

Haptik auf Oberflächen durch Fokussierung vibroakustischer Signale

Sebastian Wöckel, Hendrik Arndt, Ulrike Steinmann

Institut für Automation und Kommunikation (ifak) e.V. Magdeburg,
Geschäftsfeld Messtechnik und Leistungselektronik, Werner-Heisenberg-Str. 1, 39106 Magdeburg
E-Mail: sebastian.woeckel@ifak.eu, Tel.: +49 391 9901 430, Fax: +49 391 9901 590

Motivation

Der Umgang mit berührungssensitiven Eingabegeräten bestimmt einen hohen Anteil des modernen Lebens. Gleichbedeutend begrenzt demgegenüber das Fehlen struktureller bzw. haptischer oder taktiler Informationen auf der Oberfläche die Bedienbarkeit für Personen mit visuellen Einschränkungen. Die sensorische Rückkopplung durch Töne oder gesamt vibrierende Geräte genügt zur Erleichterung der Bedienung nicht.

Auf Grundlage der Umkehrbarkeit von strukturelastischen Wellen ist es möglich, fühlbare zeitlich und lokal begrenzte Vibrationszentren auf Oberflächen zu erzeugen. Die Nachbildung von strukturierten Oberflächen durch den Wechsel vibrierender und nicht vibrierender Flächen als auch die Rückkopplung bei bestimmten Interaktionen, wie das Berühren eines Tastenfeldes, ließen sich theoretisch bereits mit einer begrenzten Anzahl an Aktuatoren realisieren (Bild 1).

Es gibt bereits technische Ansätze auf Basis verteilter Vibrationsensoren oder elektrostatischer Kräfte [1, 2] zur Realisierung einer haptischen Interaktion. Die Anwendung akustischer Wellen ist dagegen bisher kaum vertreten [3]. Vorrangig wurde die Lokalisierung einer Fingerberührung mit letzteren Verfahren umgesetzt [4, 5].

Haptische Randbedingungen

Für die Interaktion einer Person mit einem Eingabebildschirm ist die Wahrnehmungsschwelle des Tastsinns der Finger die wesentliche bestimmende physikalische Größe. Der allgemeine Oberbegriff Tastsinn schließt die Fähigkeit ein, Berührungen wahrzunehmen. Entsprechend der Vielzahl unterschiedlicher Mechanorezeptoren der Finger, die für bestimmte mechanische Reize (Druck, Dehnung, Vibration, Berührung) sensitiv sind, wird in die statische (taktile) und dynamisch aktive (haptische) Wahrnehmung differenziert [6].

Die Reizschwelle der aktiven Wahrnehmung, d.h. bei Bewegung des Fingers über eine glatte Oberfläche liegt bei Rauigkeiten bzw. Erhebungen von ca. $> 1 \mu\text{m}$. Die taktile Wahrnehmung für unbewegte Höhenunterschiede auf der Oberfläche ist um ein Vielfaches kleiner und liegt im Bereich von $> 1 \text{mm}$. Folglich ist aus Sicht der benötigten mechanischen Energie für die Umsetzung einer fühlbaren Rückkopplung ein vibrierendes System vorteilhafter.

Zu den relevanten und am häufigsten vorkommenden Rezeptoren zählen langsam adaptierende Merkel-Zellen (empfindlich für anhaltende senkrechte Druckreize), Ruffini-Körperchen (empfindlich für Gewebsdehnung bzw. Scherung), schnell adaptierende Meissner-Körperchen (empfindlich für Berührung und Druckveränderungen von bis zu $1 \mu\text{m}$) und sehr schnell adaptierende Vater-Pacini-Körperchen (empfindlich für Vibration) (Bild 2).

