

# Ortsaufgelöstes haptisches Feedback für Touch-Displays

Michael Simon<sup>1</sup>, Sebastian Wöckel<sup>2</sup>, Ulrike Steinmann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, Institut für Automatisierungstechnik, Lehrstuhl Messtechnik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, E-Mail: [ulrike.steinmann@ovgu.de](mailto:ulrike.steinmann@ovgu.de)

<sup>2</sup> 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](mailto:sebastian.woeckel@ifak.eu)

## Motivation und Zielstellung

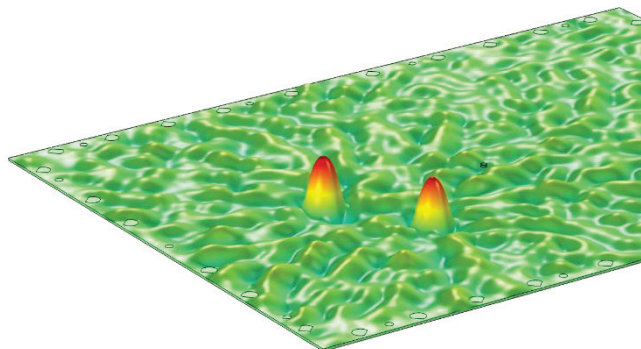
Touch-Displays nehmen heute im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion einen hohen Stellenwert ein. Sie bieten im Einsatz zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen Eingabemethoden, ob in der Industrie und Medizin, im Office oder im Bereich des Gaming und Learning. In einigen Anwendungsfällen fehlt es jedoch an Akzeptanz aufgrund von fehlendem haptischen Feedback auf den üblicherweise glatten Oberflächen wie Glas oder Acrylglas (PMMA).

Ziel der Forschungsarbeiten ist die Realisierung einer kostengünstigen Lösung zur Integration von kraftbasiertem haptischen Feedback mittels Zeitumkehr akustischer Wellen in Touch-Displays und die Entwicklung einer skalierbaren numerischen Kalibrierungsmethode zur Einrichtung verschiedener Geräte über Datenbanken.

In Abgrenzung zu konventionellen Methoden wie die Verwendung von (a) Unwucht-Motoren, welche nur eine unspezifische Rückkopplung über die Oberfläche oder das Gerät gewährleisten und eine gewisse Geräuschemission hervorrufen oder (b) die Verwendung von Linearmotoren, welche lediglich eine laterale Kraftwirkung zulassen, bietet die Methode der Zeitumkehr besondere Vorteile. Das ortsaufgelöste Fokussieren unterschiedlicher Signale ermöglicht dem Benutzer das Fühlen von Kräften und unterschiedlicher Oberflächenbeschaffenheit sowie die Wahrnehmung von Position und Gestalt virtueller Objekte auf dem Display. Die Zielerfassung verbessert sich aufgrund der haptischen Rückkopplung um ein Vielfaches und ermöglicht eine intuitive Interaktion ohne visuelle Rückkopplung. Der Fokussierungsprozess ist dabei nicht auf eine Signalfrequenz oder eine Position (lokal) begrenzt und unterstützt somit „Finger-Multitouch“. (vgl. Abbildung 1)

Als praxisrelevant und gegenwärtig nicht zufriedenstellend gelöst sind u.a. die Realisierung und Zuverlässigkeit von hoher Auflösung und starkem Kontrastverhältnis. Gleichzeitig müssen Knotenlinien (Bereiche mit vermindertem Effekt), Störimpulsen (spürbare Amplituden außerhalb des Fokussierungsbereiches und -zeitfensters) und Geräuschemission vermieden bzw. vermindert werden.

In diesem Beitrag werden konkret Aspekte der Simulation und Optimierung von ortsaufgelöstem, kraftbasiertem haptischen Feedback mit dem methodischen Ansatz der Zeitumkehr akustischer Wellen bei limitierter Anzahl von Transducern aufgegriffen. Untersucht werden variierende Anzahl und räumliche Anordnungen der Schallwandler, verschiedene Anregungssignalformen bei Kalibrierung von Zielpositionen (time forward), optimale



**Abbildung 1:** Simulationsergebnis zweier örtlich und zeitlich begrenzter Oberflächenauslenkung durch Fokussierung überlagert vibroakustischer Wellen (Superposition).

