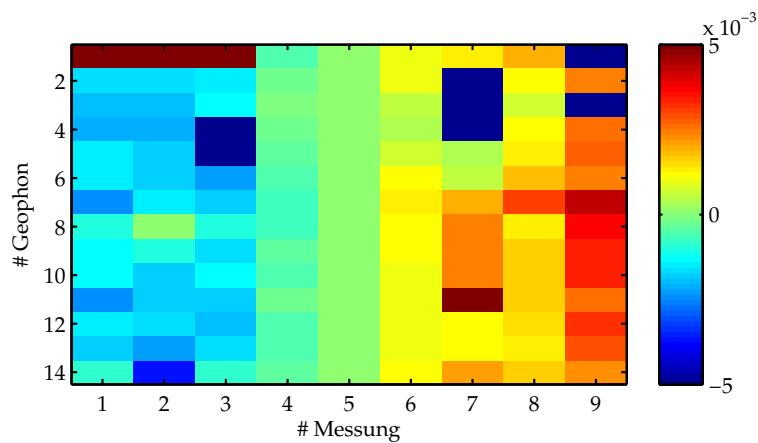


Abbildung 4.6: Laufzeitveränderungen an allen Geophonen für alle Messungen.
Zeitfenster 200 bis 700 ms, ungünstiges Zeitfenster wegen großer Streuung der Werte

4.2.2 Vibrationsseismik

4.2.2.1 Methode

Für die Vibrationsquelle waren mir vier Arten von Messungen vorgesehen (siehe Tabelle 4.6): Die Sweeps sollten den gesamten Frequenzbereich von 10 bis 2000 Hz abdecken, der durch die Vibrationsquelle erzeugt werden konnte. Durch die Aufteilung in mehrere Einzelmessungen sollten einige Nachteile umgangen werden.

1. Die verwendete Summit-Auswertungshardware konnte maximal 16384 Samples aufzeichnen. Die Länge einer Messung und die Samplerate konnten also nicht gleichzeitig erhöht werden.
2. Die höchste im Quellsignal vorkommende Frequenz sollte gleichzeitig möglichst deutlich unter der Nyquistfrequenz f_{Nyq} liegen. Diese ist die höchstmögliche Frequenz, die in einem Signal vorkommen kann, das mit der Samplerate

4 Messungen an Steinachtalbrücke

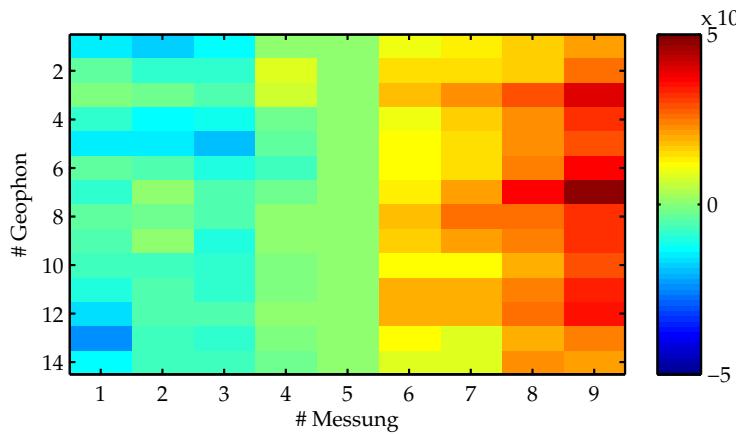


Abbildung 4.7: Laufzeitveränderungen an allen Geophonen für alle Messungen.
Zeitfenster 100 bis 200 ms

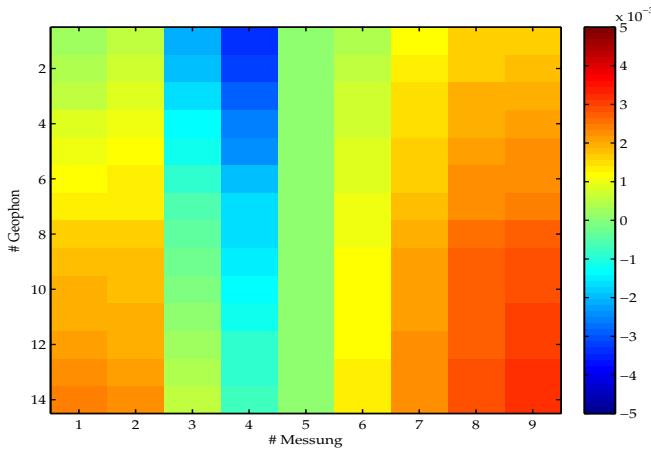


Abbildung 4.8: Integrierte Spannungsänderungen zwischen Quelle und Geophonen

f_s aufgezeichnet wurde. Dabei gilt: $f_{\text{Nyq}} = \frac{1}{2}f_s$. Um hier auf der sicheren Seite zu sein, entschied ich mich, die Samplerate mindestens viermal so hoch wie die höchste Frequenz im Quellsignal zu wählen.

3. Der Sweep sollte möglichst lang sein, um viel Energie in das System zu übertragen.

Durch die Aufteilung auf mehrere Frequenzbereiche konnte der Sweep jeweils so lang wie möglich gestaltet werden, ohne die Samplerate zu gering werden zu lassen.

Es war geplant, diese vier Vibrationsmessungen und die Hammerschlagmessung jeweils der Reihe nach durchzuführen und dabei je fünf Einzelmessungen zu stapeln.

4.2.2.2 Durchführung

Vor Ort ergab sich ein Problem, das die Messungen erheblich erschwerte: Die Versorgung mit Baustellenstrom war nicht mehr möglich, da der Bereich der Brücke, auf dem sich die Messstrecke befand, bereits zu weit von dem Widerlager entfernt war, an dem sich die Infrastruktur der Baustelle befand. Daher mussten wir auf den mitgebrachten Dieselpgenerator zurückgreifen. Dessen Leistung war mit 500 Watt aber deutlich zu niedrig, um die Quelle mit voller Leistung zu betreiben. Hinzu kam, dass beim Transport die Elektronik zur Übertragung des Triggersignals von der Soundkarte zum Summitsystem beschädigt wurde. Da uns vor Ort kein Lötkolben zur Verfügung stand (vom Strom, um diesen zu betreiben, abgesehen), versuchten wir „von Hand“ den Beginn des Vibrationssignals und der Aufzeichnung möglichst gut zu koordinieren. Ein automatisches Stapeln der Messungen war damit aber natürlich unmöglich.

Um trotzdem mit den Ergebnisse arbeiten zu können, versuchte ich, eine Stapelung anhand der Signale selbst vorzunehmen. Dazu berechnete ich die Kreuzkorrelation zwischen zwei Einzelmessungen aus demselben Messvorgang. Bei guten Signal-zu-Rausch-Verhältnis hätte diese Kreuzkorrelation ein eindeutiges Maximum haben müssen, anhand dessen man den zeitlichen Verzug zwischen den Messungen hätte bestimmen können. Auf diese Weise wäre eine nachträgliche Stapelung durchführbar gewesen. Es zeigte sich aber, dass die Kreuzkorrelationsfunktion für alle Messprogramme außer dem hochfrequenten Sweep keine eindeutigen Maxima, sondern mehrere hatte (was nicht überrascht, wenn man sich vor Augen führt, dass das Ausgangssignal ein Sweep war.) und die Lage dieser durch das starke Rauschen auf den Signalen nicht exakt zu erkennen war.

Auf eine weitere Auswertung der genannten Messprogramme wurde also verzichtet.

4.2.2.3 Auswertung

Das geringfügig bessere hochfrequente Sweepsignal stapelte ich auf die genannte Art und Weise und führte anschließend eine Dekonvolution mit dem Quellsignal durch. Die daraus erhaltenen Seismogramme sind in Abbildung 4.9 zu sehen. Auf diesen ist keine direkte Wellenfront zu erkennen, insbesondere scheinen einige Spuren einen Zeitversatz von wenigen Millisekunden aufzuweisen.

Beschreibung	Frequenzbereich	Länge	Taperung	mögliche Samplerate
Sweep	10 bis 200 Hz	16 s	200 ms	1 kHz
Sweep	0,2 bis 1 kHz	2 s	10 ms	8 kHz
Sweep	1 bis 2 kHz	2 s	10 ms	8 kHz
Rauschen	1 bis 2 kHz	2 s	10 ms	8 kHz

Tabelle 4.6: Messprogramm Vibrationsseismik auf der Steinachtalbrücke

4 Messungen an Steinachtalbrücke

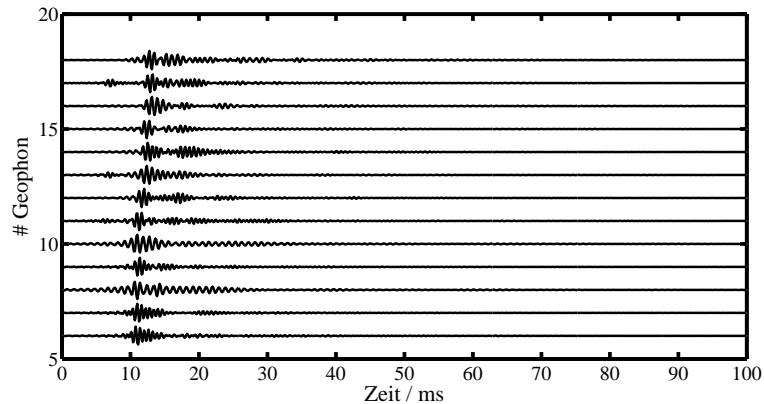


Abbildung 4.9: Seismogramme für Geophone 6-18, erhalten aus vibrationsseismischer Messung mit Sweep (1000 bis 2000 Hz).

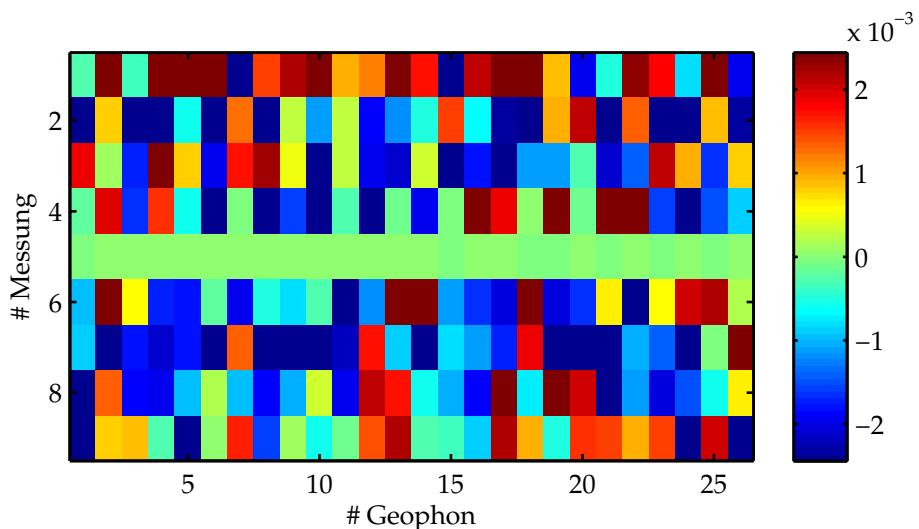


Abbildung 4.10: Laufzeitänderungen während der Messungen, bestimmt aus Vibrationsseismik mit Sweep von 1000 bis 2000 Hz.

4.2.2.4 Codawelleninterferometrie

Aus diesem Signal wurde mithilfe der Codawelleninterferometrie ein Laufzeitänderungsbild erstellt (Abbildung 4.10), das aber nicht mit den aus der Hammerschlagseismik erzielten vergleichbar ist.

4.2.3 Ultraschall

4.2.3.1 Motivation

Die klassischen seismischen Messungen, sowohl mit Hammerschlag als auch mit der Vibrationsquelle haben nur eine geringe räumliche Auflösung. Zum einen beträgt der Abstand zwischen Quelle und Empfänger mehrere Meter, zum anderen werden Wellen mit Frequenzen um ein Kilohertz nur an den Kanten des Hohlkastens gestreut, sodass die Codawellen Laufwege durch die gesamte Brücke gehabt haben können. Daher enthalten sie auch Informationen über Geschwindigkeitsänderungen in einem großen Raumbereich. Präzise Aussagen über lokale Veränderungen sind so nur schwer zu treffen.

Hier bieten sich Ultraschallmessungen an. Im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz mit Wellenlängen von wenigen Zentimetern findet Streuung an den Zuschlagsstoffen des Betons statt, die mittlere freie Weglänge ist also stark herabgesetzt. Damit haben auch Wellen mit Laufzeiten, die ein Vielfaches der Laufzeit der direkten Welle betragen, nur einen recht kleinen Raumbereich durchlaufen und dementsprechend enthalten sie auch nur Informationen aus diesem Raumbereich.

