

Dynamisches haptisches Feedback für Multi-Touch-Interaktionen

Falco Edner¹, Ulrike Steinmann¹

*¹Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Automatisierungstechnik,
Lehrstuhl Messtechnik, Universitätsplatz 2, 39106 Magdeburg, Deutschland
falco.edner@ovgu.de*

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird das Fokussierverhalten von elastischen Wellen in Platten durch akustische Zeitumkehr diskutiert, mit dem Ziel, mehrfache zeitlich und räumlich veränderliche taktile Anregungen auf einer Multi-Touch-Oberfläche (ebene Platte 720x920x3 mm, PMMA) zu erzeugen. Die grundlegenden Prinzipien und Vorgehensweisen zur Erzeugung von definierten taktilen Impulsen auf der Bedienoberfläche werden in dem Beitrag dargelegt. Es wird der jeweilige Fokuspunkt bezüglich seiner vertikalen Auslenkung und lateralen Auflösung bewertet. Zudem wird die Fokusqualität in Abhängigkeit von zeitlich gekürzten, re-emittierten Anregungssequenzen untersucht. Weiterhin werden Verfahren zur Amplitudenerhöhung einzelner Fokuspunkte aufgezeigt und im Hinblick auf die limitierte Anzahl der verwendeten Schallwandler ein Augenmerk auf das erreichbare Kontrastverhältnis gelegt.

Keywords: Haptik, Zeitumkehr-Fokussierung, Taktiler Display, haptische Interaktion

Einleitung

In diesem Artikel wird die Zeitumkehr-Technik (engl. time reversal, TR) genutzt, um auf einer Multi-Touch-Oberfläche eine taktile Rückmeldung an den Nutzer bereit zu stellen. Die Verwendung der TR-Methode bietet eine zusätzliche Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeit für graphische Anzeigen oder Steuerungskonsolen, da auf der Oberfläche taktile Signale generiert werden können [1]. Ein weiterer Vorteil besteht bei der Zeitumkehr darin, dass die Wandler nicht im Interaktionsbereich des Nutzers angebracht werden müssen und somit die transparente Oberfläche für die Projektion frei bleibt. Zudem ermöglicht es das TR-Verfahren, orts aufgelöst für mehrere Finger gleichzeitig, verschiedene Anregungen zu generieren. Die aktuellen Techniken zur taktilen Oberflächeninteraktion bieten diese Möglichkeit nicht, da sie die gesamte Struktur mittels Vibrationsmotoren stimulieren [2–4] oder durch Erzeugung von stehenden Körperschallwellen die Reibung zwischen Finger und der Oberfläche ändern [5–7]. Ebenso sind diese Verfahren für eine Interaktion mit mehreren Fingern ungeeignet. Die durch Fink [8] eingeführte TR-Technik der Fokussierung beliebiger Wellen in komplexen Medien überwindet zudem das dispersive Verhalten der dünnen Platte.

Ziel der Arbeit ist es, auf einer etwa 0,66 m², 3 mm starken Kunststoffplatte eine lokale und zeitlich variierbare taktile Rückmeldung zu

generieren. Experimentell werden hierbei die entstehenden BiegeWellen untersucht, da diese Verschiebungen aus der ebenen Oberfläche erzeugen und entscheidend für die für die taktile Wahrnehmung sind.

Prinzip

Die Zeitumkehrfokussierung von elastischen Wellen in Platten beruht üblicherweise auf zwei Abschnitten. Im ersten Schritt (Kalibrierung) wird in einem definierten Punkt A auf der Platte ein Impuls erzeugt und mittels einer festgelegten Anzahl von Wandlern, die sich bspw. am Rand der Platte befinden, die Verschiebungen aus der Ebene durch Ausbreitung und Nachhall der Plattenschwingungen innerhalb einer Zeitspanne T gemessen. Das dadurch aufgenommene Signal eines jeden Wandlers i (W_i) enthält die Impulsantwort $h_{AW_i}(t)$ zwischen der Quelle im Punkt A und den einzelnen Wandlern W_i . Im zweiten Schritt wird die aufgenommene Impulsantwort eines jeden Wandlers zeitumgekehrt $h_{AW_i}(T-t)$ und als Spannungssignal wieder an den jeweiligen Wandler zurückgespeist. In Folge der akustischen Emission erfolgt eine Re-Fokussierung der elastischen Wellen im Punkt A zu der Zeit $t = T$.

