

Laseranregung und optisches Mikrofon zur kontaktfreien Charakterisierung von Naturstein mit akustischen Oberflächenwellen

Wolfgang ROHRINGER¹, Sebastian WALD¹, Ryan SOMMERHUBER¹,
Balthasar FISCHER¹, Nils PANZER¹, Jan BOLAY², Friedrich GRÜNER²,
Harald GARECHT², Jürgen FRICK²

¹ XARION Laser Acoustics GmbH, Wien, Österreich

² Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart, Stuttgart

Kontakt E-Mail: n.panzer@xarion.com

Kurzfassung

Sowohl Verwitterung, als auch verschiedene Konservierungsmethoden, verändern die mechanischen Eigenschaften von mineralischen Werkstoffen wie Naturstein. Je nach Zustand oder Behandlung reichen diese Änderungen bis in unterschiedliche Schichttiefen hinab. Damit werden auch akustische Parameter, wie die Schallgeschwindigkeit oder die Dämpfung, beeinflusst. Dies ermöglicht den Einsatz von Ultraschall zur zerstörungsfreien Prüfung von Natursteinkonstruktionen.

Im Rahmen vorangehender Arbeiten wurde bereits ein Ultraschallverfahren zur Erstellung eines Tiefenprofils des Verwitterungszustands von Natursteinproben demonstriert. Hierbei wurde der Ultraschall mit Hilfe von luftgekoppelten Wandlern bei unterschiedlichen diskreten Frequenzen zwischen 100 und 500 kHz erzeugt, um Oberflächenwellen in der Probe anzuregen und zu detektieren. Je nach Frequenz reicht die Welle mehr oder weniger tief in den Stein hinein, dadurch ergibt sich eine Frequenzabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit, die mit der Tiefe korreliert, in welche die Auswirkungen der Verwitterung vordringen.

Hier stellen wir ein neues kontaktfreies Verfahren für die Messung der Ausbreitungseigenschaften von Oberflächenwellen in Naturstein und ähnlichen Materialien dar. Dabei werden Laserpulse von ca. 10 ns genutzt, um kurze Ultraschalltransienten anzuregen, deren Frequenzspektrum von wenigen Hz bis in den hohen MHz-Bereich reicht. Die Detektion erfolgt mit einem optischen Mikrofon, basierend auf einem miniaturisierten Laserinterferometer, welches luftgekoppelten Ultraschall bei Frequenzen zwischen 10 Hz und 1 MHz messen kann. Wir zeigen, wie sich durch Darstellung der Pulsausbreitung als D-Bild und Ermittlung der Dispersion via 2d-Fouriertransformation die Ausbreitungsgeschwindigkeit für unterschiedliche im Puls enthaltene Frequenzen bestimmen lässt.

Ergebnisse aus Versuchen an Natursteinproben werden präsentiert und Referenzmessungen gegenübergestellt. Ein Ausblick auf den möglichen Einsatz zur



zerstörungsfreien Überprüfung des Zustands denkmalgeschützter Bauwerke, sowie für Anwendungen in anderen Werkstoffsystemen, wird gegeben.

[1] Fey, P., Döring, D., Busse, G., Frick, J. Grüner, F., Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V. ISBN 978-0-415-62131-1, Taylor & Francis, London (2012)

Laseranregung und optisches Mikrofon zur kontaktfreien Charakterisierung von Naturstein mit akustischen Oberflächenwellen

Kolloquium Schallemission und Anwenderseminar
Zustandsüberwachung mit geführten Wellen

Nils Panzer¹, Ryan Sommerhuber¹, Wolfgang Rohringer¹, Balthasar Fischer¹,
Friedrich Grüner², Harald Garecht², Jürgen Frick²

¹XARION Laser Acoustics GmbH, Wien

²Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart

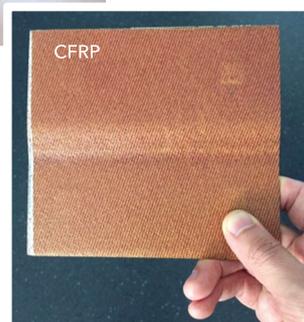
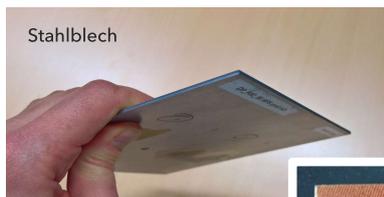
n.panzer@xarion.com

moving sounds without moving parts



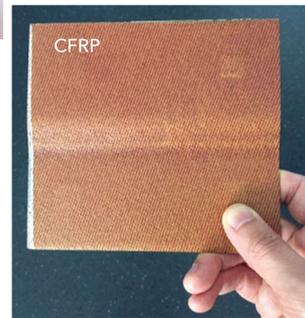
Motivation

Kontaktfreie Prüfung unterschiedlichster Materialien mittels SAW oder Plattenwellen