Auf diese Weise wollten wir lokale Geschwindigkeitsänderungen in der Fahrbahnplatte bestimmen.



Abbildung 4.11: Ultraschallquelle und -empfänger auf der Steinachtalbrücke.

4.2.3.2 Durchführung

Verwendet wurde ein P-Wellen-Geber mit Mittenfrequenz 250 kHz. Zwölf Zentimeter neben diesem war ein Empfänger gleicher Frequenz angebracht (Abbildung 4.11). Aufgezeichnet wurde das Signal des Empfängers mit einem Analogoszilloskop

4 Messungen an Steinachtalbrücke

Tektronix TDS. Während des Verschubs der Brücke wurden insgesamt 42 Messungen durchgeführt, auf die anschließend ein Streckkorrelationsalgorithmus analog zu Tabelle 5.2 (Seite 63) angewandt wurde.

An dem Seismogramm (Abbildung 4.12) ist zu sehen, dass das Signal zu einem bedeutenden Teil von der Impulsantwort des Geber-/Empfängersystems bestimmt wird und dass diese ein langes Nachschwingen beinhaltet.

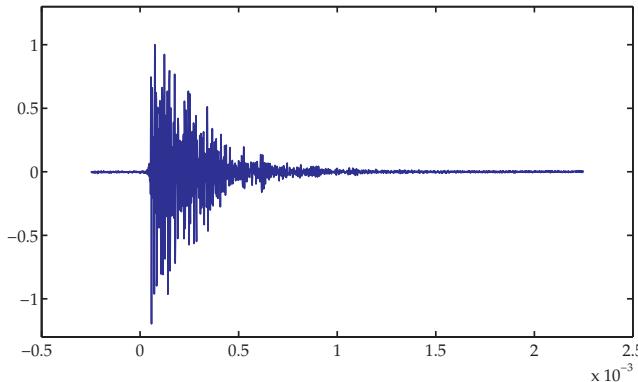


Abbildung 4.12: Seismogramm einer Ultraschallmessung an der Steinachtalbrücke.

4.2.3.3 Ergebnisse

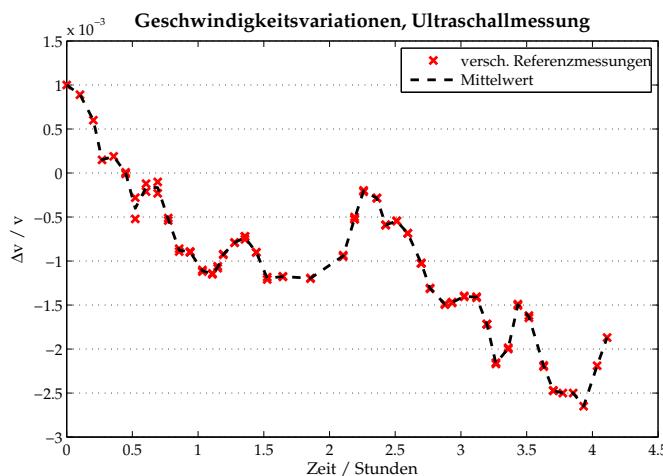


Abbildung 4.13: Aus Ultraschallmessungen bestimmte Geschwindigkeitsänderungen.

Mit dem genannten Verfahren konnte eine Geschwindigkeitsentwicklung bestimmt werden. Diese passt allerdings kaum zu den Vorhersagen. Die Seismo-

grammform mit dem langen Nachschwingen des Gebers lässt befürchten, dass kleine Veränderungen der Eigenfrequenz des Gebers das Ergebnis stark beeinflussen könnten. Diese Änderungen könnten z.B. durch eine Erwärmung des Gebers verursacht werden. Die Ergebnisse dieser Messung stellte ich daher zunächst zurück und untersuchte die Temperaturanfälligkeit des Messsystems im Labor (Abschnitt 5.1.1, Seite 57).

4.3 Theoretische Abschätzung der Laufzeitänderungen

4.3.1 Spannungsmodell

Zur Quantifizierung der während des Verschubs auftretenden Spannungen dienten die Berechnungen, die das planende Ingenieurbüro zum Nachweis der Tragfähigkeit durchgeführt hatte. Diese wurden mit dem Programm SDURCH 5.0 ausgeführt und berücksichtigten nach DIN-Fachberichten 101 und 102 sowie DIN 1045-1¹ das Biegemoment aus dem Eigengewicht und der internen Vorspannung. Zu bedenken ist nun, dass diese Berechnungen nicht einer möglichst exakten Wiedergabe der Spannungsverhältnisse innerhalb eines Brückenkörpers dienen, sondern das Ziel haben, das Überschreiten maximaler Bemessungslasten der verwendeten Baustoffe unter vordefinierten Lastfällen auszuschließen. Diese Lastfälle stellen idealisierte Kombinationen verschiedener Einwirkungen auf das Bauwerk dar. Wenn mehrere Lastfälle kombiniert werden, geschieht dies in der Regel so, dass ungünstigen Überlagerungen der Einzeleinflüsse mehr Beachtung geschenkt wird als einer möglichst exakten Addition dieser Einflüsse². Daher wurde in den Berechnungen für unsere Simulation bewusst eine einfache Situation zugrunde gelegt. Die Berechnungen gingen vom Bauzustand während der dritten Messung (siehe Tabelle 4.2) aus, zusätzlich wurde eine Temperaturdifferenz von +5°C zwischen Ober- und Unterseite des Hohlkastens angenommen, um der Erwärmung der Fahrbahnplatte durch die aufgehende Sonne Rechnung zu tragen. Nun wurden neun Zustände während des Verschubs definiert und berechnet.

Als Ergebnis der Rechnung wurde von SDURCH an 12 Achsen im Abstand von jeweils 2,40 Meter die Horizontalspannung in Richtung der Brückenachse ausgegeben und zwar getrennt für die Fahrbahn- und die Bodenplatte. Zwischen diesen Punkten wurde von mir per Spline interpoliert. Die Werte der Horizontalspannung im Steg sind im Farbdiagramm 4.14 zu sehen.

¹DIN (2003b,a, 2008)

²Aus Sicht des Ingenieurs durchaus verständlich: Die Erkenntnis, dass der Einfluss einer hohen Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der Brücke in Zusammenwirkung mit Windlast die Bemessungsgrenzen überschreiten kann, ist erheblich wichtiger als die Aussicht, dass ein starker Wind helfen könnte, die Temperaturspannungen auszugleichen.

4.3.2 FD-Simulation der Wellenausbreitung

Um die Messwerte mit den theoretischen Vorhersagen vergleichen zu können, wären verschiedene Wege denkbar. Unter Annahme einer diffusiven Wellenausbreitung hätte ein Sensitivitätskernel nach Gleichung 2.29 berechnet werden können, um dann zusammen mit dem Spannungsmodell Laufzeitveränderungen für verschiedene Sender-Empfänger-Konfigurationen zu berechnen. Ich entschied mich dafür, mittels einer Finite-Differenzen-Simulation synthetische Seismogramme zu erzeugen, auf die ich dann den gleichen Auswertungsalgorithmus anwandte wie auf die real gemessenen Geophonspuren.

Um trotz der recht komplexen Geometrie des Brückenkörpers zu akzeptablen Ergebnissen und Rechenzeiten zu kommen, verwendete die Berechnung nur eine akustische Wellengleichung:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \nabla(\nabla u) = \frac{1}{v^2} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \quad (4.1)$$

Die Zeitableitung wurde in Differenzen erster Ordnung aufgelöst (k ist der verwendete Zeitschritt)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{u(t-k) - 2u(t) + u(t+k)}{2k^2} + \mathcal{O}(h^2), \quad (4.2)$$

die Ortsableitungen wurden durch Differenzen zweiter Ordnung ausgedrückt (mit Gitterpunktabstand h)

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = \frac{16u(x+h) + 16u(x-h) - u(x+2h) - u(x-2h) - 30u(x)}{12h^2} + \mathcal{O}(h^4). \quad (4.3)$$

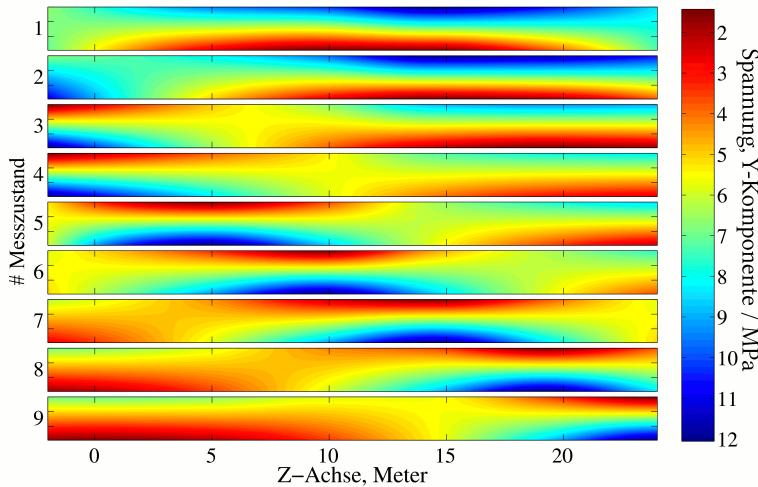


Abbildung 4.14: Y-Komponente der Spannung im Hohlkasten. Dargestellt ist ein Längsschnitt durch den Steg des Hohlkastens.

4.3 Theoretische Abschätzung der Laufzeitänderungen

Die Herleitung dieser Darstellungen ist in vielen Rechenbüchern und der Vollständigkeit halber im Anhang zu finden.

Die Simulation verwendete einen Gitterpunktstand von 1 cm und einen Zeitschritt von 10 μs . Die Geometrie des Kastens wurde erzeugt, indem der Regelquerschnitt als Grundfläche eines Prismas angenommen wurde. Damit wird zwar die Bogenform der Brücke vernachlässigt, die numerische Behandlung des Problems aber erheblich erleichtert. Der Kasten wurde auf eine Länge von 40 Metern ausgelegt, mit der Quelle an einem Ende. Das andere Ende wurde nichtreflektierend modelliert, indem ein Dämpfungsterm eingebaut wurde, der auf einer Strecke von fünf Metern von Null an exponentiell anwuchs. Die an die Luft grenzenden Ränder des Hohlkastens wurden als lose Ränder (konstante erste Zeitableitung) implementiert. Als Quelle wurde eine Kuepperquelle der Art

$$s(t) = \begin{cases} 2f_0 (\sin(2\pi t f_0) - 0,5 \sin(4\pi t f_0)) & \text{für } t \leq \frac{1}{f_0} \\ 0 & \text{für } t > \frac{1}{f_0} \end{cases}$$

mit Zentraffrequenz $f_0 = 1000\text{Hz}$ verwendet. Die Schallgeschwindigkeit wurde auf $2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gesetzt, die Geschwindigkeitsänderungen durch die variable Spannung wurden mit $1 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ geschätzt³

4.3.3 Erzeugte Seismogramme

Aus dieser Simulation wurden anschließend synthetische Seismogramme erstellt, indem die Werte u an verschiedenen Orten gespeichert wurden (siehe Abbildung 4.15). Auf diese kann man anschließend denselben Algorithmus wie auf die realen Seismogramme anwenden. In Abbildung 4.16 sind für ein Geophon in sieben Meter Abstand zur Quelle die Laufzeitänderungen eines Geophons aus der Hammerschlagmessung, mit denen aus einem synthetischen Seismogramm am gleichen Ort verglichen. Wie zu sehen ist, ist die Übereinstimmung für einzelne Geophone durchaus recht gut.

³Nach *Larose & Hall* (2009). Dieser Wert von $1 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ entspricht ungefähr den Werten, die bei den Messungen an einem Probewürfel aus dem Beton der Fahrbahnplatte ermittelt wurden (Siehe Abschnitt 5.2.3.3, Seite 66). Eine genauere Simulation sollte die unterschiedlichen Geschwindigkeitsempfindlichkeiten für verschiedene Polarisationen und Ausbreitungsrichtungen berücksichtigen, dazu müsste aber ein elastisches Modell und kein akustisches verwendet werden.