Diese Vorgehensweise ist auf den ersten Blick recht einfach, jedoch erweist sie sich in der Praxis als anspruchsvoll im Hinblick auf die i-

fach wiederholte Erzeugung des mechanischen Impulses während der Kalibrierung des Fokuspunktes. Eine alternative Methode verwendet daher die Reziprozität der genutzten Signale. Dieses Prinzip beruht darauf, dass die Umkehrung des ausgesendeten und aufgenommenen Signals das gleiche Impulsantwortsignal liefert und somit $h_{AW_i}(t) = h_{W_iA}(t)$ ist. Daher kann der Aufnahmeschritt auch dahingehend erfolgen, dass ein elektrischer Impuls $v_{W_i}(t)$ an den jeweiligen Wandler W_i gesendet wird und gleichzeitig die Verschiebung $u_{A_i}(t)$ am gewünschten Fokuspunkt A gemessen wird. Diese Verschiebungsmessung kann zum Beispiel mittels Laserdopplervibrometer *LDV* oder Beschleunigungssensor gemessen werden. Um die eingebrachte Energie in das System und damit auch den Signal-Rauschabstand SNR zu erhöhen, wird der elektrische Impuls mit einem breitbandigen Signal wie dem weißen Rauschen oder einem Sinus-Chirp ersetzt. In Abb. 1 ist exemplarisch dieser Vorwärtsschritt abgebildet, indem ein Sinus-Chirp-Signal $v_{W_1}(t)$ auf den Aktor 1 gegeben und gleichzeitig mittels *LDV* die Verschiebung $u_{A_1}(t)$ am Punkt A aufgenommen wird.

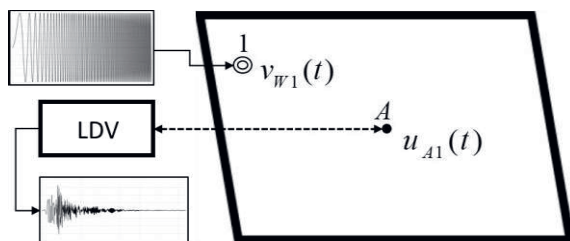


Abb. 1: Vorwärtsschritt mittels Chirp und gleichzeitiger Aufnahme der Verschiebung am späteren Fokuspunkt

Ein weiterer Schritt bei der Signalerzeugung nutzt die Tatsache aus, dass die Impulsantwort $h_{AW_i}(t)$ die inverse Fourier-Transformierte der Übertragungsfunktion $H_{AW_i}(\omega)$ ist. Das Verhältnis aus der gemessenen Verschiebung $U_{A_i}(\omega)$ und dem Spannungssignal am Aktor $V_{W_i}(\omega)$ bildet im Frequenzbereich die Übertragungsfunktion $H_{AW_i}(\omega) = \frac{U_{A_i}(\omega)}{V_{W_i}(\omega)}$. Mittels der inversen Fourier Transformation F^{-1} ergibt sich für die Impulsantwort $h_{AW_i}(t) = F^{-1}(H_{AW_i}(\omega))$. Im Folgenden wird die Impulsantwort $h_{AW_i}(t)$ des jeweiligen Wandlers W_i zeitunggekehrt $h_{AW_i}(T-t)$, wobei die

Impulsantwort für jeden Wandler und Kalibrierungspunkt individuell zu bestimmen ist. Daraufhin wird, wie in Abb. 2 dargestellt, von allen Aktoren gleichzeitig die jeweils bestimmte Impulsantwort ausgesendet, woraufhin eine Refokussierung $u_{FPA}(t)$ am kalibrierten Punkt A erfolgt.

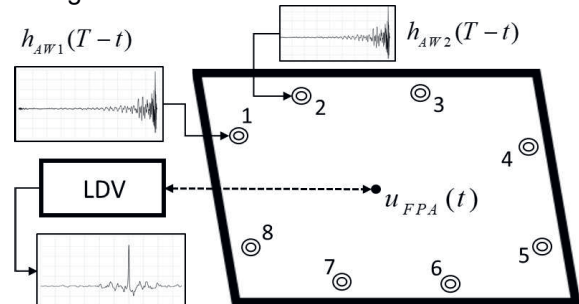


Abb. 2: Fokussierung mit simultaner Aussendung der Signale (hier exemplarisch für 2 der 8 Wandler)