Signallängen bei Rekonstruktion (time reverse) sowie Superpositionierung (Multitouch) der Feedbacks. Ziel ist es eine hohe Auflösung sowie ein hohes Kontrastverhältnis zu gewährleisten und unerwünschte Störimpulse sowie Schallemission zu vermeiden.

## Grundlagen und Methodik

### Menschliche Wahrnehmung

Bei Berücksichtigung menschlicher Wahrnehmungsschwellen der Haut (Mechanorezeptoren) sind Feedbacks mit Amplituden über  $5 \mu\text{m}$  für statisches Empfinden erforderlich. Die maximale Sensitivität für dynamische Auslenkungen (Vibration) liegt bei ca. 200-300 Hz [1]. Durch Erhöhung der Frequenz dynamischer Feedbacks über 800 Hz und ausreichend starker Amplitude über  $5 \mu\text{m}$ , wäre das Nachempfinden quasistatischer Objekte auf dem Display möglich.

### Akustische Zeitumkehr

Abbildung 2 zeigt ein Schema der akustischen Zeitumkehr linearer Übertragungssysteme. Sie ist ein physikalischer Vorgang, bei dem ein diskreter Satz von Wandlern ein aufgezeichnetes oder berechnetes Signal zurück zur Quelle ausstrahlt [2], [3], [4]:

- Quellenseitige Schallemission (1)
- Aufzeichnung der Signale durch Wandlerarray über Zeitspanne  $\tau$  (2)
- Zeitinvertierte Re-Emission der Signale durch Wandlerarray (3)
- Interferenz der Signale am Ursprungsort (Quelle) nach Zeitspanne  $\tau$  (4)

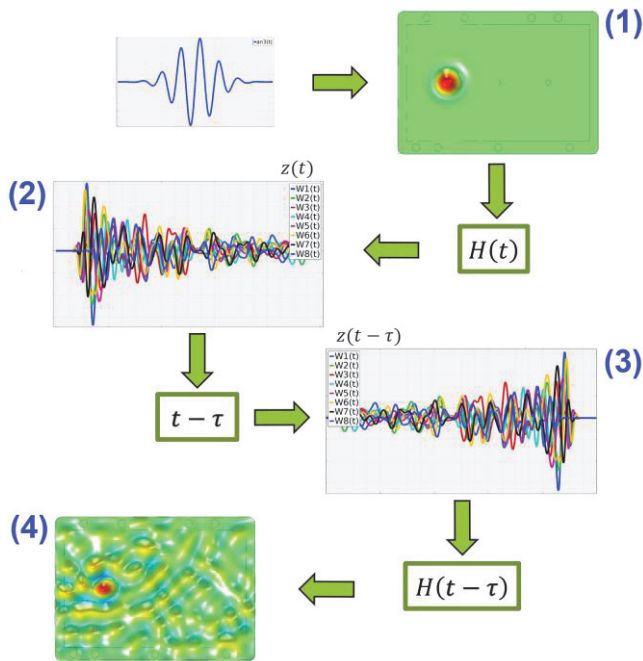


Abbildung 2: Schema der akustischen Zeitumkehr linearer Übertragungssysteme.

**Amplitudenmodulation**

Abbildung 3 zeigt das Schema der Amplitudenmodulation und einige Kenngrößen des idealen, dynamischen haptischen Feedbacks. Durch Ausnutzen von Resonanzfrequenzen und Eigenmoden der Transducer bzw. Platten kann die Auslenkung des rekonstruierten Signals und die Energieeffizienz optimiert sowie Schallemission vermieden werden.

Das Trägersignal entspricht Sinusschwingungen, dessen Frequenz bei der Resonanzfrequenz des Transducer bzw. der Platte (idealerweise beider Systeme) gewählt wird. Sie beträgt ungefähr  $f_M = 30 \dots 50$  kHz. Die Hüllkurve des Trägersignals bildet einen Gauß-Puls mit einer Frequenz zwischen  $f_H = 200 \dots 300$  Hz (maximaler menschlicher Sensitivitätsbereich).