4 Messungen an Steinachtalbrücke

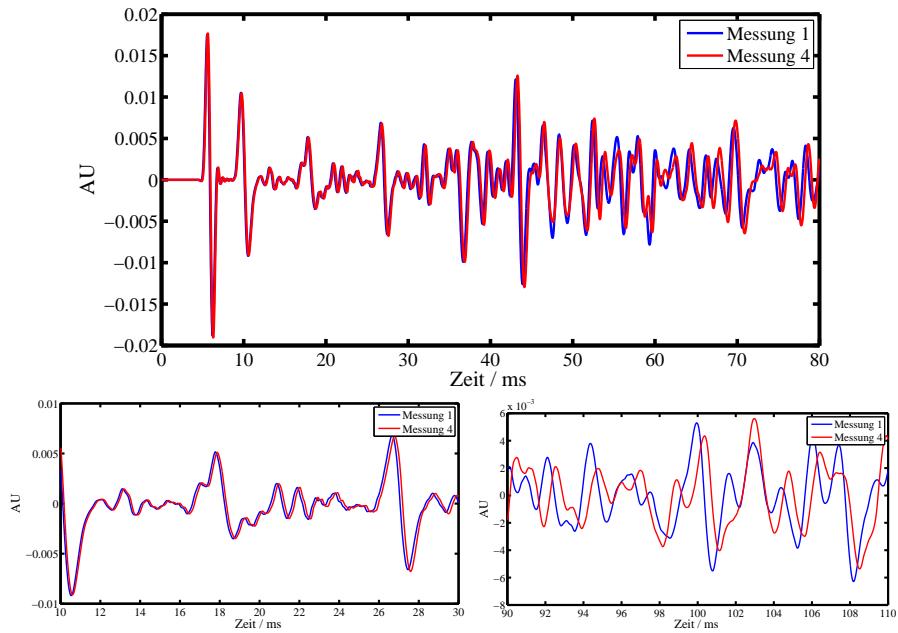


Abbildung 4.15: Zwei synthetische Seismogramme aus der FD-Simulation. Berechnet sind Zeitpunkte 1 und 4 aus der Abb. 4.14.

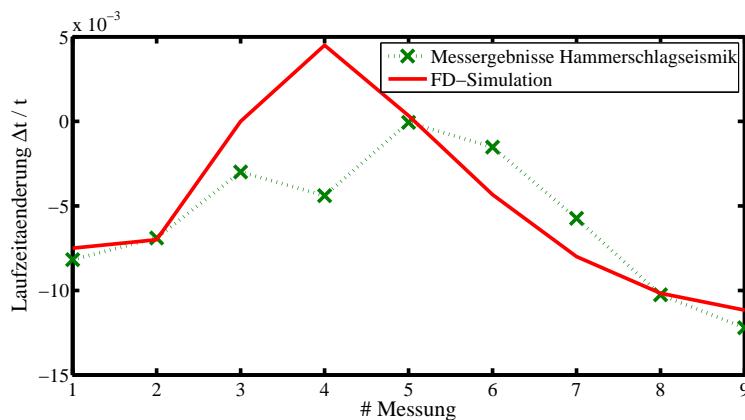


Abbildung 4.16: Vergleich der Laufzeitänderungen aus Hammerschlagmessungen und FD-Simulation für ein ausgewähltes Geophon

4.4 Auswertung und Ergebnisse

Die Messungen auf der Steinachtalbrücke zeigten in erster Linie die Schwierigkeiten bei der Übertragung einer Labormessung ins Feld. Zwei von drei Messfahrten waren ganz erfolglos und von den drei geplanten Messkonzepten versagten wiederum zwei.

Aber auch diese „gescheiterten“ Messungen brachten Erkenntnisse ein:

- Die Vibrationsseismik mit dem Inertialerreger als Quelle funktioniert prinzipiell auf einer Betonbrücke, das haben die Messungen an der Elsterbrücke gezeigt. Bei der Planung weiterer Versuche sollte aber die Anbringung noch mal überdacht werden, auch muss der erhebliche Strombedarf des Gesamtsystems berücksichtigt werden.
- Die verwendete Generation des SUMMIT-compact-System hat Einschränkungen, die die Vibrationsseismik weiter erschweren. Dazu gehört vor allem die Beschränkung der Signallänge.
- Die Ultraschallmessungen scheiterten letztenendes daran, dass ein im Labor bewährtes Messsystem nicht für den Außeneinsatz geeignet sein muss. Abhilfe könnte hier bereits eine Temperaturabschirmung schaffen. Langfristig wäre es natürlich noch besser, einen Signalgeber mit bekannter Impulsantwort zu verwenden.
- Außer der Ultraschallapparatur waren auch die Aufzeichnungscomputer für das SUMMIT-System nicht feldtauglich. Dieses Problem wurde beim dritten Messeinsatz durch Abdecken aller Geräte (siehe Abbildung A.5, im Anhang, Seite 79) umgangen.

Erfreulicherweise ließen sich aber aus den Hammerschlagmessungen Ergebnisse gewinnen, die in guter Übereinstimmung mit den zu erwartenden Werten stehen. Die vorhandenen Abweichungen zu den Vorhersagen lassen sich teilweise durch die Lücken des diesen zugrundeliegenden Modells erklären.

Ein nächstes Ziel könnte eine systematischer Vergleich von gemessenen und berechneten Daten sein, beispielsweise von mehr als einer Geophonspur. Dies würde es auch ermöglichen, statistisch die Signifikanz der Übereinstimmungen einzuschätzen.

4 Messungen an Steinachtalbrücke

5 Labormessungen

5.1 Überprüfung der Stabilität unserer Ultraschallapparatur

5.1.1 Experiment Temperaturabhängigkeit

Die Ergebnisse der Ultraschallmessung auf der Steinachtalbrücke passen sehr schlecht zu den Vorhersagen. Daher überprüfte ich im Labor die Stabilität der Messapparatur gegenüber Temperaturveränderungen. Die Messbedingungen auf der Brücke waren in etwa folgende: Während der Nacht herrschten Temperaturen knapp unter dem Gefrierpunkt, beim Messbeginn befand sich immer noch Reif auf den Zeltaußenflächen. Im Laufe des Versuchs erhöhte sich die Temperatur dann deutlich und betrug am Ende ca. 15 °C. Um diese Bedingungen zumindest grob nachzustellen, tauchte ich den Ultraschallgeber für 10 Minuten in Eiswasser, holte ihn dann schnell heraus und nahm eine halbe Stunde lang an einem Betonwürfel Signale auf. Währenddessen maß ich die Temperatur des Schallkopfes. Dies geschah mit einem elektrischen Thermometer notwendigerweise sehr ungenau, es kann jedoch festgehalten werden, dass die Temperatur schnell anstieg und nach ca. 5 Minuten den Wert der Zimmertemperatur (19 °C) erreichte und dann gleich blieb.

Die aufgenommenen Signale wertete ich auf dem gleichen Wege aus wie die auf der Brücke erhaltenen, das heißt, ich berechnete die Streckkorrelation und berechnete aus dieser die Geschwindigkeitsänderung.

Die Messung wurde einmal wiederholt, ihre Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 zu sehen. An die Ergebnisse wurde eine Zerfallsfunktion $Y(t) = Y_0 \cdot \exp(t/t_d)$ angepasst, die unter anderem die zeitliche Temperaturentwicklung eines Körpers im Wärmebad beschreibt und gut zu den Messwerten passt. Der Zerfallsparameter t_d ¹ der beiden Messungen beträgt 145 bzw. 162 Sekunden. Er ist also für beide Messungen ähnlich der gemessenen Aufwärmzeit von ca. 5 Minuten.

Es ist festzuhalten, dass eine Temperaturänderung von ca. 15 °C eine scheinbare Geschwindigkeitsänderung von $15 \cdot 10^{-3}$ erzeugt, die Temperatursensitivität also in der Größenordnung von $10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ liegt. Damit ist der Effekt durch das Wetter auf der Steinachtalbrücke größer als der Spannungseffekt, der ungefähr $8 \cdot 10^{-3}$ beträgt. Da auf der Brücke keine Temperaturen aufgezeichnet wurden, sind die dort getätigten Ultraschallmessungen wertlos.

¹Also die Zeit, nach der die Temperaturdifferenz zum Wärmebad auf das $1/e$ -fache des Ausgangswertes gefallen ist.

5 Labormessungen

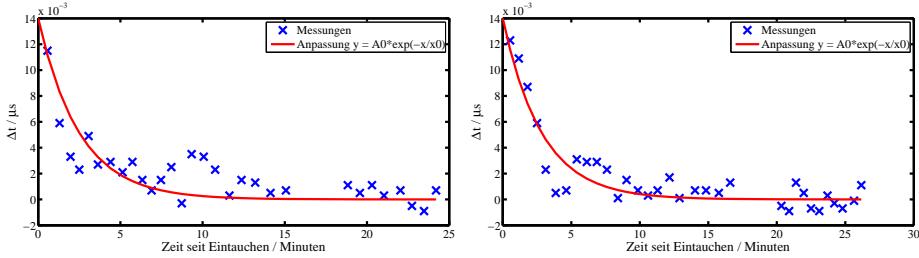


Abbildung 5.1: Messreihen des sich erwärmenden Messkopfes

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

Ein anderes Anwendungsfeld für die Codawelleninterferometrie ist die hochgenaue Messung von Geschwindigkeitsänderungen in einem stark streuenden Medium. Liegen die Wellenlängen der verwendeten elastischen Wellen in der gleichen Größenordnung wie die im Medium vorhandenen Streukörper, ist die durchschnittliche freie Weglänge der Wellen gleich dem durchschnittlichen Abstand zwischen diesen Streukörpern. Diese Situation ist beispielsweise für Ultraschallwellen in Beton gegeben, wo die Wellenausbreitung als auf den Zement beschränkt betrachtet werden kann, mit hohem Impedanzkontrast an den Zuschlagskörnern.

5.2.1 Absicht

In diesem Medium wurde von Larose und anderen *Larose & Hall* (2009) eine Messung durchgeführt, bei der spannungsinduzierte Geschwindigkeitsänderungen in Beton mit einer Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-5}$ detektiert wurden. Diese Messung sollte von mir wiederholt werden und dabei ein besonderes Augenmerk auf folgende Aspekte gelegt werden:

1. Ist die Messung von Geschwindigkeitsänderungen mittels der CWI auf kleine Spannungsänderungen beschränkt? Wie schnell sinkt der Korrelationskoeffizient zwischen zwei Messungen unter ein akzeptables Maß, mit anderen Worten: Wie stark verändert sich die Signalform bei verschiedenen Spannungen?
2. Im Beton sind verschiedene Spannungseffekte zu erwarten (siehe auch Theoriekapitel):
 - Bei geringen Spannungszunahmen steigt die Schallgeschwindigkeit ungefähr linear an. (akustoelastischer Effekt)
 - Nicht vorbelasteter Beton hat eine höhere Schallgeschwindigkeit als einmalig belasteter, auch wenn diese Lasten weit unter der Bruchlast liegen, da feine Risse die Schallgeschwindigkeit irreversibel herabsetzen.

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

- Ab ca. 60% der Bruchlast kommt es im Beton zu makroskopischen Rissen, die die Geschwindigkeit stark und teilweise irreparabel herabsetzen.

Diese Effekte sind alle zu schwach, um anhand des Ersteinsatzes der direkten P-Welle gemessen zu werden. Ist dies mit der CWI möglich und gehen die Geschwindigkeitseffekte mit anderen, wie einer stärkeren Dämpfung einher?

3. Ist die Signalform sehr empfindlich bezüglich der Anbringung der Messköpfe? Sind Messungen, zwischen denen die Messköpfe entfernt und neu angebracht wurden, vergleichbar?
4. Für die Auswertung der an der Brücke erhaltenen Ergebnisse ist es wichtig, die Spannungsempfindlichkeit des dort verwendeten Betons zu kennen, da diese selbst bei ähnlichen Betonarten verschieden sein kann.

5.2.2 Versuchsablauf

5.2.2.1 Verwendete Geräte

Die von der Firma Arlt zur Verfügung gestellten Betonwürfel wurden bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in einer Festigkeitsprüfungspresso Lasten ausgesetzt. Währenddessen wurde abwechselnd mit zwei Ultraschallapparaturen ein Puls in das Medium gegeben und auf der jeweils entgegengesetzten Seite gemessen (siehe Skizze 5.2). Die Messungen fanden dabei immer nur zwischen den gegenüberliegenden Seiten statt, da die Schallgeber/-aufnehmer jeweils aufeinander abgestimmt waren.

Die Messungen mit dem Punktkontakt-Prüfkopf dienten dabei dazu eine herkömmliche P-Wellen-Geschwindigkeitsmessung über den Ersteinsatz im Seismogramm durchzuführen.