Zusammenfassend hängt die haptisch perzeptorische Fühlschwelle der Finger von der vertikalen und horizontalen Auslenkung (akustische Energie), der Anregungsfrequenz (Wellenlänge λ) und der Form der transienten Auslenkung (Wiederholfrequenz bzw. Gradient der Auslenkung) ab. Die auf senkrechte Beschleunigungen reagierenden Vater-Pacini-Körperchen weisen ihre höchste Empfindlichkeit bei Vibrationsfrequenzen im Bereich zwischen $f = 40 \text{ Hz}$ und 300 Hz auf. Die zugehörige perzeptorische Schwelle liegt bei ca. $\Delta z > 5 \mu\text{m}$ vertikaler Auslenkung. Zudem erlauben Ruffini-Körperchen die Erfassung von transversalen Auslenkungen von ca. $\Delta x > 0,2 \mu\text{m}$. Eine kumulative explorative Bewegung des Fingers über die Oberfläche senkt durch die Meissner-Zellen zusätzlich die Fühlschwelle. Die laterale Auflösung vibrierender Fokusbereiche hängt vorrangig von der Wellenlänge bzw. Ausbreitungsgeschwindigkeit und Frequenz der elastischen Welle ab. Trotz der geringen Scher-Fühlschwelle von $\Delta x > 0,2 \mu\text{m}$ führen typische Schermoden aufgrund der hohen Ausbreitungsgeschwindigkeiten zu größeren Fokuspunkten. Folglich konzentrieren sich die vorliegenden Arbeiten auf den asymmetrischen Grundausbreitungsmode A0 mit geringer Wellenlänge.

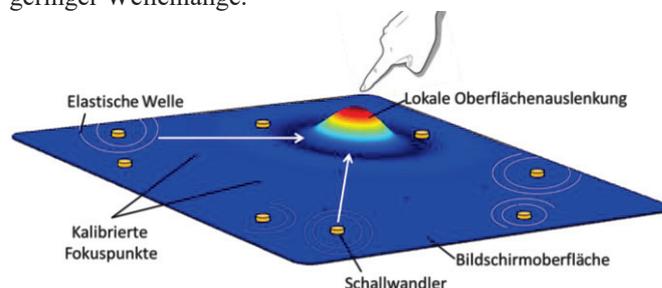


Bild 1: Schema für die vibro-haptische Interaktion in einem begrenzten Fokuspunkt auf einer Platte durch zeitliche und örtliche Überlagerung elastischer Wellen – ausgehend von einer reduzierten Anzahl von Schallwandlern.

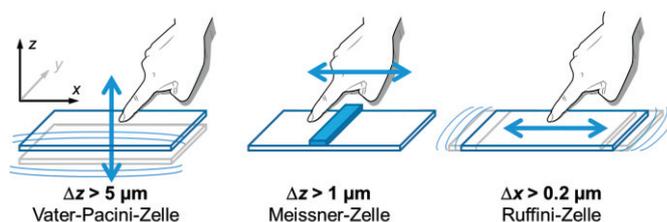


Bild 2: Einteilung der am häufigsten vorkommenden Mechanorezeptoren der Hand bzgl. der statischen (taktilen) und dynamischen (haptischen) Eigenschaften einer Oberfläche: (links) Vater-Pacini-Körperchen mit einer maximalen Sensitivität für Vibrationen senkrecht zur Hautoberfläche mit $\Delta z > 5 \mu\text{m}$ Auslenkung und einer Frequenz zwischen 40 Hz und 300 Hz ; (Mitte) Meissner-Zelle zur aktiven Erkennung von Erhebungen (Bewegung der Hand) ab $\Delta z > 1 \mu\text{m}$; (rechts) Ruffini-Körperchen zur Erfassung horizontaler Auslenkungen ab $\Delta x > 0,2 \mu\text{m}$.

Elastische Plattenwellen

Mit dem Ziel, möglichst wenige akusto-elektrische Wandler außerhalb der haptischen Interaktionsfläche einzusetzen, und vorrangig die Mehrpfadausbreitung elastischer Wellen für die Fokussierung zu nutzen, haben die elastischen und geometrischen Eigenschaften des Bildschirms wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Fokuspunkte. Typischerweise bestehen berührungsempfindliche Systeme aus Glas oder Kunststoff mit Plattendicken von 2 mm bis 5 mm [4].

Theoretisch existiert für diese Platten in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz eine unendliche Anzahl von koexistent ausbreitungsfähigen elastischen Wellenmoden deren Phasen- und Gruppengeschwindigkeiten i.d.R. frequenzabhängig sind [7]. Dementsprechend ist es für die Auslegung eines haptischen Systems auf die o.g. perzeptorischen Anforderungen essentiell, anhand der Grenzfrequenzen, Wellenlängen und vertikalen Auslenkungen eine geeignete Wellenform, wenn möglich monomodal, anzulegen.