Motivation

Kontaktfreie Prüfung unterschiedlichster Materialien mittels SAW oder Plattenwellen



Motivation



Motivation



Bild: Wikipedia

- Verwitterung von Naturstein bei historischen Objekten
- Ultraschall und Dispersion zur Prüfung des Oberflächenzustands [1,2]

[1] Meier, T. et al., 'Investigating Surficial Alterations of Natural Stone by Ultrasonic Surface Measurements', 10.1007/978-3-319-50518-3_12 (2017)

[2] Fey, P., Döring, D., Busse, G., Frick, J. Grüner, F., Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V. ISBN 978-0-415-62131-1, Taylor & Francis, London (2012)

Motivation



Bild: Wikipedia

- Ausbreitungsgeschwindigkeit von Oberflächenwellen gibt Aufschluss über Zustand (Dichte, Porosität)
- Unterschiedliche Eindringtiefe verschiedener Frequenzen liefert Tiefenprofil des Zustands (Behandlung, Verwitterung)
- Herausforderung: Unregelmäßige Oberfläche; kontaktfreie Prüfung [2]

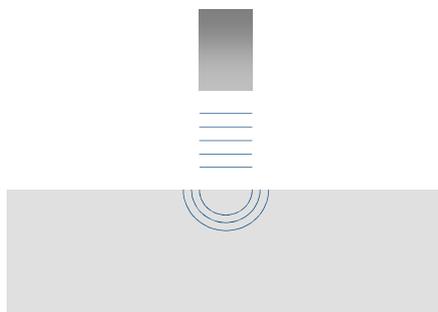
[1] Meier, T. et al., 'Investigating Surficial Alterations of Natural Stone by Ultrasonic Surface Measurements', 10.1007/978-3-319-50518-3_12 (2017)

[2] Fey, P., Döring, D., Busse, G., Frick, J. Grüner, F., Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V. ISBN 978-0-415-62131-1, Taylor & Francis, London (2012)

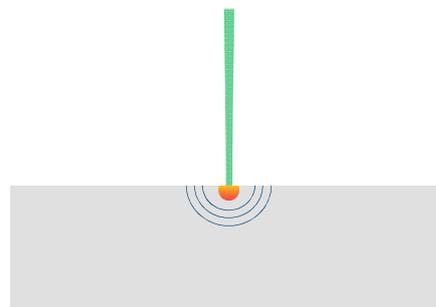
1. Kontaktfreie Ultraschallprüfung

- 2. Optisches Mikrofon
- 3. Messung von Oberflächen- und Plattenwellen mit dem Optischen Mikrofon
- 4. Ergebnisse: Oberflächenwellen in Natursteinproben
- 5. Ausblick: Dispersion geführter Wellen für zFP