5.2.2.2 Pressablauf

Um möglichst viele der im vorherigen Abschnitt erwähnten Effekte messen zu können, wurde das in Skizze 5.3 ersichtliche Messprogramm aufgestellt. Dieses legte folgende Schwerpunkte nahe:

1. Aufnahme der Spannungs-Geschwindigkeitskurve für sehr kleine Spannungsänderungen durch Messungen mit Schrittweite von 500 N. Vergleich dieser Kurve für frischen und vorbelasteten Beton.
2. Belastung bis in den mittleren Bereich (ca. 30% der Bruchlast)
3. Belastung bis in den Bereich der Nennbruchlast (75% der tatsächlichen Bruchlast)

An jedem Punkt wurden mit zwei Geräten nacheinander Spuren aufgenommen. Die Seismogramme des stärkeren Geräts f wurden 5-fach gestapelt, die des zweiten

5 Labormessungen

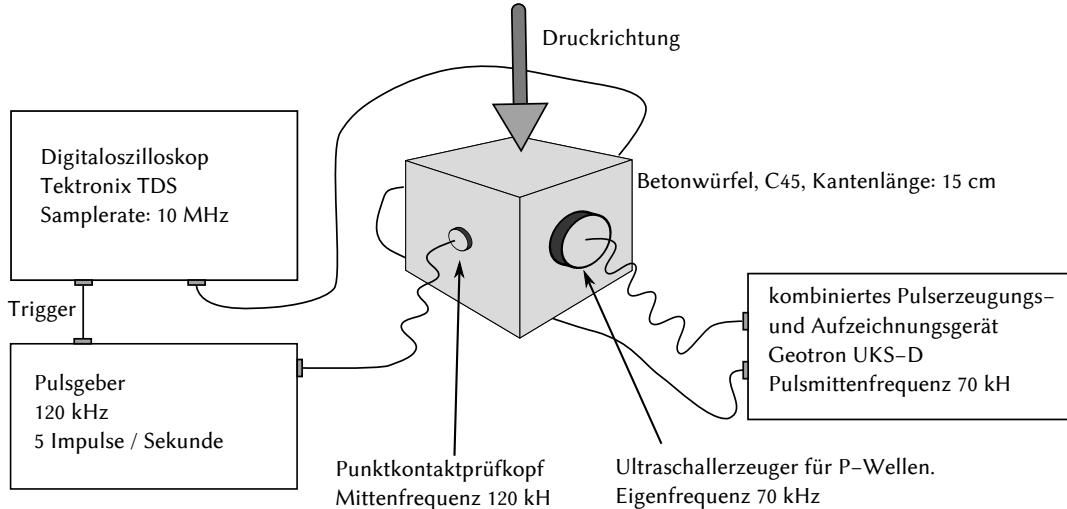


Abbildung 5.2: Versuchsanordnung spannungsinduzierte Geschwindigkeitsvariationen

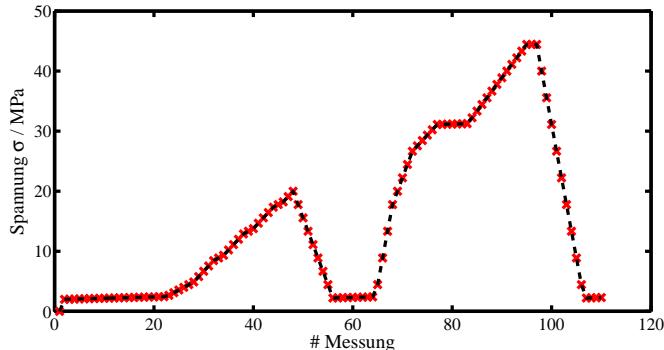


Abbildung 5.3: Messprogramm spannungsinduzierte Geschwindigkeitsvariationen (Würfel 2)

40-fach. Gespeichert wurden die Daten des Punktkontaktprüfkopfes mithilfe eines Digitaloszilloskops, die des anderen mittels dem kombinierten Pulserzeugungs- und Aufzeichnungsgerät UKS-D der Firma Geotron.

5.2.2.3 Auswertung

Vor der Auswertung ist zu bedenken, dass die Geschwindigkeitsänderungen je nach Wellentyp unterschiedlich stark ausfallen werden (siehe Tabelle 2.2 auf Seite 18). Um den Anteil der Wellentypen abzuschätzen, ist es nützlich, sich Gedanken über die möglichen Arten gestreuter Wellen in der Coda unserer Messung zu machen. Nach Grêt et al. (2006) sind vier Typen zu erwarten, die in Abb. 5.4 skizziert sind.

1. Reverbrierende Wellen nach Typ 1 brauchen mindestens die dreifache Zeit des

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

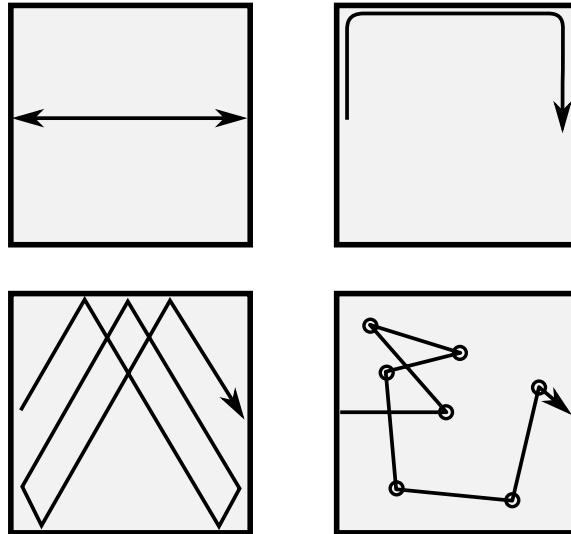


Abbildung 5.4: Skizze der vier möglichen Typen gestreuter Wellen: 1. Zwischen der Quell- und der Empfängerseite reverbrierende Welle 2. Um den Proberkörper laufende Oberflächenwelle 3. Komplex an den Seiten des Körpers reflektierte Welle 4. An Bestandteilen des Betons gestreute Welle

Ersteinsatzes, sollten aber in der gesamten Coda stark vertreten sein, da sich Quelle und Empfänger exakt gegenüberliegen und die Kanten parallel sind. Die Konversionsrate ist bei senkrechtem Einfall auf die Streufläche gleich null, dieser Teil der Coda besteht also aus P-Wellen.

2. Durch die Quelle werden sicher in erheblichem Maße Oberflächenwellen angeregt. Bei herkömmlichen Messungen werden diese auch primär gemessen, da ihre Geschwindigkeit sehr spannungssensitiv ist. Da wir nur einen Empfänger und dazu Signale mit geringer Bandbreite benutzten, sind sie in unserer Messung kaum zu separieren. Hinzu kommt, dass ihre Ausbreitung durch die Würfelform der Probe hochkomplex ist.
3. Darüberhinaus existieren viele weitere Pfade, die eine Streuung an einer der Oberflächen beinhalten. Durch die Würfelform überlagern sich viele dieser Pfade kohärent. Je nach Streuwinkel an der Oberfläche kann die P- zu S-Konversion erheblich sein.
4. In dem höchst heterogenen Medium Beton ist erhebliche Streuung an den einzelnen Bestandteilen, speziell den Zuschlagskörnern (hier Mainkies) infrage. Diese sind nach Herstellungsprotokoll maximal 35 mm im Durchmesser, also ein wenig kleiner als die Wellenlänge des verwendeten Ultraschalls ($4000 \frac{\text{m}}{\text{s}} / 100 \text{ kHz} \approx 40 \text{ mm}$). Da der Konversionsfaktor von P zu S für Streu-

5 Labormessungen

ungen erheblich höher ist als der des umgekehrten Vorgangs², wird dieser Teil der Coda primär aus S-Wellen bestehen, auch wenn der Empfänger für diese weniger empfindlich ist.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass nach dem Ersteinsatz zunächst einfach gestreute Wellen nach Typ 4 ankommen, da diese die geringsten Laufzeiten haben. Ab dem dreifachen der Laufzeit der direkten Welle sind alle Typen vertreten. Dieser Teil der Coda wird dann von den Wellen nach Typ 1 und 3 dominiert, da diese durch koonstruktive Interferenz mehrerer Wellenwege verstärkt werden. Durch die zu erwartende starke Streuung an Bestandteilen des Mediums sind ist diese kohärente Überlagerung aber schnell nicht mehr möglich, sodass Oberflächenwellen und vor allem vielfach gestreute Wellen nach Typ 4 die späte Coda dominieren werden. Dies ist interessant, weil die Spannungssensitivität der einzelnen Wellentypen unterschiedlich ist.

Die Geschwindigkeitsänderungen für S-Wellen hängen von der Polarisationsrichtung ab. Da sie aber trotzdem sehr klein sind und somit im Vergleich zur Laufzeit äußerst geringe Verschiebungen der Phasenankunft erzeugen³, kann angenommen werden, dass die gemessene Geschwindigkeitsänderung der S-Wellen und damit der späten Coda zwischen den Werten der beiden Polarisationsrichtungen liegt. Da die Geschwindigkeitsänderungen der P-Wellen aber um eine Größenordnung unter denen der in Druckrichtung polarisierten S-Wellen liegen, sollte der Vergleich zwischen Geschwindigkeitsänderungen in der frühen und der späten Coda ein signifikant unterschiedliches Ergebnis zeigen.

Das Datenaufnahme- und -verarbeitungsschema ist in Tabelle 5.1, der Algorithmus der Streckkorrelation in Tabelle 5.2. Von Bedeutung ist die Auswahl passender Referenzmessungen für die Streckkorrelation. Wenn die Ähnlichkeit zweier Seismogramme zu gering ist, kann der Algorithmus nicht mehr zuverlässig angewandt werden. Daher setzte ich einen Schwellenwert des Streckkorrelationskoeffizienten bei dessen Unterschreitung die letzte gültige Messung als neue Referenzmessung verwendet wurde.

²Nach *Sato & Fehler* (1998), S. 223 ist das Verhältnis der Konversionsrate von zu S zu P g^{SP} zu der von P nach S g^{PS} : $\frac{g^{PS}}{g^{SP}} = 2\gamma^2$, wobei $\gamma = \frac{v_p}{v_s}$ das Verhältnis von P- zu S-Wellengeschwindigkeit ist. Für die übliche Annahme $\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{3}$ ist $\frac{g^{PS}}{g^{SP}} = 6$.

³Insbesondere kann sogar angenommen werden, dass die Laufzeitänderungen kleiner sind als die durchschnittliche Schwingungsdauer im Signal.

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

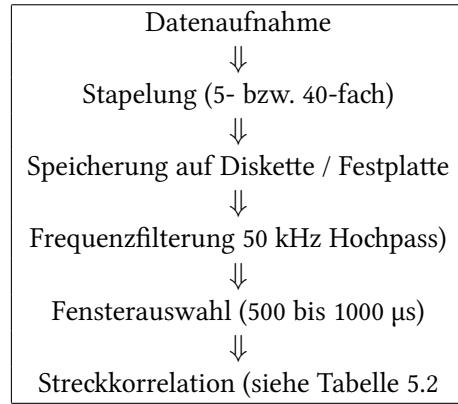


Tabelle 5.1: Schema der Datenverarbeitung der Ultraschallmessungen bei der BAM

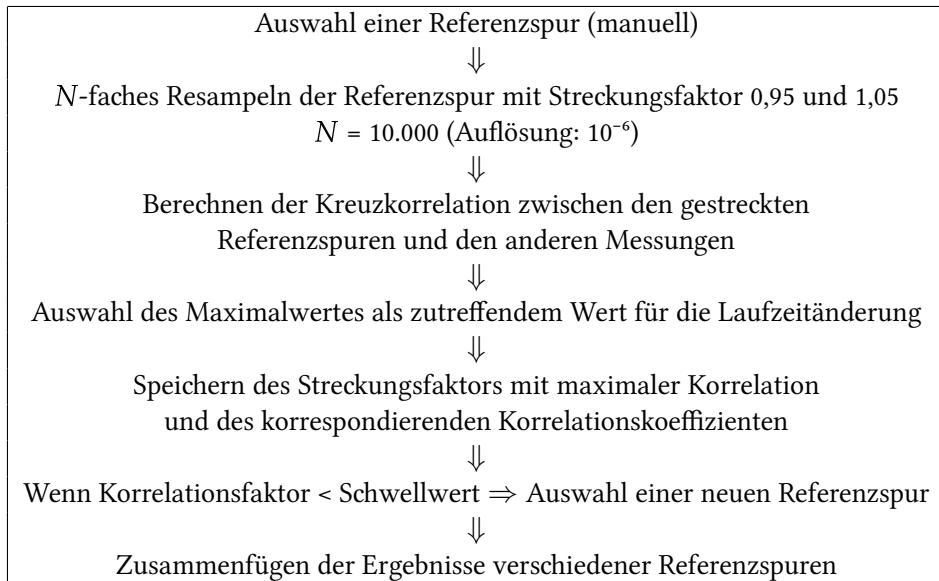


Tabelle 5.2: Algorithmus zur Berechnung der Streckkorrelation bei Ultraschallmessungen

5 Labormessungen

5.2.3 Ergebnisse

5.2.3.1 Seismogramme

Auf der Abbildung 5.5 ist das Spektrum einer typischen Messung am Würfel 1 abgebildet und wird mit dem Rauschspektrum, verglichen, das über eine Messung ohne Ultraschallsignal ermittelt wurde. Gut zu erkennen ist, dass das Rauschen deutlich niederfrequenter ist als die Signale des Schallgebers. Für die weiteren Auswertungen wurde daher ein Hochpassfilter bei 50 kHz mit Seitenfrequenz von 10 kHz angewandt. Das gefilterte Spektrum ist in Abbildung 5.6 zu sehen. Die Verbesserung der Signalform ist auf Graph ?? deutlich zu erkennen.