**Analyse der Einflussfaktoren auf räumlich fokussierte Rayleigh-Lamb-Wellen (Plattenwellen / Biegewellen)**

Gegenstand der Untersuchungen sind zwei (in Dimensionierung und Werkstoff) unterschiedliche Platten für zwei Beispielanwendungen:

- Glas (238x168x0,7)mm → Smartphone bzw. Tablet
- Acrylglas (PMMA) (940x722x3)mm → Tisch bzw. Pult

Untersucht werden Anregungssignalformen (time forward) wie:

- Gauß-Puls
- Differentieller Gauß-Puls
- Amplitudenmodulierter Gauß-Puls (Sinus-Burst).

Dabei werden unterschiedliche Einflussfaktoren wie:

- Anzahl der Schallwandler (8 bis 32)

(\*) Wahrnehmungsschwelle Oberflächenauslenkung ( $\Delta z \geq 5 \mu\text{m}$ )  
 (\*\*) Haptische Sensitivität (200-300 Hz)

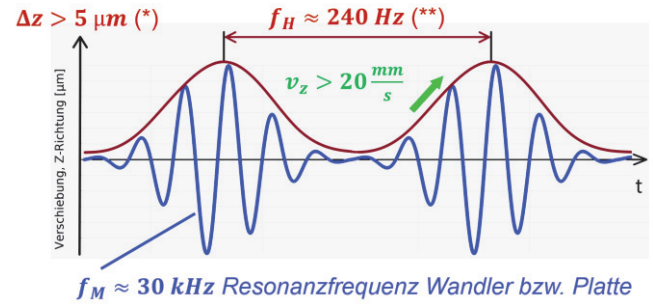


Abbildung 3: Kenngrößen des idealen, dynamischen haptischen Feedbacks.

- Randnahe Positionierung der Schallwandler (symmetrisch bzw. asymmetrisch mit Variation der Koordinaten)
- Länge des Rekonstruktionssignals (time reverse) (Ansprechverhalten und Arbeitsbereich)
- Variation der Koordinaten und Anzahl der Fokuspunkte (bis zu 4 Feedbacks simultan)

auf die räumlich fokussierten Rayleigh-Lamb-Wellen (Plattenwellen / Biegewellen) analysiert.

Zur Bewertung der rekonstruierten Signale wird unter anderem die maximale Auslenkung der Oberfläche, die flächige Ausdehnung (Durchmesser) des Feedbacks und der Scheitelfaktor  $k_S$  (Crest-Faktor) herangezogen. Die Ausdehnung wird dabei hauptsächlich durch die material- und frequenzabhängige Wellenlänge  $\lambda$  bestimmt. Der maximale Durchmesser (unter Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwelle  $\Delta z > 5 \mu\text{m}$ ) für elastische Biegewellen errechnet sich zum Beispiel zu:

$$d_F \leq \frac{\lambda}{2} \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

mit:

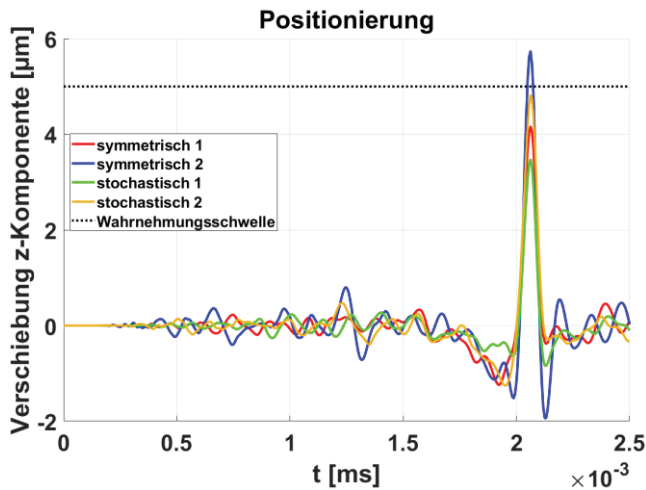
$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