Luftgekoppelter Ultraschall

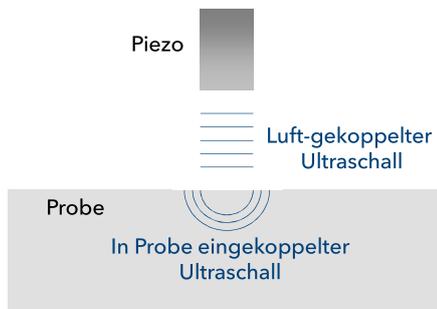


Laser-Anregung

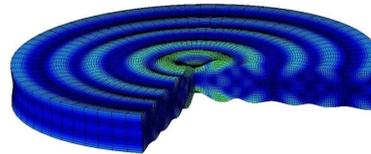


Kontaktfreie Ultraschallprüfung: Piezos

Luftgekoppelter Ultraschall



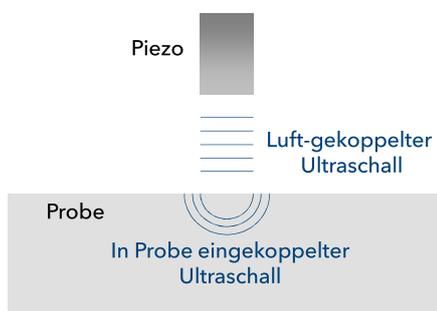
Mechanisches Masse-Feder-System



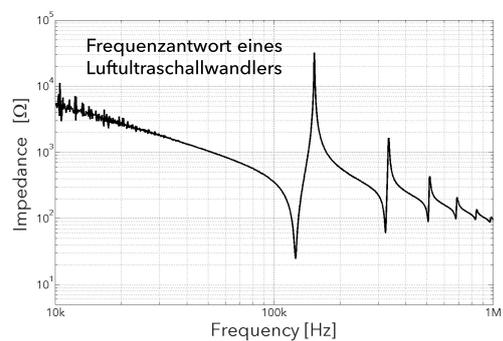
Höhere Eigenmode einer 1mm durchmessenden Piezo-Scheibe

Kontaktfreie Ultraschallprüfung: Piezos

Luftgekoppelter Ultraschall

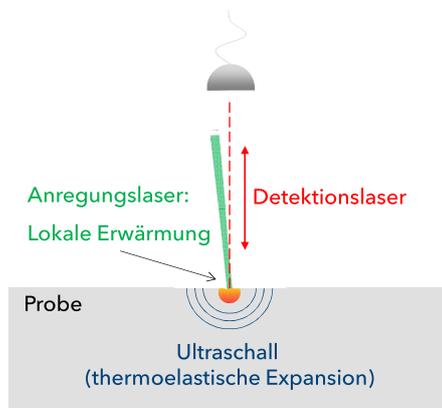


Mechanisches Masse-Feder-System



- Schmalbandig (wenige 10 kHz) \rightarrow unterschiedliche Wandler für unterschiedliche Frequenzen nötig
- Anregung von Plattenwellen / SAW: genaue Winkelausrichtung nötig

Kontaktfreie Ultraschallprüfung: Laseranregung und vibrometrische Detektion



Anregung mit Laser, Detektion durch Erfassung von Oberflächenvibrationen mit optischem Interferometer

+ Hohe Bandbreite: mehrere 10 - 100 MHz

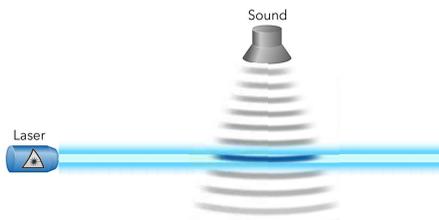
- Anregung, vor allem aber auch Detektion stark von Oberflächeneigenschaften abhängig → teure, sperrige Prüfköpfe

Alternative: Laseranregung + Optisches Mikrofon

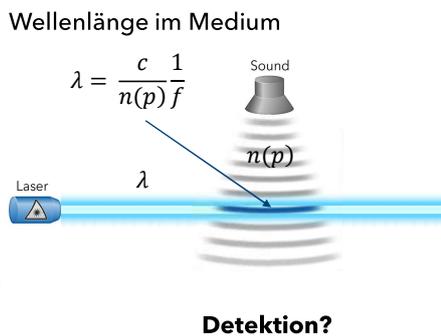
Inhalt

1. Kontaktfreie Ultraschallprüfung
- 2. Optisches Mikrofon**
3. Messung von Oberflächen- und Plattenwellen mit dem Optischen Mikrofon
4. Ergebnisse: Oberflächenwellen in Natursteinproben
5. Ausblick: Dispersion geführter Wellen für zFP

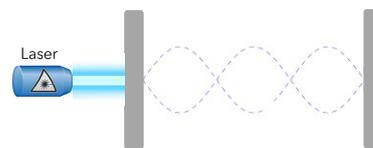
Optisches Mikrofon: Funktionsprinzip



Optisches Mikrofon: Funktionsprinzip

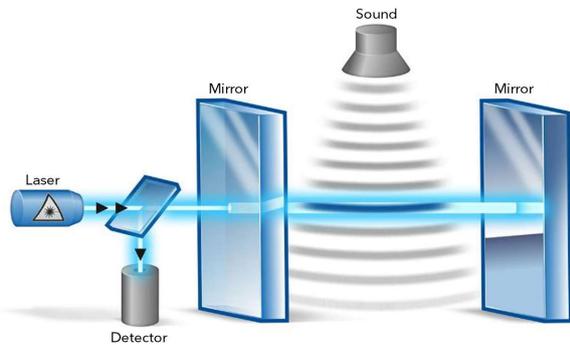


Interferometrisch!