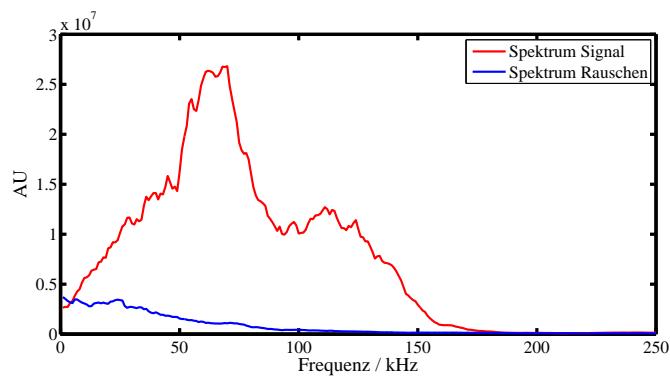


Abbildung 5.5: Vergleich des Spektrums von Rauschen und Signal

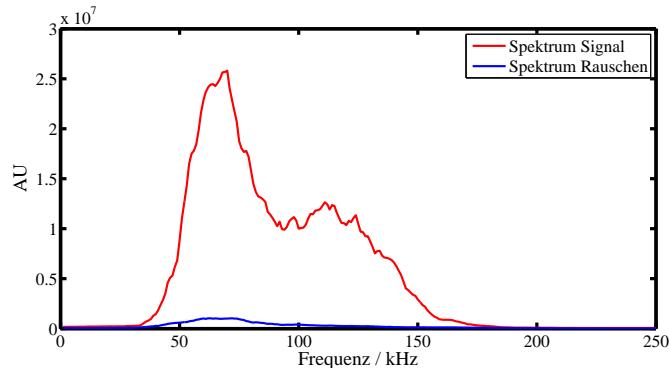


Abbildung 5.6: Vergleich des Spektrums von Rauschen und Signal nach Anwendung eines 50 kHz Hochpassfilters

5.2.3.2 Vergleich mit Diffusionsgleichung

Für den Fall, dass Streuung nach Typ 4 (siehe Abb. 5.4 stattfindet, wird die freie Weglänge erheblich kleiner als die Würfelgeometrie. Der durchschnittliche Abstand zwischen den Zuschlagskörnern beträgt ca. 50 mm. Die Wellenausbreitung bei sehr kleinen freien Weglängen lässt sich nach *Dainty & Toksoz* (1977) durch die Diffusionsgleichung zu beschreiben, womit die Energiedichte an einem beliebigen Ort \vec{r} zu einem Zeitpunkt $t \gg 0$ innerhalb des Mediums $P_{\text{diff}}(\vec{r}, t)$ in erster Näherung durch die bekannte Lösung (Gleichung 5.1) ausgedrückt werden kann⁴.

$$P_{\text{diff}}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\left(\frac{4}{3}\pi c l_{\text{mfp}} t\right)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{\frac{4}{3}c l_{\text{mfp}}} - \frac{ct}{l_A}\right) \quad (5.1)$$

Darin ist l_{mfp} die mittlere freie Weglänge für elastische Streuung und l_A die mittlere Absorptionslänge.

Um die freie Weglänge unserer Messung abschätzen zu können, versuchte ich also, Gleichung 5.1 an ein Seismogramm anzupassen. Dabei wurde als gemessene Energiedichte das Quadrat der berechneten Einhüllenden verwendet⁵. Um das Seismogramm zu glätten und eine Konvergenz des Least-Square-Fits zu erleichtern, wurde zusätzlich der laufende Mittelwert über 10µs verwendet. Das Ergebnis ist in Graph 5.7 abgebildet. Zum Fit wurde Gleichung 5.1 noch leicht angepasst (mit Y_i als Energiewerten zum Zeitpunkt X_i in µs, $r = 0.15\text{m}$ und $c = 4\frac{\text{km}}{\text{s}} = 4 \cdot 10^{-3}\frac{\text{m}}{\mu\text{s}}$ und Skalierungsfaktoren A_0 und A_1 , die dem Ausgleich von Rauschen dienen.):

$$Y_i = A_0 * (4.0E-3 l_{\text{mfp}} X_i)^{(-1.5)} \exp(-0.75 \cdot 0.0225 / (4.0E-3 l_{\text{mfp}} X_i) - 4.0E-3 X_i / l_A) + A_1$$

Die Ergebnisse der Anpassung sind:

l_{mfp}	$[19,5 \pm 0,2] \text{ mm}$
l_A	$[9,8 \pm 1] \text{ m}$
A_0	$[1,35 \pm 0,1] \text{ AU}$
A_1	$[77 \pm 9] \text{ AU}$

Der χ^2 -Wert pro Freiheitsgrad ist dabei 194, mit $R^2 = 0,99976$.

Mit diesem Wert von ca. 20 mm für die freie Weglänge (entsprechend 0,5 Mikrosekunden) und ca. 10 Metern (entsprechend 2,5 Millisekunden) für die Absorptionslänge kann von Streuung an der Substruktur des Messkörpers, also den Zuschlagskörnern ausgegangen werden. Mit den bekannten Konversionraten von P- zu S-Wellen ist es weiterhin plausibel, dass nach wenigen Streuvorgängen und damit nach einigen Mikrosekunden S-Wellen eindeutig überwiegen.

⁴Für die Einschränkungen dieser Lösung siehe *Paasschens* (1997). Sie betreffen insbesondere sehr frühe Zeiten t , zu denen Gleichung 5.1 exponentiell abfällt, aber unrealistischerweise ungleich Null bleibt und das Fehlen eines ballistischen Peaks. Für meinen Fall habe ich diese Einschränkungen umgangen, indem ich die Anpassung erst für Zeiten durchgeführt habe, in denen der ballistische Peak (der überdies nicht sehr stark ausgeprägt ist) bereits am Empfänger vorbeigelaufen ist.

⁵siehe *Buttkus* (2003)

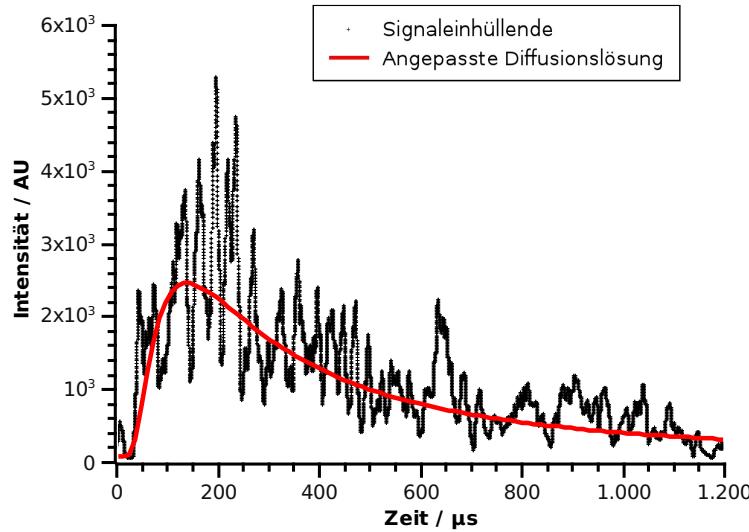


Abbildung 5.7: Energiedichte des Seismogramms (Pressdruck: 50 kN), angepasst durch Gleichung 5.1.

5.2.3.3 Geschwindigkeitsänderungen

Es ist nun an der Zeit, verschiedene Messungen direkt miteinander zu vergleichen. Der Vergleich der Seismogramme zwischen zwei Messungen mit geringfügig unterschiedlicher Spannung ergibt dabei eine fast gleichbleibende Signalform, wie in Grafik 5.8 zu sehen. Damit ist immerhin bewiesen, dass die Streuungen innerhalb des Betons deterministisch sind und für die gleiche Quell-/Empfängerkonfiguration zu identischen Seismogrammen führen. Ebenfalls ist zu erkennen, dass die vorgenommenen Filterungen in der Lage sind, praktisch alle nichtgleichbleibenden Anteile des Signals, also vor allem das Rauschen aus dem Betrieb der Pressanlage, zu entfernen.

Die Signale zweier Messungen unterscheiden sich nur durch einen Streckungsfaktor.

Die Streckkorrelationsfunktion im Zeitfenster 500 bis 1000 μs ist in Abbildung 5.9 und ausschnittsweise in Abbildung 5.10 zu sehen. Aus den Laufzeitunterschieds-Werte maximaler Übereinstimmung lässt sich nach Gleichung 2.27 der relative Geschwindigkeitsunterschied berechnen.

Der Spannungsbereich zwischen 2 und 2,5 MPa ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Beobachtet man einen größeren Ausschnitt, nämlich Spannungen bis ca. 10 MPa (Abbildung 5.12), so fällt auf, dass für den zweiten Würfel die Kurve oberhalb von 5 MPa deutlich abknickt. Dies könnte auf eine Vorbelastung mit ungefähr dieser Spannung hindeuten. Im Rahmen des im Theoriekapitel vorgestellten Modells wären dann bis zu dieser Spannung hauptsächlich bei der ersten Belastung erzeugte Risse geschlossen worden.

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

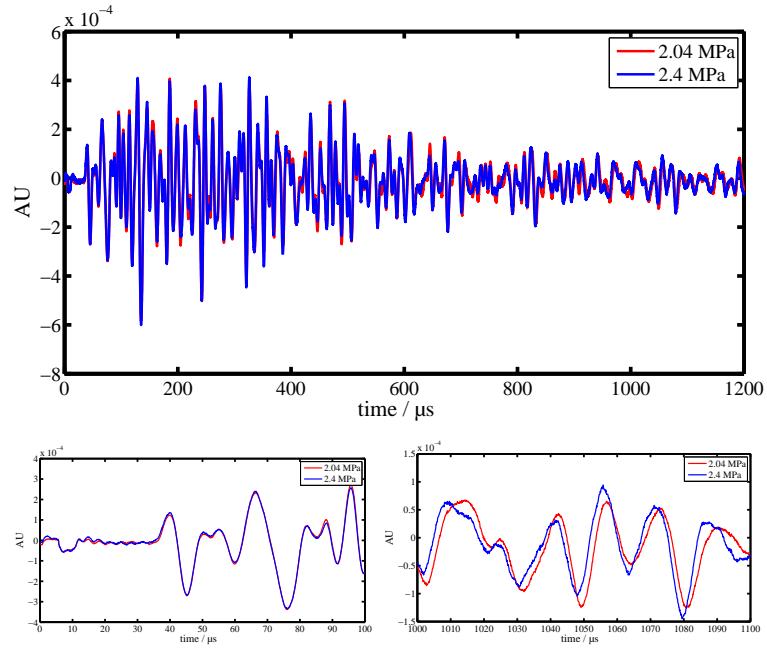


Abbildung 5.8: Vergleich der Seismogramme zweier Messungen mit leicht verschiedenen Spannungen.