Der Scheitelfaktor dient der Bewertung des Kontrastverhältnisses und vergleicht den Spitzenwert der Amplitude gegenüber dem Effektivwert des restlichen Signals.

$$k_S = \frac{z_{max}}{z_{eff}} \quad [\text{mm}] \quad (3)$$

**Simulation**

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Simulationssoftware „COMSOL Multiphysics 5.3a“ wurden 3D-Modelle der zwei Untersuchungsobjekte erstellt. Die benötigten Materialdaten wurden entsprechenden Datenblättern von Herstellern für PMMA- bzw. „Gorilla Glass“-Scheiben entnommen. Das Einleiten der Signale erfolgt über erzwungene Oberflächenverschiebungen. Die Simulation unterstützt somit gegenwärtig keine kraftbasierte Implementierung der Schallwandler. Aufgrund von derzeit unbekanntem



**Abbildung 4:** Simulation und Optimierung verschiedener Positionierungsstrategien bei 8 Wandler am Rand einer PMMA-Platte, Anregung Gauß-Puls, Signallänge 2,15 ms → Steigerung der maximalen z-Verschiebung um ca. 65 %.

Dämpfungsparametern der Untersuchungsobjekte ist in der Simulation eine Dämpfung in Form von schwach reflektierenden Rändern (mechanische Impedanz 50 %) implementiert. Die Berechnungen erfolgen durch mehrstufige zeitabhängige Studien.

## Ergebnisse

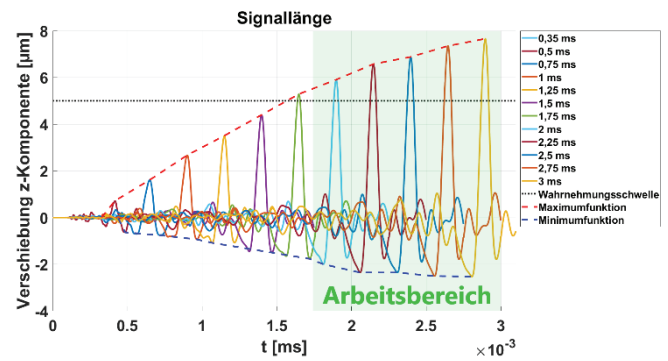
### Positionierung

Ein großes Optimierungspotenzial für die maximale Amplitude des rekonstruierten Signals ergibt sich durch gezielte, randnahe Verteilung der Transducer. Abbildung 4 zeigt beispielhaft den Vergleich der Simulationsergebnisse zweier asymmetrischer (stochastischer) und zweier symmetrischer Anordnungen von 8 Wandlern am Rand einer PMMA-Platte. Die Kalibrierung (time forward) erfolgte durch eine Gauß-Puls der Länge  $t = 0,16$  ms mit einer maximalen Amplitude von  $\Delta z = 10$   $\mu\text{m}$ . Die Schwingungsverläufe wurden für  $\tau = 2,15$  ms aufgezeichnet und zeitinvertiert re-emittiert. In Referenz zum schlechtesten Simulationsergebnis der Reihe wurde hier eine Steigerung der maximalen z-Verschiebung um ca. 65 % erzielt. Es zeigt sich:

- Symmetrische Anordnungen begünstigen größere maximale Amplituden der Feedbacks, begünstigen jedoch auch das Vorhandensein bzw. die Ausprägung von Knotenlinien.
- Asymmetrische Anordnungen reduzieren das Vorhandensein bzw. die Ausprägung von Knotenlinien bei Einbußen der maximalen Auslenkung.

**Tabelle 1:** Vergleich unterschiedlicher Positionierungen

Positionierung	Parameter	
	$z_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$k_s$
symmetrisch 1	4,16	7,05
symmetrisch 2	5,74	7,26
asymmetrisch 1	3,47	7,54
asymmetrisch 2	4,82	7,19



**Abbildung 5:** Simulationsergebnisse verschiedener Signallängen bei 8 Wandlern am Rand einer PMMA-Platte, Anregung Gauß-Puls → Erforderliche Mindestsignallänge  $t_{min} \geq 1,75$  ms.