- ✓ Stehende Lichtwelle in Fabry-Pérot Interferometer mit starren Spiegeln
- ✓ Konstruktive Interferenz: Vielfaches (m) der halben Lichtwellenlänge (λ) ist gleich der Etalonlänge (L): $m * \lambda/2 = L$

Optisches Mikrofon: Zusammenfassung Funktionsprinzip

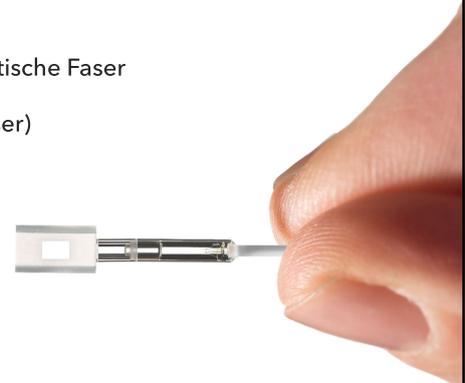


Funktionsprinzip im Überblick

- ✓ Schalldruck ändert optische Wellenlänge im Medium
- ✓ Interferenz in einem starren Etalon: Helligkeitsänderung proportional zur Schalldruckänderung
- ✓ Keine mechanische Bewegung oder Deformation

Optisches Mikrofon: Eigenschaften

- ✓ Luftultraschalldetektion von 10Hz to 1MHz
- ✓ Kompakter Sensorkopf (5mm Durchmesser), gekoppelt an optische Faser
- ✓ Große Kabellängen möglich (0.3 dB/km Abschwächung in Faser)
- ✓ Unempfindlich auf elektromagnetische Störfelder



Inhalt

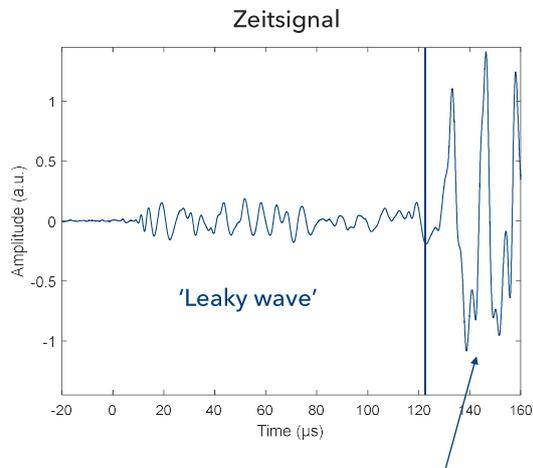
1. Kontaktfreie Ultraschallprüfung
2. Optisches Mikrofon
- 3. Messung von Oberflächen- und Plattenwellen mit dem Optischen Mikrofon**
4. Ergebnisse: Oberflächenwellen in Natursteinproben
5. Ausblick: Dispersion geführter Wellen für zFP

Mess-Schema für zFP mit Platten- und Rayleighwellen



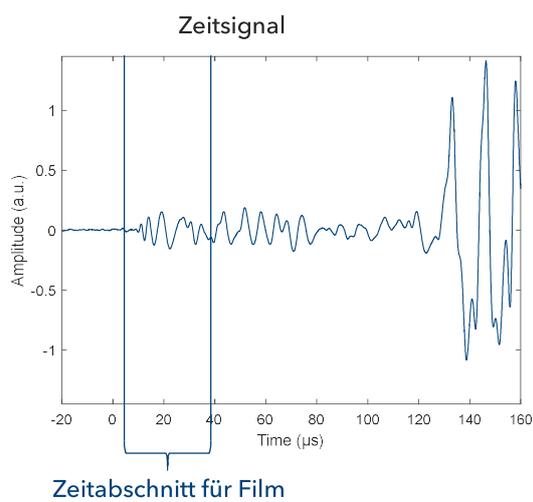
Costley R. D. Jr., Berthelot Y. H., 'Laser Generation of Rayleigh and Lamb Waves for Ultrasonic NDT.'
In: Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Springer Boston (1992)