Die Lösung der beschreibenden Rayleigh-Lamb-Differenzialgleichung [8] wird mit Hilfe der Modellierung über finite Elemente in Comsol Multiphysics 5.1 numerisch bestimmt. Diese Form der Modellierung erlaubt u.a. verschiedene Parameterstudien zur geometrischen Auslegung der Platte bzgl. einer optimierten haptischen Rückkopplung. Bild 3 (links) zeigt an einem ausgewählten Beispiel exemplarisch die Material- und Frequenzabhängige Wellenlänge an Platten mit Dicken von $d = 2$ mm. Die zugehörigen Materialparameter entsprechen Tabelle 1. Im Bereich des haptischen Empfindlichkeitsmaximums ($f = 300$ Hz) variiert, für in Tabelle 1 aufgeführte typische Materialien, die Wellenlänge des A0-Modus von $\lambda = 160$ mm bis 290 mm. Die halbe Wellenlänge kann an dieser Stelle als Richtwert für die minimal erreichbare Ausdehnung des Vibrationsfokus genutzt werden. Wobei die effektiv fühlbare Fokusbreite zusätzlich von der Fühlschwelle (Bild 3 rechts) und der eingepprägten Signalenergie abhängen.

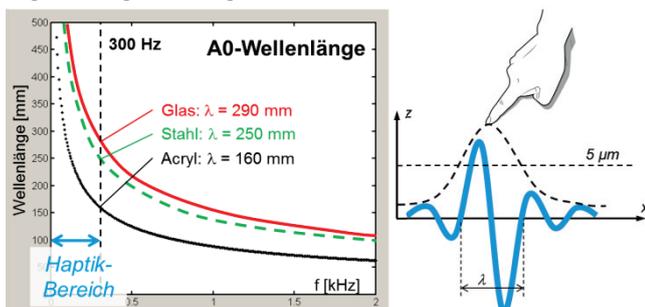


Bild 3: (links) Wellenlänge der A0-Mode für verschiedene Materialien (siehe Tabelle 1) bei gleicher Plattendicke $d = 2$ mm, (rechts) Illustration der transienten Wellenform in Relation zu Wellenlänge, Fühlschwelle und effektiver (gefühlter) Ausdehnung des Fokusbereiches.

Tabelle 1: Material Parameter ρ – Dichte, c_i – Ausbreitungsgeschwindigkeit im unendlichen Medium, E – Elastizität und μ – Querkontraktionszahl (Poisson)

| Material | ρ (kg/m ³) | $c_{\text{Long.}}$ (m/s) | $c_{\text{Trans.}}$ (m/s) | E (GPa) | μ |
|----------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------|-------|
| Acryl | 1200 | 2700 | 1200 | 4,76 | 0,38 |
| Glas | 1590 | 6790 | 4321 | 68,9 | 0,16 |
| Stahl | 7850 | 5778 | 3194 | 205 | 0,28 |

Die Anregung bei Frequenzen im Bereich der maximalen Fühlschwelle (300 Hz) erfordert die geringste einzuprägende Energie und kann somit auch mit einer geringeren Anzahl von Signalquellen realisiert werden. Auch wenn sich mit steigender Frequenz die Fokusgröße wesentlich verringern ließe, steigt die erforderliche Signalenergie aufgrund der kleineren Oberflächenauslenkung für die höheren Moden und der abnehmenden Fühlempfindlichkeit der Finger (für höhere Frequenzen) proportional an. Weiterhin entstünden durch die Abstrahlung in Luft akustisch wahrnehmbare Störsignale.

Zeitumkehr mit elastischen Wellen

Zur zeitlichen und örtlichen Fokussierung von elastischen Wellen auf Platten ausgehend von einer festen Anzahl von Schallwandlern wird das Verfahren der Zeitumkehr genutzt. Die Zeitumkehr akustischer Signale ist Gegenstand verschiedenster internationaler Forschungsaktivitäten, beginnend mit den Arbeiten von Fink [8, 9]. Entsprechende Anwendungen sind neben der Medizintechnik und zerstörungsfreien Werkstoffprüfung [10] auch bei der akustischen Lokalisierung eines Fingerklopfens auf Bildschirmen [5] zu finden. Hierfür existieren einige einfache Ansätze, wobei der inverse Prozess der Gewährleistung einer haptischen Rückkopplung bisher ungenügend umgesetzt ist [4].

Der Ansatz der Refokussierung basiert auf der Umkehrbarkeit bzw. Reziprozität akustischer Wellen zwischen zwei festen Send- und Empfangspunkten im linearen isotropen, schwach dämpfenden Medium.