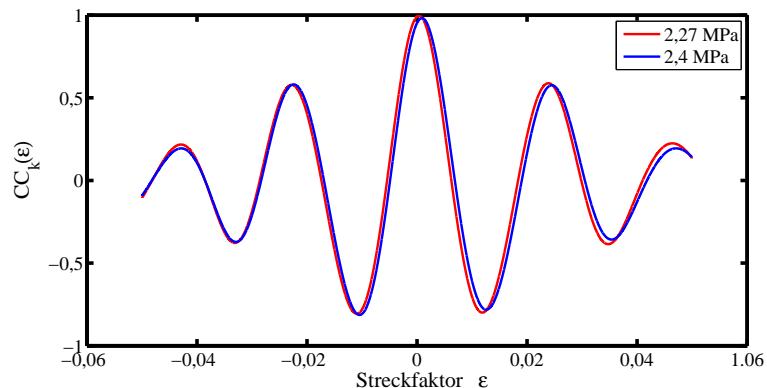


Abbildung 5.9: Streckkorrelation CC_k , berechnet zwischen Referenzmessung 2,04 MPa und Messungen mit 2,27 MPa und 2,4 MPa. Zeitfenster 500 bis 1000 μ s.

5 Labormessungen

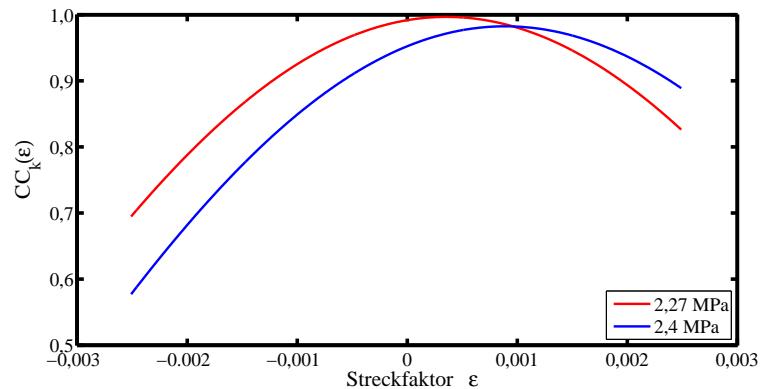


Abbildung 5.10: Streckkorrelation CC_k , berechnet zwischen Referenzmessung 2,04 MPa und Messungen mit 2,27 MPa und 2,4 MPa (Ausschnitt). Zeitfenster 500 bis 1000 μ s.

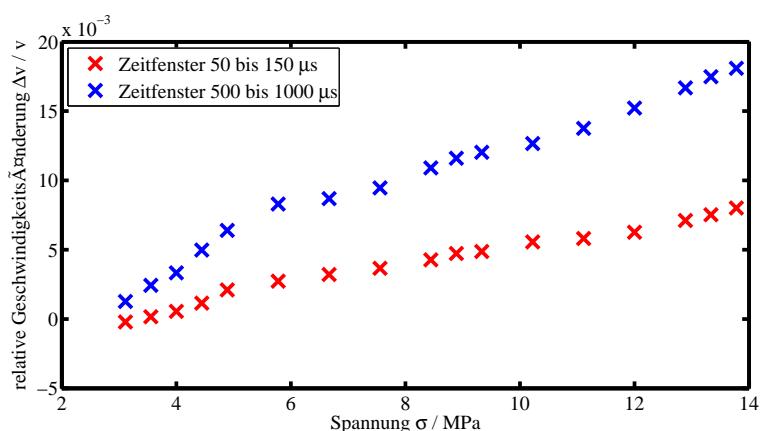


Abbildung 5.11: Geschwindigkeitsvariationen im niedrigen Spannungsbereich

5.2 Druckabhängigkeit der Schallwellengeschwindigkeit in Beton

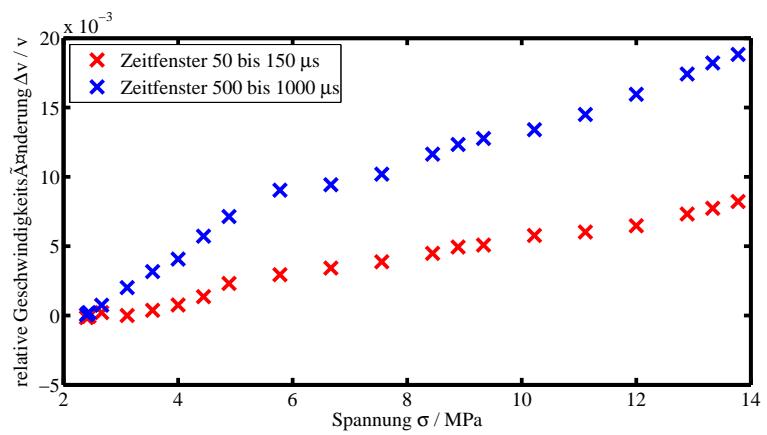
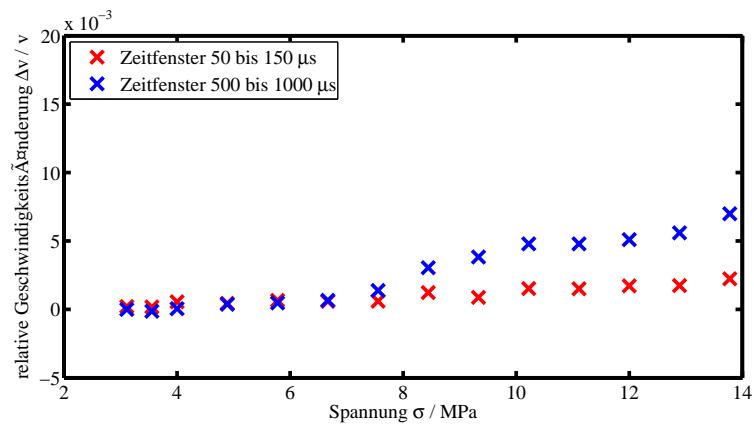


Abbildung 5.12: Geschwindigkeitsvariationen der ersten Messung. Auffällig ist der „Knick“ oberhalb 5 MPa, der in beiden Zeitfenstern zu sehen ist und der auf eine Vorbelastung des Würfels hindeuten könnte.

5 Labormessungen

5.2.3.4 Vergleich P-Wellen und S-Wellen

Der Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen, die aus dem frühen Zeitfenster (50 μs bis 150 μs) ermittelt wurden, mit denen aus einem späteren Zeitfenster (500 μs bis 1000 μs) zeigt ein deutlich geringeres $\frac{\Delta v}{v}$ für das frühe Zeitfenster (siehe Abbildungen 5.13 und 5.14). Dies entspricht der Vermutung, dass im frühen Zeitfenster wenig gestreute P-Wellen überwiegen, während nach einer halben Millisekunde S-Wellen und Oberflächenwellen dominieren. Da für in Spannungsrichtung polarisierte S-Wellen die Geschwindigkeitsänderung deutlich höher ist, ist somit im späteren Zeitfenster eine höhere $\frac{\Delta v}{v}$ zu erwarten. Auffällig ist aber erneut der Unterschied zwischen den beiden verwendeten Würfeln.



5.2.3.5 Messungen über große Spannungsbereiche

Ein weiteres Ziel der Messungen ist es, eine Hysteresekurve über einen großen Spannungsbereich aufzunehmen. Interessant ist dabei zum Beispiel der Geschwindigkeitsverlauf nach einer Belastung nahe der Bruchspannung und der Vergleich von $\frac{\Delta v/v}{\Delta \sigma}$ vor und nach der Belastung.

Dies erwies sich mit den Daten aus dem späten Zeitfenster nur als begrenzt möglich (siehe Abbildung 5.15). Bei Belastungen oberhalb von 30 MPa begann sich die Signalform derart zu verändern, dass die Methode nicht mehr anwendbar war. Trotzdem sind auch in diesem Spannungsbereich, verglichen mit der Vorhersage aus Abbildung 2.2 (Seite 20) alle wichtigen Effekte zu erkennen:

- Die Steigung der Spannungs-Geschwindigkeits-Kurve ist zunächst positiv und gleichbleibend.
- Ab ca. 30% der Bruchspannung kommt es zu einem Abflachen der Kurve, später wird die Steigung gar negativ.
- Die Steigung der Kurve ist für einen vorgesägten Körper höher, selbst, wenn die schädigende Spannung nur ungefähr ein Drittel der Bruchspannung betrug.

Für das frühere Zeitfenster ist diese Veränderung der Signalform weniger ausgeprägt, da weniger unterschiedliche Wellenwege überlagert sind. Hier reicht die Stabilität aus, um die Geschwindigkeitsänderungen über das gesamte Messprogramm hin darzustellen (siehe Abbildung 5.16).

Zu erkennen ist die signifikante Geschwindigkeitsabnahme oberhalb von 25 MPa, die mit größeren Spannungen immer stärker wird. Die Steigung des letzten Asts der Kurve, bei dem die Spannung von 45 auf 2 MPa reduziert wird ist hingegen wieder überraschend flach. Das könnte daran liegen, dass durch die ausgedehnten Risse, die bei der Belastung entstanden, das Betongefüge massiv entstellt ist. Da der lineare Bereich klar verlassen wurde, ist sicher, dass die Elastizitätsparameter irreversibel verändert wurden und der Beton also kaum noch Gemeinsamkeiten mit dem ursprünglichen Stoff hat.

Ein weiterer Einfluss, der hier berücksichtigt werden muss, ist die zeitliche Entwicklung des Mediums. Da die Presse dafür nicht ausgelegt war, wurde die Stauchung des Betonwürfels nicht aufgezeichnet. Anhand der Beobachtungen während der Messung kann aber als sicher gelten, dass der Würfel oberhalb von 35 MPa auch bei gleichbleibender Spannung seine Form langsam veränderte. Um den Einfluss dieses Kriechens zu minimieren, wurden die Messungen möglichst schnell durchgeführt.

Im Vergleich mit Abbildung 5.15 fällt wiederum auf, dass die Steigung $\frac{\Delta v/v}{\Delta \sigma}$ ungefähr um den Faktor 2 kleiner ist. Dieser Effekt tritt also auch bei größeren Spannungsbereichen auf.

5 Labormessungen

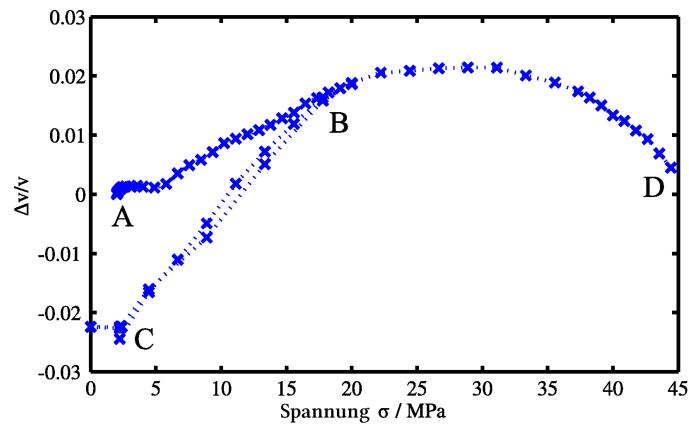


Abbildung 5.15: Gemessene Hysteresekurve. Zeitfenster: 500 μ s bis 1000 μ s, Würfel 2.

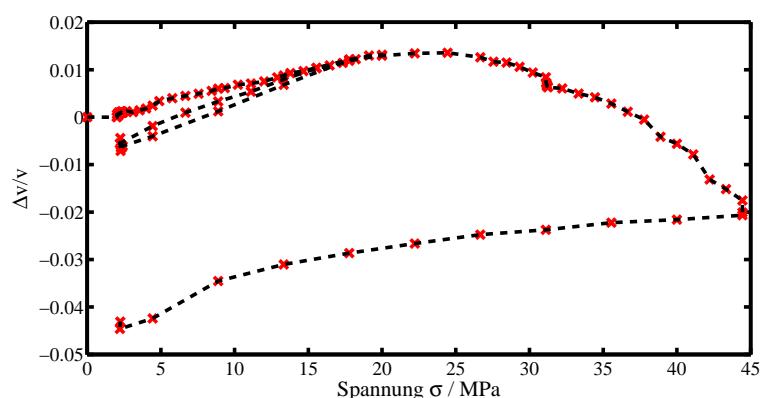


Abbildung 5.16: Gemessene Hysteresekurve. Zeitfenster: 50 μ s bis 150 μ s, Würfel 2.

5.3 Zusammenfassung

Die Codawelleninterferometrie hat sich bei meinen Ultraschallmessungen als viel-versprechendes Messverfahren erwiesen. Obwohl weder die verwendeten Geräte (einfachste P-Wellen-Quellen), noch die Messanordnung (direkt gegenüberliegende Messköpfe) speziell optimiert waren, konnten viele interessante und der herkömmlichen Messung nicht zugängliche Effekte beobachtet werden, so der akustoelastische Effekt, die Geschwindigkeitsabnahme durch Rissbildung, unterschiedliche Geschwindigkeiten für frischen und leicht vorbelasteten Beton sowie Effekte verschiedener Wellentypen.