Beispiel: Punkt-verschweißtes Stahlblech

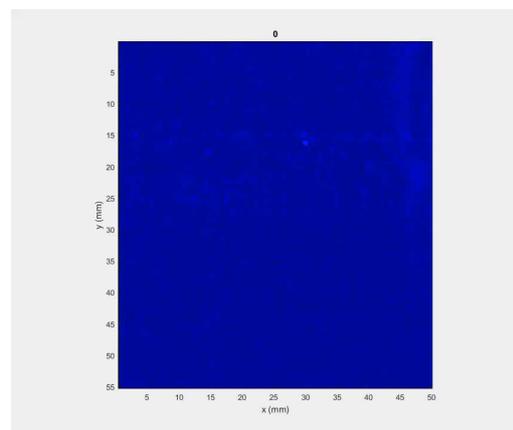


Direkter Luftultraschall von Absorptionszone

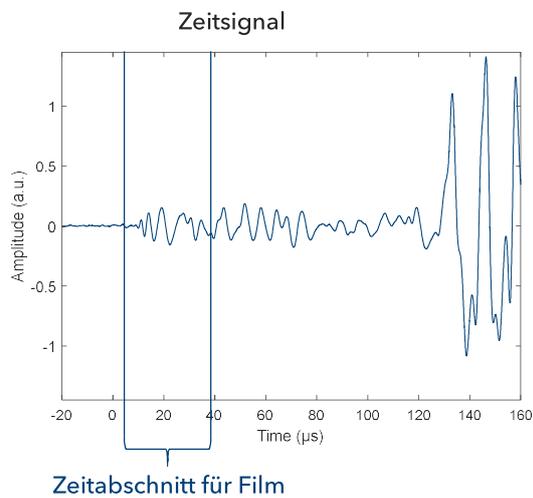
Beispiel: Punkt-verschweißtes Stahlblech



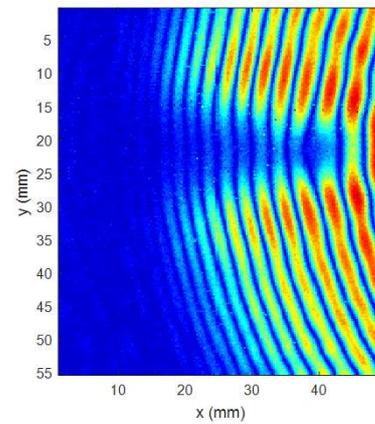
Messung: Ausbreitung der Welle entlang Platte



Beispiel: Punkt-verschweißtes Stahlblech



Amplitude in 40 ns Zeitfenster

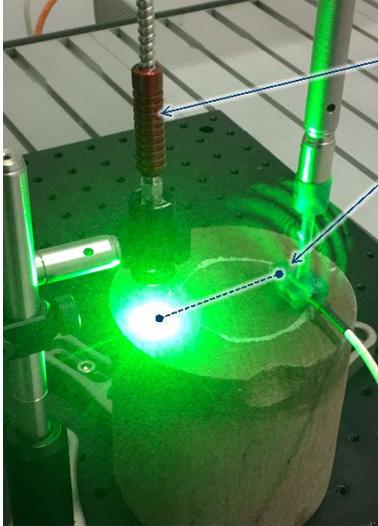


Beugung und Interferenz um Schweißpunkt;
Auswertung für zFP

Inhalt

1. Kontaktfreie Ultraschallprüfung
2. Optisches Mikrofon
3. Messung von Oberflächen- und Plattenwellen mit dem Optischen Mikrofon
- 4. Ergebnisse: Oberflächenwellen in Natursteinproben**
5. Ausblick: Dispersion geführter Wellen für zFP

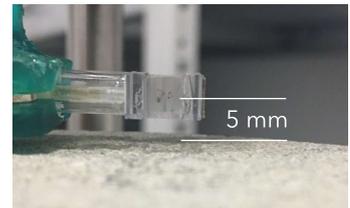
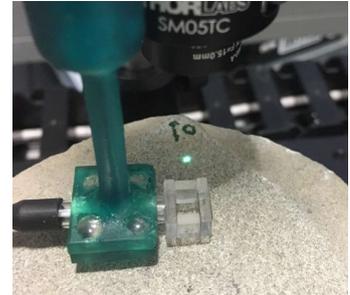
Natursteinproben: Messaufbau