Taktile Rückmeldung durch Vibration

Bei der Nutzerinteraktion mit der Eingabeoberfläche muss eine Empfindungsschwelle überwunden werden, um eine haptische Berührung wahrzunehmen. Haptik beschreibt die Wahrnehmung von mechanischen (taktil und kinästhetisch), thermischen und nozizeptorischen (schmerzhaften) Sinneseindrücken über die sensorischen sowie motorischen Fähigkeiten in der Haut, Gelenken, Muskeln und Sehnen. Für die hier avisierte Rückmeldung via Multi-Touch-Oberfläche werden die taktilen Rezeptoren, bestehend aus Merkelzellen, Ruffini-Körperchen, Meissner-Körperchen und Vater-Pacini-Körperchen in den äußeren Hautschichten genutzt, die mechanische Spannungen und Dehnungen in der Haut registrieren [9]. Dies wird demnach im Folgenden als taktile Rückmeldung bezeichnet. Dafür spielen unterschiedliche Parameter eine entscheidende Rolle: Um eine spürbare Rückmeldung für die Finger auf der Oberfläche zu erzeugen, muss nicht nur eine minimale Amplitude erreicht werden, sondern auch deren Abhängigkeit von der Frequenz, bei der der Fokuspunkt eine Vibration vollzieht, berücksichtigt werden (frequenzabhängige Wahrnehmungsschwelle). Die hier relevanten Rezeptoren sind a) Meissner-Körperchen, die eine maximale Empfindlichkeit im Bereich von 10-30 Hz besitzen, wobei eine minimale Amplitude von 5 μm für die Wahrnehmung benötigt wird. Im Fall der b) Vater-Pacini-Körperchen, deren maximale Sensitivität im Bereich von 250-300Hz liegt, sinkt die

Empfindungsschwelle auf einen theoretischen Wert von $0,1 \mu\text{m}$ [9–11].

Experimenteller Aufbau

Die Messung der Auslenkungen der Platte werden mittels Laserdopplervibrometer PSV-500-HV in Verbindung mit dem PSV-I-550 Scanning Head Xtra der Firma Polytec durchgeführt. Hierzu zählen die Signalsequenzen während Kalibrierung, die Amplituden und lateralen Auflösungen der Fokuspunkte sowie Vermessung der gesamten Plattenoberfläche während des Re-Emissionsprozesses. Die Kalibrierung erfolgt durch sequentielles Anlegen von Sinus-Chirp-Signalen an alle i Wandler in einem Bereich von 1 Hz bis 20 kHz mittels des integrierten Signalgenerators der PSV-E-530 Junction Box des LDV. Die Amplitude des Chirp-Signals ($0,5 V_{pp}$) wird zuvor durch einen analogen Verstärker (OPA552FA) auf $30 V_{pp}$ verstärkt. Sowohl für die Kalibrierung als auch alle experimentellen Untersuchungen wurden $i = 8$ Piezo-Aktoren (TDK PowerHap 2.5G), verwendet, die am Rand der Oberfläche verbaut wurden (Verteilung siehe Abb. 2). Sie sind zwischen der Platte ($720 \times 920 \times 3 \text{ mm}^3$, PMMA) und deren punktuellen Halterungen/Auflagepunkten geklemmt. Die einzelnen zeitumgekehrten Impulsantworten werden simultan über eine PXI-6733 Messkarte der Firma National Instruments ausgegeben und wiederum mittels 8 analogen Verstärkern des Typs OPA522FA verstärkt. Limitierend für die verwendete Anzahl der Wandler ist die genutzte analoge Ausgabekarte mit ihren 8 zur Verfügung stehenden simultanen Ausgabekanälen.

Laterale Auflösung

Die laterale Auflösung L kann als Größe der räumlichen Ausbreitung bei der Hälfte der maximalen Amplitude des Fokuspunktes beschrieben werden und hängt im Fall einer endlichen Bandbreite und vernachlässigbarer Dispersion von der kleinsten Wellenlänge λ_{\min} bzw. der größten Frequenz f_{\max} , die der Transducer anregt ab, sodass gilt [12],

$$L = \frac{\lambda_{\min}}{2} \quad (1)$$

Die Biegesteifigkeit B_{ST} einer dünnen Platte berechnet sich aus [13],

$$B_{ST} = \frac{h^3}{12} \frac{E}{(1-\nu^2)}, \quad (2)$$

wobei h die Dicke der Platte, ρ die Dichte, E der Elastizitätsmodul und ν die Querkontraktionszahl des Plattenmaterials ist. Die Plattengeschwindigkeit c_{BP} der Biegewelle definiert sich durch [13]

$$c_{BP} = \sqrt[4]{\frac{B_{ST}}{\rho h}} \omega^2, \quad (3)$$

wodurch sich für die minimale Wellenlänge λ_{\min} folgende Beziehung ergibt:

$$\lambda_{\min}^2 = \frac{\pi h}{f_{\max}} \sqrt{\frac{E}{3\rho(1-\nu^2)}}. \quad (4)$$

Zusammengefasst ist so die mögliche laterale Auflösung, die zur fühlbaren Rückmeldung auf der Platte dient, abhängig von den mechanischen Eigenschaften der Platte und der höchsten Frequenz, die in das System eingebracht wird. Legt man die verwendete 3 mm PMMA-Platte zugrunde, erhält man den in Abb. 3 dargestellten Verlauf der räumlichen Auflösung in Abhängigkeit der maximalen Frequenz.