Die ideale Replikation eines Quellsignals über die Zeitumkehr erfordert einen sogenannten idealen Zeitumkehrspiegel. Dieser Spiegel würde aus unendlich vielen Empfängern bestehen, die die Schallquelle vollständig umschließen und gewährleisten, dass das gesamte divergente akustische Feld aufgezeichnet wird. Die zeitliche Inversion eines jeden dieser aufgezeichneten Empfangssignale und die synchronen Aussendung würde zu einer konstruktiven örtlichen und zeitlichen Interferenz und Replikation des gesendeten Originalsignals im Punkt der ursprünglichen Quelle führen. Auf abgeschlossenen Systemen wie Platten kann der Zeitumkehrspiegel theoretisch auch mit einer reduzierten Anzahl von Empfangspunkten realisiert werden. Voraussetzung hierfür ist eine nicht dämpfende ideale Platte. In diesem Fall würden (nach bestimmter Zeit) in Folge der Mehrfachreflexionen an den Plattenrändern einer sich auf der Platte ausbreitenden Welle die Messpunkte sämtliche Signalpfade und -anteile enthalten. Durch die Dämpfung der Platte, Abstrahlungseffekten und Verlusten in den elektroakustischen Wandlern selbst, ist dieser Zeitumkehrspiegel nicht ideal realisierbar. Dennoch liefert der zweite Ansatz das Potential für technisch umsetzbare Lösungen für eine nicht-ideale Refokussierung.

Entsprechend setzt die vorliegende Arbeit auf dieses Prinzip und zeigt die Machbarkeit der Refokussierung mit einer reduzierten Anzahl von Schallquellen. Hierzu sind insbesondere die minimale Anzahl von relevanten Send- und Empfangspunkten und deren angepasste Platzierung auf der Platte zur Realisierung eines oder mehrerer Fokus gleichbleibender Qualität von Interesse.

Ergebnisse und Zusammenfassung

Numerische und empirische Studien zeigen, dass auf Plattenstrukturen die Synthese einer zeitlich und örtlich definierten Auslenkung unter Anwendung der Zeitumkehr von elastischen Wellen möglich ist. Abhängig von der eingepprägten Signalenergie und dem Plattenmaterial lässt sich der transiente Impuls für den haptisch fühlbaren Bereich von $f=300$ Hz und Auslenkungen von $\Delta z > 5$ μm realisieren. In Folge der Relation der Wellenlänge zu lateraler Fokusbreite erscheint die Umsetzung im genannten haptischen Frequenzbereich vorrangig für größere Systeme aussichtsreich. Die Optimierung der Wandleranordnung ist hierfür entscheidend: Es hat sich gezeigt, dass durch eine Gleichverteilung oder symmetrische Anordnung der Wandlergruppen ein dominantes Wellenfeldmuster entsteht, welches die Trennschärfe eines Fokus auf der Platte verschlechtert. Demgegenüber lässt sich die Auslenkungsverteilung durch eine stochastische Anordnung der Wandler homogenisieren – Bereiche mit Vorzugsauslenkungen werden unterdrückt. Zur Optimierung der Positionierung einer beliebigen Anzahl von Wandlern definierbarer Größe auf beliebigen Platten wurde in Matlab ein Optimierungsalgorithmus inklusive grafischer Ausgabe umgesetzt (siehe Bild 4). Als eines der Optimierungskriterien dient der möglichst unterschiedliche Abstand zwischen den Fokus- und Sendepunkten.

Für das Wandlernetz (Bild 4, 5 a) zeigt Bild 5 exemplarisch die Fokusqualität für eine Platte aus Kunststoff mit einem Raster aus 9 möglichen Fokuspunkten unter Berücksichtigung einer optimierten zufälligen Anordnung der Quellpunkte. Bereits mit einer Anzahl von 8 Quellpunkten lässt sich ein geforderter (idealer) senkrechter Verschiebungsimpuls (Bild 5 b) mit perzeptorisch hinreichender Qualität nachbilden (Bild 5 c). Für diese zufällige Anordnung der Wandler liefert eine virtuelle Kalibrierung mit Hilfe numerischer Vorwärtssimulationen geeignete Datensätze zur Erzeugung haptischer Impulse in arbiträren (kalibrierten) Fokuspunkten. Die Ausdehnung des Fokusbereiches ist dabei abhängig von der Wellenlänge.