### Länge des Rekonstruktionssignals (time reverse)

Die Länge des aufgezeichneten und zeitinvertierten Rekonstruktionssignals bestimmt unmittelbar über die Ansprechzeit des Systems sowie über die Qualität des haptischen Feedbacks. Durch längeres Aufzeichnen der Schwingungsverläufe auch nach Reflexion an den Plattenrändern stehen mehr „Informationen“ zur Rekonstruktion des Quellsignals zur Verfügung (Prinzip virtuelle Quellen) [3], [4].

- Lange Signale begünstigen eine hohe maximale Auslenkung und ein hohes Kontrastverhältnis. Die Anzahl der benötigten Schallwandler reduziert sich.
- Kurze Signale verbessern die Ansprechzeit des Systems nach dem Fingertracking ( $\leftrightarrow$  smarte Endgeräte) und erhöhen die Dynamik bei geringerem Leistungsbedarf.

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Simulationsergebnisse verschiedener Signallängen bei 8 Wandlern am Rand einer PMMA-Platte. Die Kalibrierung erfolgte mit einem Gauß-Puls der Länge  $t = 0,16$  ms und einer maximalen Oberflächenverschiebung von  $\Delta z = 10$   $\mu\text{m}$ . Der mögliche Arbeitsbereich des Systems wurde im Diagramm gekennzeichnet. Er ist definiert durch:

- die untere Grenze  $t_{min} \geq 1,75$  ms (Signallänge bei der das Feedback die Wahrnehmungsschwelle überschreitet) und
- die obere Grenze  $t_{max} \leq 3$  ms (Begrenzung durch Anforderung an Ansprechverhalten).

Für die Glasplatte ergibt sich bei gleicher Anregung ein Arbeitsbereich von:

- $1,25 \leq t \leq 3$  ms.

Zu erkennen ist weiterhin, dass die Steigerung der maximalen Auslenkung des Feedbacks bei wachsender Signallänge asymptotisch gegen ein Maximum verläuft.



**Tabelle 2:** Vergleich unterschiedlicher Signallängen hinsichtlich erreichbarer Oberflächenauslenkung und Crest-Faktor am Fokuspunkt

Signallänge [ms]	Parameter	
	$z_{max}$ [ $\mu m$ ]	$k_s$
0,35	0,05	2,89
0,50	0,72	3,20
0,75	1,61	3,80
1,00	2,67	4,66
1,25	3,50	5,26
1,50	4,39	5,59
1,75	5,29	5,86
2,00	5,90	6,22
2,25	6,58	6,38
2,50	6,88	6,67
2,75	7,35	6,97
3,00	7,66	7,20

### Superposition simultaner Feedback

Unter Annahme der Linearität des Systems gilt das Superpositionsprinzip. Der Fokussierungsprozess der Feedbacks ist somit nicht auf eine Signalform und/oder eine Position (lokal) begrenzt. Durch additive Überlagerung der Rekonstruktionssignale (einmalig) kalibrierter Fokuspunkte kann die Unterstützung von „Finger-Multitouch“ (Aktivierung simultaner Feedbacks an unterschiedlichen Fokuspunkten) auf einfache Weise realisiert werden.

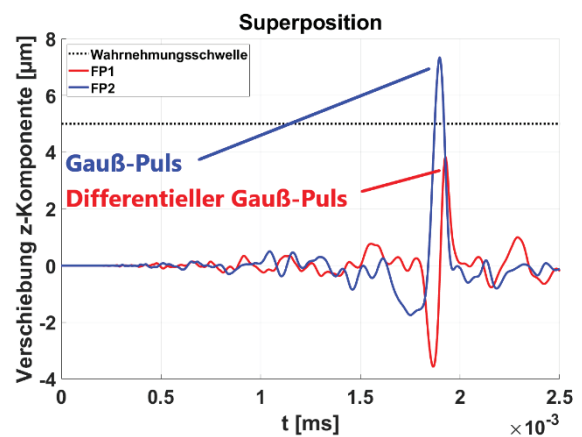
Zudem besteht die Möglichkeit der Entwicklung einer skalierbaren numerischen Kalibrierungsmethode zur Einrichtung verschiedener Geräte über Datenbanken, was ein aufwendiges Kalibrieren aller Einzelpositionen für jedes Einzelgerät erspart. Generell muss anhand der Ergebnisse festgestellt werden, dass es durch das Überlagern mehrerer Einzelsignale zu einem erhöhten Energieeintrag in die Platte kommt, womit das Risiko unerwünschter Störimpulse steigt.