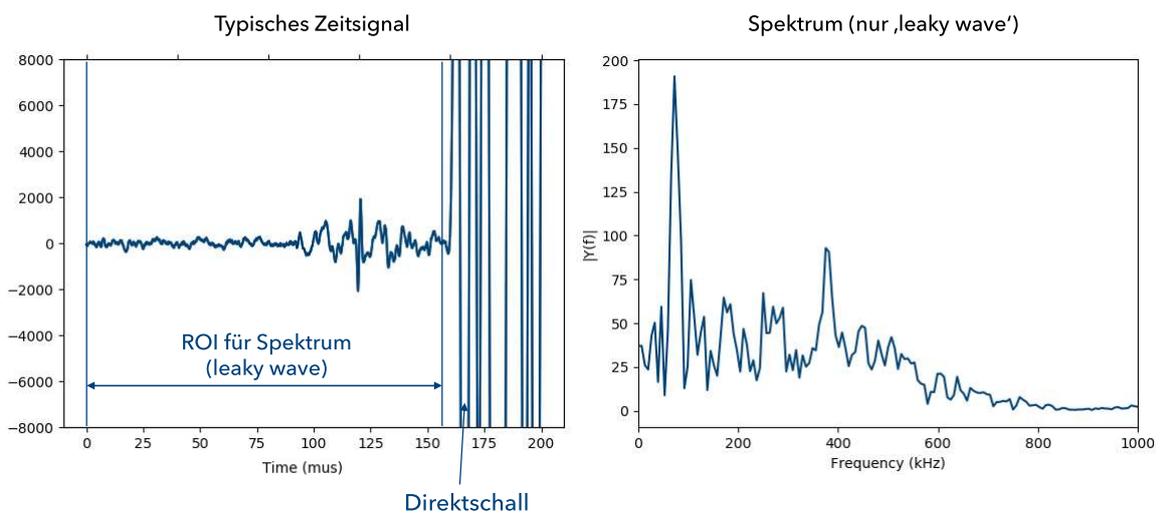
Anregung:
Fasergekoppelter, gepulster Laser

Detektor:
optisches Mikrofon (10 Hz - 1 MHz)

Probe:
Zylindrischer Sandstein
Oberseite hydrophobiert
Unterseite frisch geschnitten



Natursteinproben: typisches Zeitsignal und Spektrum

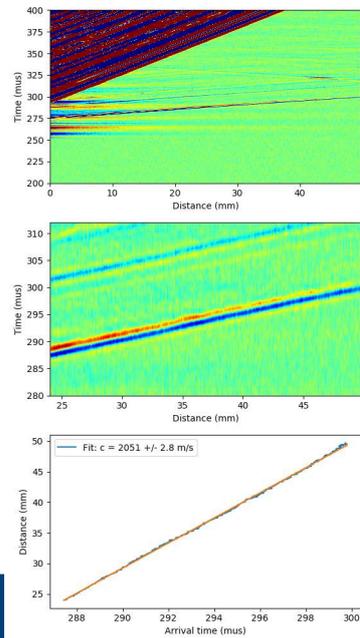


Auswertung: Beispiel Probe A9, oberflächenbehandelt

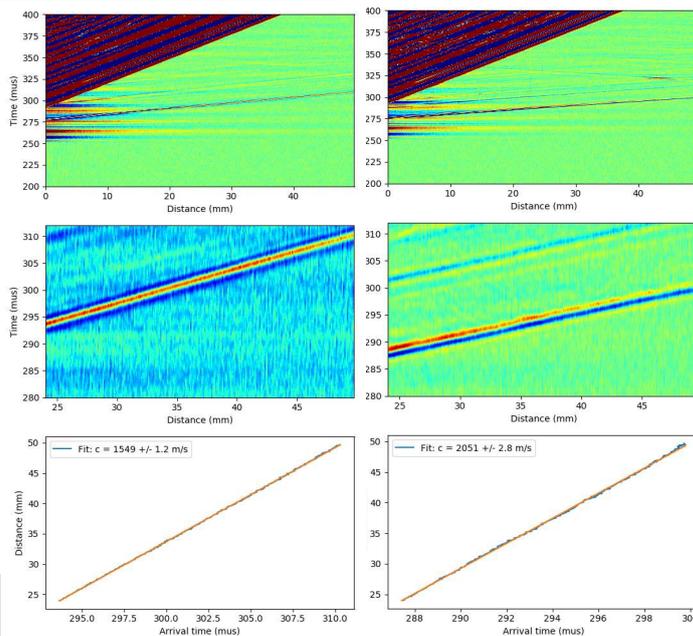
Schritt 1: B-Bild aus Zeitsignalen entlang dem Linienscan erstellen