Für eine nicht nur qualitative Auswertung wäre auf den hier gemachten Erfahrungen ein Messprogramm aufzustellen, das im folgenden für deutlich mehr Körper durchgeführt werden müsste.

5 Labormessungen

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen in der vorliegenden Diplomarbeit haben gezeigt, dass die Anwendung der Codawelleninterferometrie zur Strukturüberwachung von Ingenieurbauwerken großes Potential bietet.

Zunächst konnte gezeigt werden, dass aus der Seismik stammende herkömmliche Komponenten für aktive Untersuchung an großen ingenieurtechnischen Strukturen grundsätzlich geeignet sind. Bei den Messungen an der Steinachtalbrücke wurde gezeigt, dass die Ergebnisse mehrfachen Messens Aussagen erlauben. Durch die Be trachtung der Coda wird es erstmals möglich, Geschwindigkeitsveränderungen von Schallwellen in einem Bauwerk direkt zu messen, was mit den bisherigen Methoden, die sich überwiegend am Ersteinsatz orientierten, kaum möglich war. Diesen Gewinn wird erkauft durch die Schwierigkeiten in der Lokalisierung der Veränderungen. Gleichzeitig wird auch deutlich, dass die hier aufgetretenen Einschränkungen der Ergebnisse, eher in den verwendeten, teilweise eher improvisierten Geräten als in der Methode begründet sind. Insbesondere das Potential der Vibrationsseismik mit ihrer beliebig anpassbaren Signalcharakteristik wurde bei Weitem nicht ausgeschöpft.

Die Ultraschallmessungen an einem einzelnen Probekörper schließlich demonstrieren noch einmal das bereits bekannte Potential dieser Methode für die Ermittlung elastischer Parameter von Werkstoffen.

Auf dieser Arbeit aufbauende zukünftige Messungen sollten vor allem versuchen, die hier noch vorhandenen Einschränkungen hinsichtlich des Messaufbaus zu überwinden. Für die weitere Nutzung der Vibrationsseismik wäre beispielsweise eine fest in dem Bauwerk verankerte Quelle nützlich. Die Ultraschallmessungen würden von einer getrennten mehrkomponentigen Aufzeichnung profitieren, um die Wellentypen besser trennen zu können. Untersuchungen auf den Einfluss von Korrosionsschäden auf die Wellenform wurden hier ganz ausgelassen, wären aber ein weiteres vielversprechendes Anwendungsfeld.

6 Zusammenfassung und Ausblick

A Fotos der Messungen



Abbildung A.1: links: Betonsockel für die Vibrationsquelle (ohne diese); rechts: Keller in der Talstraße 35 mit Testgeophonen, Summit-Auswerteeinheit und Vibrationsquelle

A Fotos der Messungen



Abbildung A.2: Sockel für die Vibrationsquelle mit bzw. ohne die Quelle. Aufgenommen auf der Steinachtalbrücke



Abbildung A.3: Messaufbau im Hohlkasten der Elsterbrücke



Abbildung A.4: Steinachtalbrücke in Endlage von der Fahrbahnplatte aus fotografiert.



Abbildung A.5: Messaufbau auf der Steinachtalbrücke. Im Vordergrund: Geophon-Messstrecke. Im Hintergrund links: Vibrationsquelle und Ultraschallgeräte. In den Zelten befinden sich die Aufzeichnungscomputer der Summit.

A Fotos der Messungen

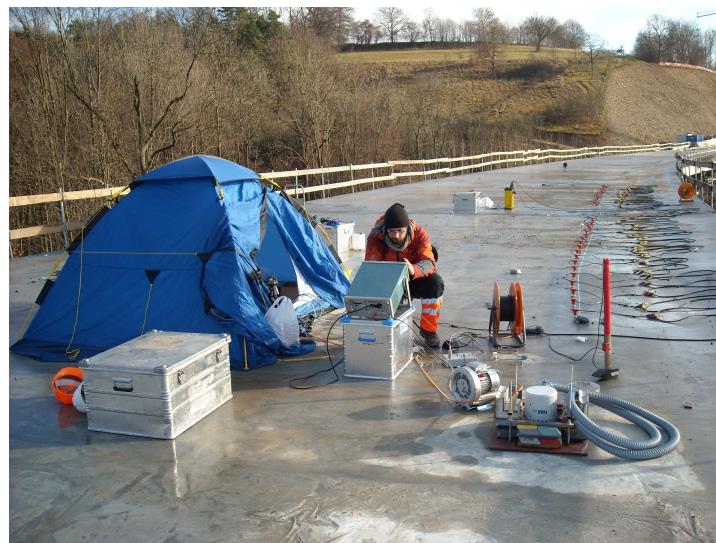


Abbildung A.6: Messeinrichtungen auf der Steinachtalbrücke nach Abschluss des dritten Messeinsatzes



Abbildung A.7: Baustelle am Widerlager der Steinachtalbrücke. Direkt an der Brücke ist das Betonieren des nächsten Taktes zu sehen, im Vordergrund wird die Bewehrung des übernächsten Taktes erstellt.