Entsprechend den numerischen und empirischen Ergebnissen wurde ein Demonstrator entsprechend der Dimensionen der Kunststoffplatte gemäß Bild 5 realisiert (Bild 6), der die reproduzierbare Synthese frei verschiebbarer Vibrationszentren (Fokuspunkte) bei unterschiedlichen Frequenzen zulässt. Die Quellpunkte bilden lose mit der Platte gekoppelte Körperschallwandler für den akustischen Bereich. Dieser „robuste“ Messaufbau ermöglichte die Durchführung einer auswertbaren Studie mit einer größeren Anzahl von Testpersonen. Im Rahmen der Studie mussten die Testpersonen verschiedene Fokuspunkte auf der Platte erkennen und bzgl. des subjektiven Empfindens bewerten (Tabelle 2).

Die Auswertung der Studie (Tabelle 2) hat ergeben, dass für das Verfahren eine hohe Akzeptanz (84%) vorhanden ist und entsprechend der Anpassung an die Fühlschwelle der menschlichen Hand auch eine „blinde“ Erkennung des Vibrationszentrums von 94% der Testpersonen unabhängig vom Alter und vom bisherigen Umgang mit berührungssensitiven Bildschirmen bestätigt wurde. Bei 50% der Testpersonen betrug die räumliche Abweichung des von

der jeweiligen Person subjektiv empfundenen Vibrationszentrums zum realen Vibrationszentrum weniger als 20 mm (vgl. Bild 7). Dieser Wert entspricht der für die Polystyrolplatte erwarteten Wellenlänge.

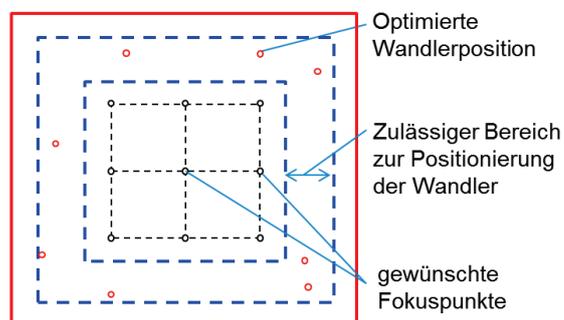
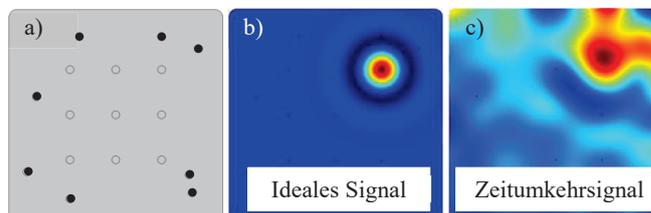


Bild 4: Grafische Ausgabe des algorithmischen Matlab-Plattenmodells zur Optimierung der Position der Sensorknoten.



- Wandler (Quellpunkte) mit zufälliger Verteilung
- Fokuspunkte

Bild 5: (a) Modell einer Kunststoffplatte (700 mm \times 700 mm \times 2 mm) mit 8 zufällig verteilten Wandlern und 9 regulär verteilten Fokuspunkten; (b) 2D-Verteilung einer idealen lokalen Auslenkung; (c) reale Auslenkung im Fokuspunkt zum Zeitpunkt der Zeitumkehr und (d) Vergleich der Auslenkungen in allen 9 Fokuspunkten über der Zeit.

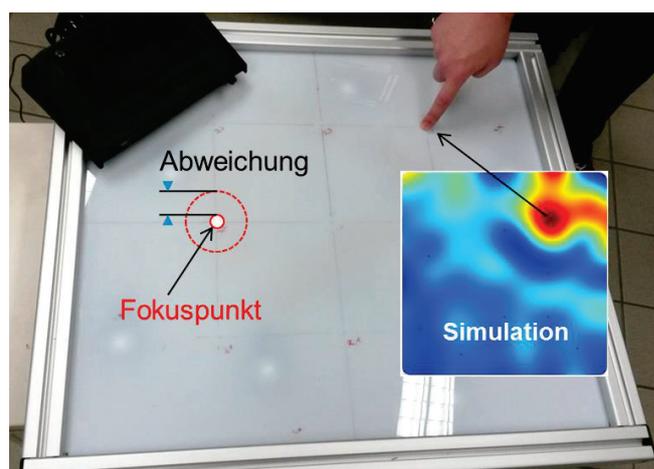


Bild 6: Demonstrator bestehend aus einer in Aluminiumprofilen eingefassten Kunststoffplatte (700 mm \times 700 mm \times 2 mm) mit 8 zufällig (nach Bild 6-6 a) verteilten von unten an die Platte gekoppelten Körperschallwandlern sowie einem 8-Kanal-Audio-Sender mit integriertem Speicher.