Schritt 2: Ausschnitt ohne direkten Luftultraschall bzw. ohne Artefakte wählen („region of interest“)

Schritt 3: Gruppengeschwindigkeit über die Laufzeit des Pulses ermitteln



Vergleich: Unbehandelte vs. behandelte Oberfläche



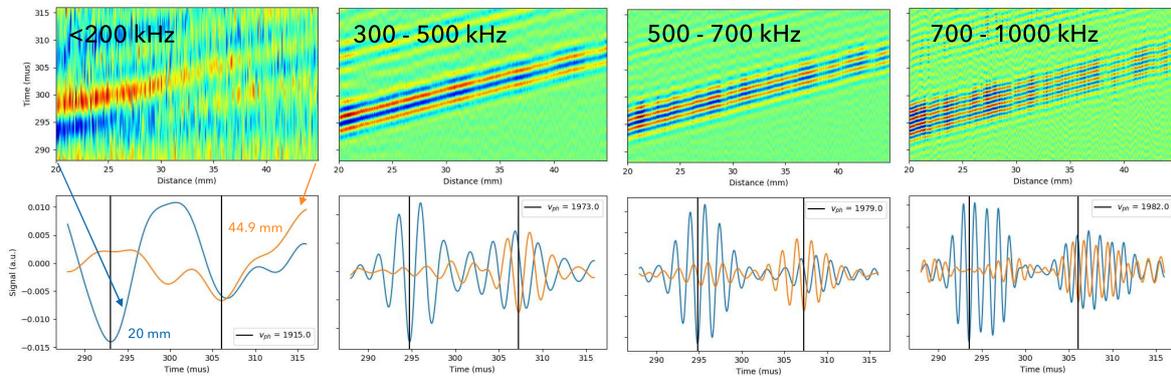
Unbehandelte Oberfläche:
Gruppengeschwindigkeit ca. 1550 m/s

Behandelte Oberfläche:
Gruppengeschwindigkeit ca. 2050 m/s

Gute Übereinstimmung mit
Messungen der MPA Stuttgart

Behandelte Probe: Dispersion

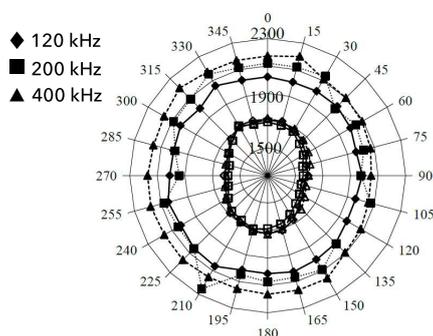
Bandpassfilterung der Messung für verschiedene Frequenzfenster (FIR, Ordnung 512)



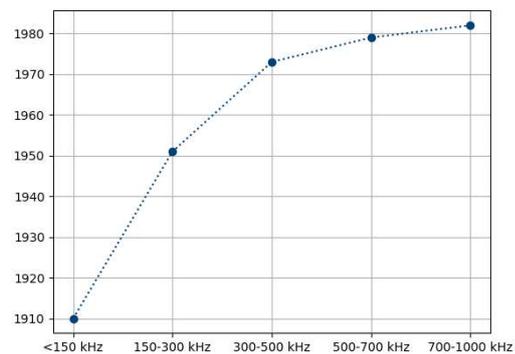
Ergebnis: Geringere Phasengeschwindigkeit für kleinere Frequenzen, analog zu MPA - Messungen

Behandelte Probe: Dispersion

Luftultraschallmessungen mit Piezowandlern an der MPA Stuttgart¹:



Messungen bei XARION



- Kontaktfreie Messung der Dispersion anhand einer Messung (ein Prüfkopf, kein Wechseln)
- Nächste Schritte: weitere Validierung, Überprüfung Anisotropie

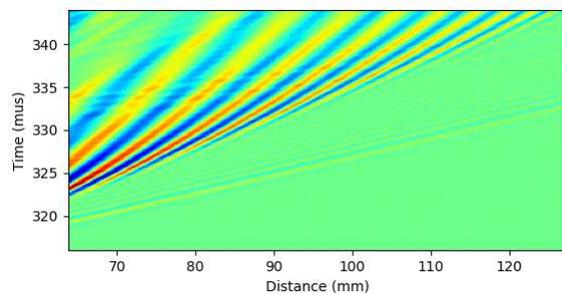
[1] Fey, P., Döring, D., Busse, G., Frick, J. Grüner, F., Emerging Technologies in Non-Destructive Testing V. ISBN 978-0-415-62131-1, Taylor & Francis, London (2012)