B Brückenpläne

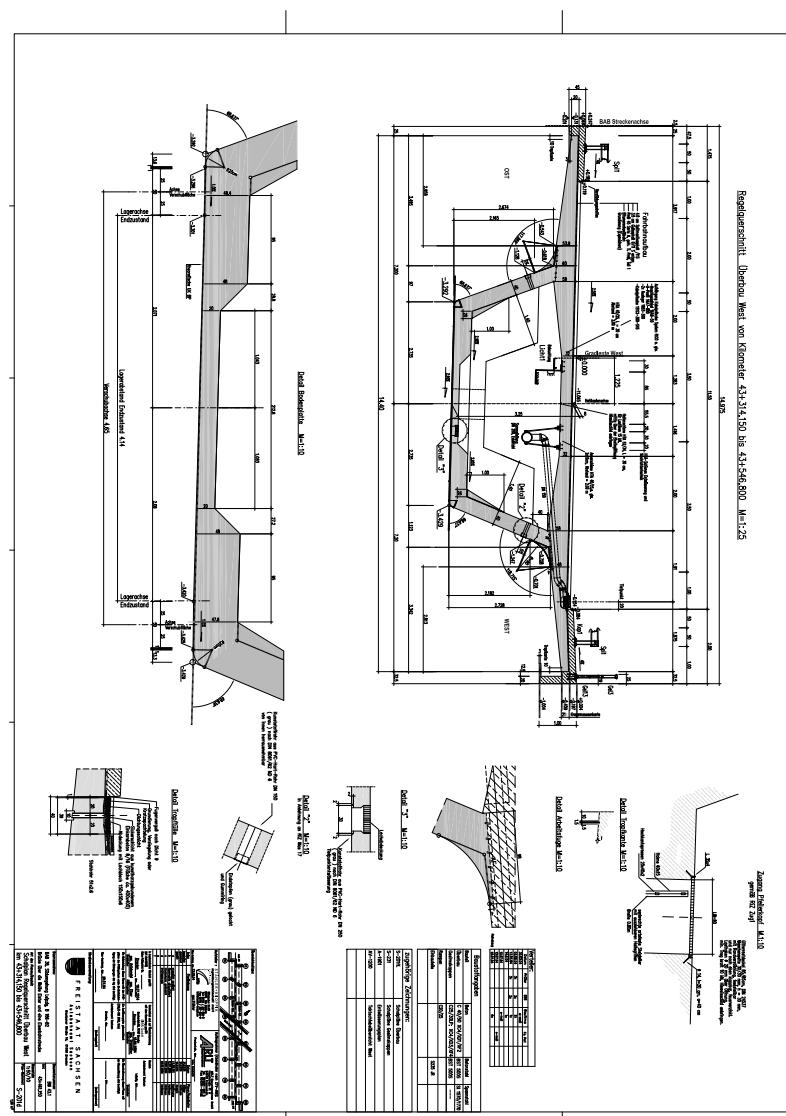


Abbildung B.1: Regelquerschnitt der Elsterbrücke

B Brückenpläne

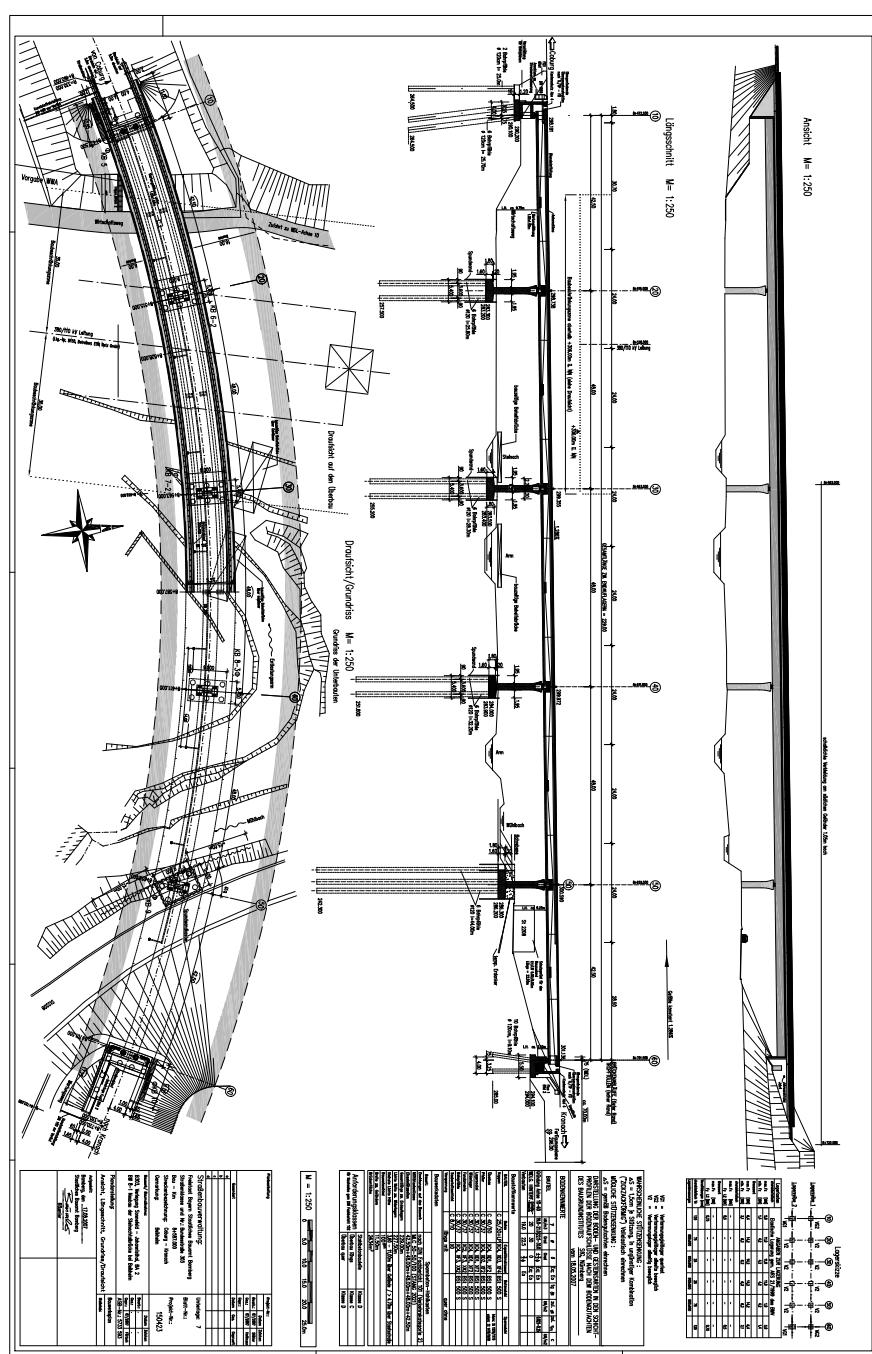


Abbildung B.2: Bauwerksplan der Steinachtalbrücke

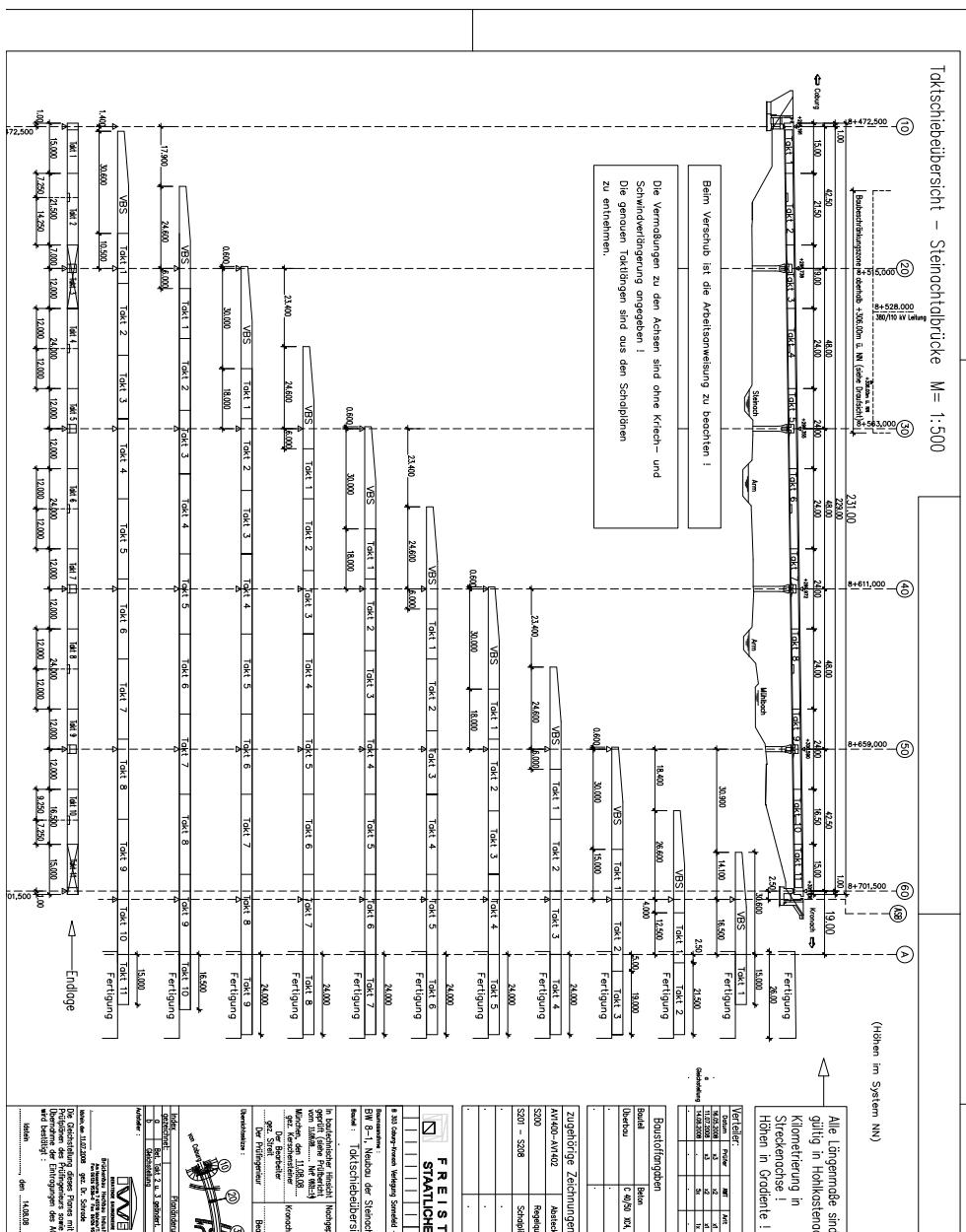


Abbildung B.3: Taktübersicht der Steinachtalbrücke

B Brückenpläne

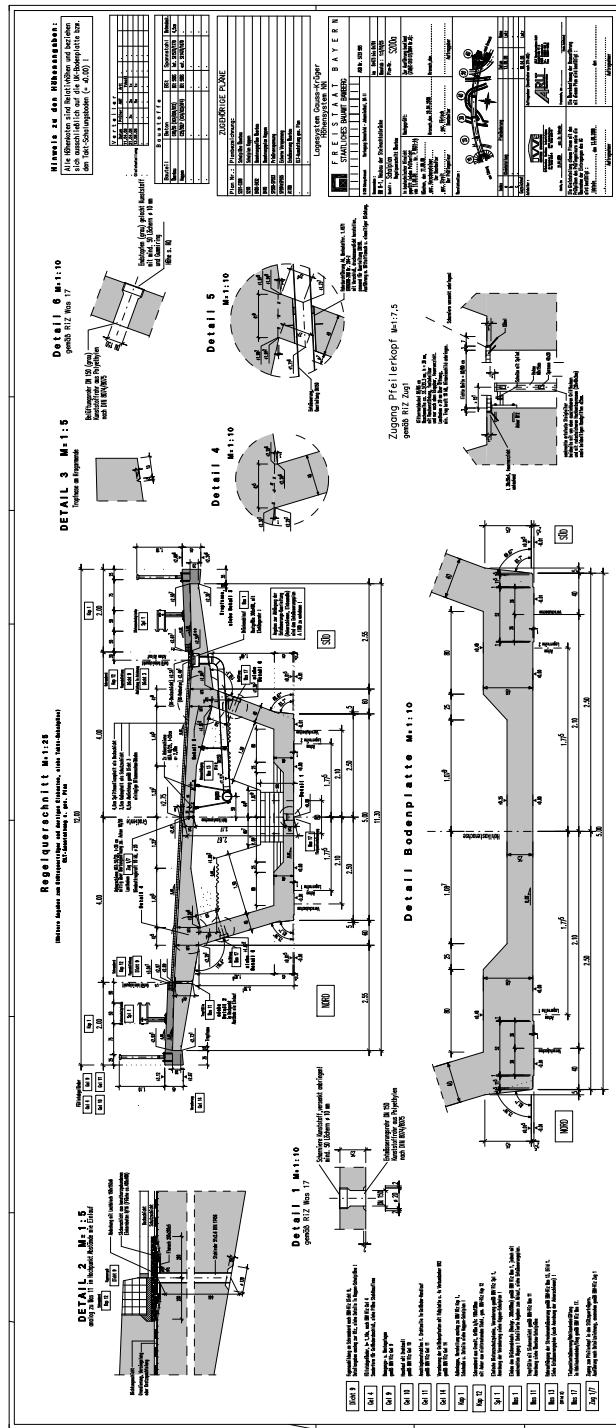


Abbildung B.4: Regelquerschnitt der Steinachtalbrücke

Literaturverzeichnis

- Aki, K. Theory of earthquake prediction with special reference to monitoring of the quality factor of lithosphere by the coda method. *Earthquake prediction research*, Band 3 (1985)(3-4):S. 219.
- Buttkus, B. *Spectral Analysis and Filter Theory in Applied Geophysics*. Springer (2003).
- Campillo, M., F. Brenguier, C. Hadzioannou, N. Shapiro & E. Larose. Monitoring changes in crustal properties with seismic noise. *Acoustical Society of America Journal*, Band 123 (2008):S. 3269. doi:10.1121/1.2933596.
- Dainty, A. M. & M. N. Toksöz. Elastic wave propagation in a highly scattering medium - A diffusion approach. *Journal of Geophysics Zeitschrift Geophysik*, Band 43 (1977):S. 375.
- de Rosny, J., A. Tourin & M. Fink. Coherent backscattering of an elastic wave in a chaotic cavity. *Phys. Rev. Lett.*, Band 84 (2000)(8):S. 1693. doi:10.1103/PhysRevLett. 84.1693.
- DIN. *Betonbrücken*, Band 102 von *DIN-Fachbericht*. Beuth (2003a).
- DIN. *Einwirkungen auf Brücken*, Band 101 von *DIN-Fachbericht*. Beuth (2003b).
- DIN. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton*, Band 1045. Beuth (2008).
- Grêt, A., R. Snieder & J. Scales. Time-lapse monitoring of rock properties with coda wave interferometry. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, Band 111 (2006):S. 3305. doi:10.1029/2004JB003354.
- Hadzioannou, C., E. Larose, O. Coutant, P. Roux & M. Campillo. Stability of monitoring weak changes in multiply scattering media with ambient noise correlation: Laboratory experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 125 (2009)(6):S. 3688. doi:10.1121/1.3125345.
- Hsu, T. T. C., F. O. Slate, G. M. Sturman & G. Winter. Microcracking of plain concrete and the shape of the stress-strain curve. *Journal of the American Concrete Institute*, Band 60 (1963)(2):S. 209.
- Hughes, D. S. & J. L. Kelly. Second-order elastic deformation of solids. *Phys. Rev.*, Band 92 (1953)(5):S. 1145.

Literaturverzeichnis

- Larose, E., J. de Rosny, L. Margerin, M. Campillo, B. van Tiggelen & A. Domitille. Observation of multiple scattering of khz vibrations in a concrete structure and application to monitoring weak changes. *PHYSICAL REVIEW E*, Band 73 (2006). doi:10.1103/PhysRevE.73.016609.
- Larose, E. & S. Hall. Monitoring stress related velocity variation in concrete with $2 \cdot 10^{-5}$ relative resolution using diffuse ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 125 (2009)(4):S. 1853. doi:<http://dx.doi.org/10.1121/1.3079771>.
- Müller, G. *Theorie Elastischer Wellen*. Institut für Geophysik, Universität Hamburg, Universität Hamburg (1994).
- Paasschens, J. C. J. Solution of the time-dependent boltzmann equation. *PHYSICAL REVIEW E*, Band 56 (1997)(1).
- Pacheco, C. & R. Snieder. Time-lapse travel time change of multiply scattered acoustic waves. *J. Acoust. Soc. Am.*, Band 118 (2005):S. 1300. doi:10.1121/1.2000827.
- Payan, C., V. Garnier, J. Moysan & P. A. Johnson. Determination of third order elastic constants in a complex solid applying coda wave interferometry. *Applied Physics Letters*, Band 94 (2009)(1):011904. doi:10.1063/1.3064129.
- Poupinet, G., V. L. Ellsworth & J. Frechet. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras fault, California. *J. Geophys. Res.*, Band 89 (1984):S. 5719. doi:10.1029/JB089iB07p05719.
- Sato, H. & M. C. Fehler. *Seismic Wave Propagation and Scattering in the Heterogeneous Earth*. Springer-Verlag, New York (1998).
- Sens-Schönfelder, C. & E. Larose. Temporal changes in the lunar soil from correlation of diffuse vibrations. *Phys. Rev. E*, Band 78 (2008)(4):S. 045601. doi:10.1103/PhysRevE.78.045601.
- Sens-Schönfelder, C. & U. Wegler. Passive image interferometry and seasonal variations of seismic velocities at Merapi Volcano, Indonesia. *Geophys. Res. Lett.*, Band 33 (2006):S. 21302. doi:10.1029/2006GL027797.
- Snieder, R. Extracting the Green's function from the correlation of coda waves: A derivation based on stationary phase. *Phys. Rev. E*, Band 69 (2004)(4):S. 046610. doi:10.1103/PhysRevE.69.046610.
- Snieder, R. The theory of coda wave interferometry. *Pure and Applied Geophysics*, Band 163 (2006):S. 455. doi:10.1007/s00024-005-0026-6.
- Toupin, R. A. & B. Bernstein. Sound waves in deformed perfectly elastic materials. acoustoelastic effect. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 33 (1961)(2):S. 216. doi:10.1121/1.1908623.

Danksagung

Dank gebührt Dr. Christoph Sens-Schönfelder für Beratung bei der Konzeption der Messungen, tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung und Beistand bei der Auswertung. Die erfolgreichen Messungen auf der Steinachtalbrücke wären außerdem nicht möglich gewesen ohne die Mitarbeit von cand. geol. Udo Müller. Auch allen anderen Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe sei gedankt für anregende Gespräche, neue Ideen und das Überlassen von Messgeräten.

Die Erlaubnis, in der Elsterbrücke zu messen, erteilte das Autobahnamt Sachsen. Dem Bauunternehmen ARLT aus Frankenhain danke ich für die Unterstützung bei den Messungen auf ihrer Baustelle an der Steinachtalbrücke und für das Bereitstellen der Betonprobewürfel.

Die Ingenieurgesellschaft Stähler+Knoppik überließ uns die Pläne für die beiden Bauwerke sowie die statischen Berechnungen der Steinachtalbrücke. Insbesondere danke ich meinem Vater Peter Stähler für die Einführung in die Bemessung von Betonbauwerken.

Der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung sei gedankt für die Messungen, die ich an den Probewürfeln mit ihren Pressen vornehmen durfte, insbesondere Herrn Ernst Niederleithinger, Herrn Stephan Pirkawetz und Herrn Thomas Nowak, die bei der Durchführung der Messungen halfen.

Zu guter Letzt danke ich meiner Verlobten und meiner Familie für ihre Geduld.

Literaturverzeichnis

Selbständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Literatur erstellt habe.

Simon Stähler

Leipzig, den 14.09.2009