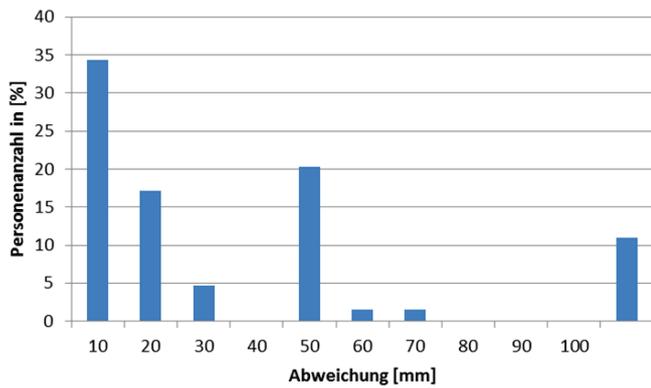


Bild 7: Örtliche Abweichung des subjektiv gefühlten Maximums des elastischen Impulses vom realen Fokuspunkt.

Tabelle 2: Akzeptanzstudie mit einer ausgewählten Anzahl von Testpersonen

N = 64 gewertete Personen

| Altersverteilung | | | |
|------------------|--------|--------|-----|
| <20 | 20..40 | 41..60 | >61 |
| 40% | 36% | 22% | 2% |

| Mir gefällt das Konzept | |
|-------------------------|------|
| ja | nein |
| 84% | 3% |

| Intensitätsempfinden am Fokuspunkt | | | | |
|------------------------------------|---------|-----------|----------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| kaum | schwach | erkennbar | deutlich | stark |
| 1,5% | 22% | 33% | 31% | 12% |

| Erfahrungen mit Touchscreens | |
|------------------------------|------|
| ja | nein |
| 75% | 22% |

Nutzerinteraktion:
Fokuspunkt erkannt
94%
davon 50% mit einer Abweichung zum realen Fokus von weniger als 20 mm (vgl. Bild 6-20)

Literatur

- [1] O. Bau et al., "TeslaTouch: Electro-vibration for Touch Surfaces", *UIST 2010: ACM*, pp. 283-292 (2010)
- [2] Yvonne Jansen et al., "MudPad: localized tactile feedback on touch surfaces", *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, October 03-06, 2010, NY, USA
- [3] Hudin, C.; Lozada, J.; Hayward, V., "Localized Tactile Feedback on a Transparent Surface through Time-Reversal Wave Focusing," in *Haptics, IEEE Transactions on*, vol.8, no.2, pp.188-198, April-June 1 2015
- [4] Bai MR, Tsai YK., Impact localization combined with haptic feedback for touch panel applications based on the time-reversal approach. *J Acoust Soc Am.* 2011 Mar; 129(3):1297-305. doi: 10.1121/1.3533725.
- [5] Ros Kiri Ing and Mathias Fink, In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process, *APL*. 87, 204104 (2005);
- [6] HH King, R Donlin, B Hannaford, Perceptual thresholds for single vs. multi-finger haptic interaction – *Haptics Symposium*, 2010
- [7] Cremer, L.; Heckl, M.: *Körperschall. Physikalische Grundlagen und technische Anwendungen*. Springer-Verlag 1996. ISBN 3-540-54631-6
- [8] M. Fink, Time-Reversal of Ultrasonic Fields-Part I: Basic principle, *IEEE Trans. UFFC* 39(5), 555-566 (1992); doi: 10.1109/58.156174
- [9] Ros Ki Ing, and Mathias Fink, Time reversal interactive objects, *J. Acoust. Soc. Am.* 115, 2589 (2004)
- [10] N. Chackroun, M. Fink, F. Wu, Time-reversal processing in non-destructive testing, *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr.* 42 (6), 1087-1098 (1995); doi: 10.1109/58.476552

Wir danken für die Förderung des Projektes durch das BMBF, Fördernummer 16SV7104.