1. Kontaktfreie Ultraschallprüfung
2. Optisches Mikrofon
3. Messung von Oberflächen- und Plattenwellen mit dem Optischen Mikrofon
4. Ergebnisse: Oberflächenwellen in Natursteinproben
- 5. Ausblick: Dispersion geführter Wellen für zFP**

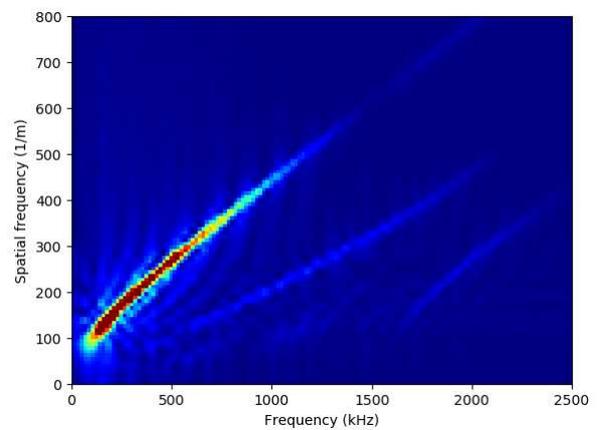
B-Bilder und Dispersionsrelation: Beispiel Aluminiumplatte

1 mm dünne Aluminium-Platte
Linienscan über knapp 13 mm

B-Bild:



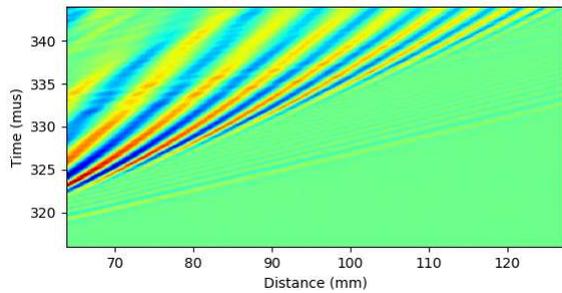
2d Fouriertransformation liefert gemessene
Dispersionsrelation³:



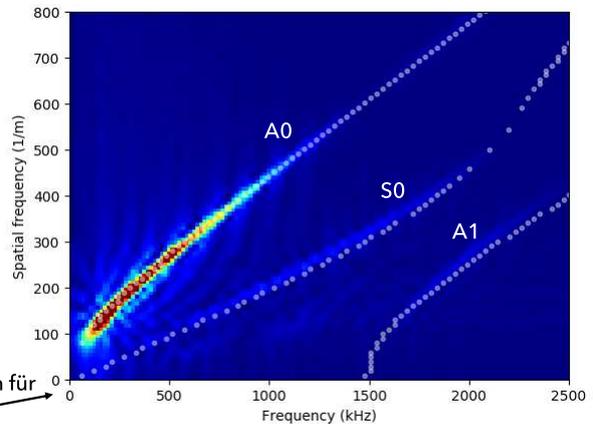
B-Bilder und Dispersionsrelation: Beispiel Aluminiumplatte

1 mm dünne Aluminium-Platte
Linienscan über knapp 13 mm

B-Bild:



2d Fouriertransformation liefert gemessene
Dispersionsrelation³:



Graue Punkte: numerische Lösung der Lamb-Gleichungen für
Aluminium und 1.05 mm Plattendicke

Zusammenfassung

- ✓ Kombination aus Ultraschall-Anregung via Laser und Detektion mit Optischem Mikrofon: Kontaktfreie, breitbandige Ultraschallmessung an unterschiedlichsten Oberflächen
- ✓ Gemessene Gruppengeschwindigkeit und Dispersion an behandelten sowie unbehandelten Sandsteinproben decken sich mit vorangehenden Ergebnissen der MPA Stuttgart
- ✓ 2d-FT von B-Bildern erlaubt die direkte Messung der Dispersionsrelation in dünnen Platten; unterschiedliche Moden werden beobachtet
- ✓ Vielzahl von denkbaren zFP Anwendungen