Abbildung 6 zeigt beispielhaft ein Simulationsergebnis nach Superposition zweier unterschiedlicher Rekonstruktionssignale an zwei unterschiedlichen Fokuspunkten (FP1/FP2). Die Simulation erfolgte mit 32 Wandlern am Rand einer PMMA-Platte. Die Kalibrierung des Fokuspunkt 1 erfolgte durch einen differentiellen Gauß-Puls mit einer Amplitude von  $\Delta z = \pm 8 \mu m$ . Die Kalibrierung des Fokuspunkt 2 erfolgte durch einen Gauß-Puls mit einer maximalen Amplitude von  $\Delta z = 12 \mu m$ . Die Schwingungsverläufe wurden jeweils für  $\tau = 2$  ms aufgezeichnet und zeitinvertiert re-emittiert. Bisher konnten bis zu 4 simultane Feedbacks (identische und verschiedene Signalformen) störimpulsfrei simuliert werden.

### Zusammenfassung & Ausblick

Der vorliegende Beitrag behandelt Aspekte der Simulation und Optimierung von ortsaufgelöstem, kraftbasierten haptischen Feedback mit dem methodischen Ansatz der Zeitumkehr.

Parameter wie Anzahl und Anordnungen der Schallwandler, Anregungssignalformen, Signallängen bei Rekonstruktion



**Abbildung 6:** Simulationsergebnis nach Superposition zweier unterschiedlicher Rekonstruktionssignale an zwei unterschiedlichen Fokuspunkten mit 32 Wandlern am Rand einer PMMA-Platte, Signallänge 2 ms.

sowie die Durchführbarkeit der Superpositionierung von Signalen unterschiedlicher Fokuspunkte (Multitouch), wurden hinsichtlich Auflösung, Kontrastverhältnisses und das Auftreten von Störimpulse untersucht.

Es zeigen sich Vor- und Nachteile asymmetrischer bzw. symmetrischer Anordnung in Bezug auf maximaler Oberflächenauslenkung und Knotenlinien. Durch die Simulationen konnte der Arbeitsbereich für eine technische Umsetzung der Beispielanwendungen definiert und die Anzahl der benötigten Transducer abgeschätzt bzw. minimiert werden. Die Simulationen zeigen auch, dass das Aktivieren simultaner Feedbacks an unterschiedlichen Fokussierungspunkten und somit das Unterstützen von „Finger-Multitouch“ theoretisch realisierbar ist.

Ebenfalls Gegenstand aktueller und kommender Forschungsarbeiten sind Untersuchungen und Optimierungen zur erreichbaren Dynamik der Feedbacks, das Implementieren virtueller Schallwandler in die Simulation sowie die Analyse und Implementierung der materialspezifischen Dämpfungsparameter zur verbesserten Abbildung messtechnisch zu erwartender Effekte.

### Literatur

- [1] Wöckel, S., Steinmann, U., Arndt, H.: Modelling of time reversal for localized tactile feedback on displays, *Procedia Engineering* 120 (2015), 302 - 305
- [2] Fink, M.: Time-Reversal of Ultrasonic Fields - Part I: Basic Principles, *IEEE Trans. UFFC* 39(5) (1992), 555-566; doi: 10.1109/58.156174
- [3] Ing, R. K., Quieffen, N., Catheline, S., Fink, M.: In solid localization of finger impacts using acoustic time-reversal process, *APL*. 87, 204104 (2005)
- [4] Hudin, C., Lozada, J., Hayward, V.: Localized Tactile Stimulation by Time-Reversal of Flexural Waves: Case Study With a Thin Sheet of Glass, *Proceedings of the World Haptic Conference* (2013), 67-72