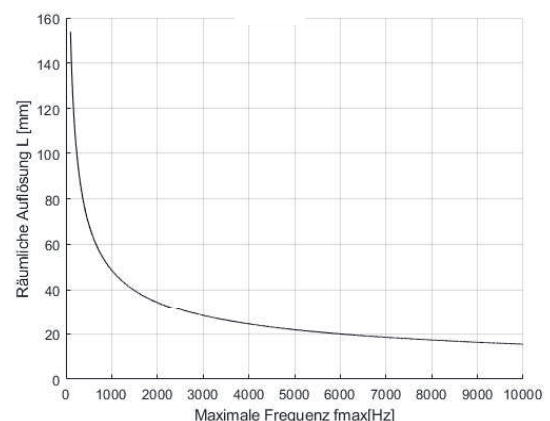


Abb. 3: Räumliche Auflösung L der genutzten 3mm PMMA-Projektionsplatte

Es ist ersichtlich, dass mit einer Steigerung der maximalen Frequenz im System die laterale Auflösung verbessert wird. Gerade im Bereich der unteren Frequenzen bis 3 kHz ist eine starke Verringerung und danach ein deutliches Abflachen der Kurve ersichtlich. Bei 10 kHz ergibt sich eine laterale Auflösung von 15 mm.

Re-Fokussierungszeit

Die Abhängigkeit der Amplitude und der lateralen Auflösung des Fokuspunktes von zeitlich gekürzten, re-emittierten Impulsantworten, soll im Folgenden untersucht werden. Die zeitumgekehrten Impulsantworten $h_{AWi}(T-t)$ werden in einem bestimmten Bereich abgeschnitten, was wiederum zu einer Verkürzung der Re-Fokussierungszeit (RFZ) führt. Ein besonderes Augenmerk wird bei den folgenden Untersuchungen auf 2 Grenzbereiche gelegt. Zum einen auf eine RFZ von 4 ms (Impulsfolge 250 Hz), um die höchste Sensitivität der Vater-Pacini-Körperchen zu nutzen. Zum anderen eine RFZ von 64 ms (Impulsfolge ca. 16 Hz), um den optimal fühlbaren Bereich der Meissner-Körperchen nutzen zu können. In Abb. 4 ist experimentell der Einfluss der Veränderung von RFZ auf die Amplitude des Fokuspunktes dargestellt.

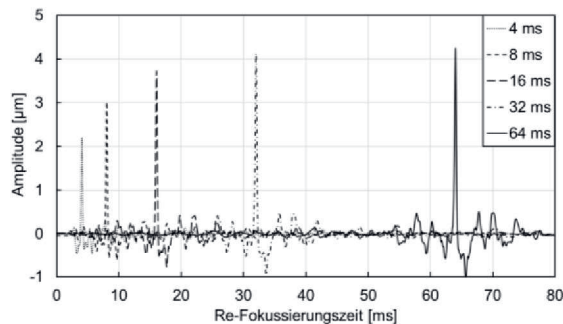


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf am Fokuspunkt bei unterschiedlichen Re-Fokussierungszeiten

Es wird ersichtlich, dass die Amplitude von $4,25 \mu\text{m}$ bei 64 ms auf $2,19 \mu\text{m}$ bei 4 ms absinkt (Faktor 1,94).

Die laterale Auflösung des Fokuspunktes (Abb. 5) steigt mit Erhöhung der RFZ von 43 mm bei 4 ms auf 52 mm bei 64 ms und verschlechtert sich somit.

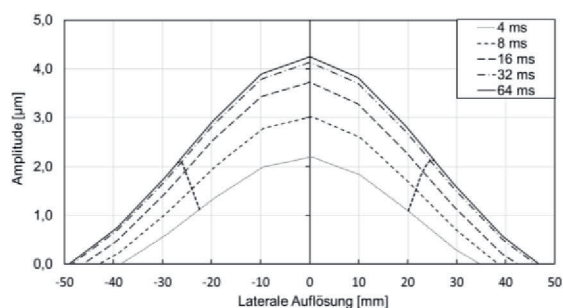


Abb. 5: Amplitude und laterale Auflösung des Fokuspunktes bei unterschiedlicher Re-Fokussierungszeit

Im höher-dynamischen Bereich von 4 ms wird die Amplitude der theoretischen Wahrnehmungsschwelle ($0,1 \mu\text{m}$) zwar überschritten, im weniger dynamischen Betriebsmodus von 64 ms Re-Fokussierdauer kann die Amplitude von $5 \mu\text{m}$ jedoch nicht erreicht werden. Nachfolgend werden daher Methoden zur Amplitudenerhöhung und deren Auswirkung auf die Fokusqualität weiter untersucht.

Amplitudenerhöhung durch 1-Bit-Verfahren

Durch das 1-Bit-Verfahren kann die Amplitude des Fokuspunktes erhöht werden. Derode et al. führten die Verwendung der 1-Bit-Methode in Zeitumkehr-Experimenten ein und konnten bei gleichbleibender Fokusqualität eine Steigerung der Amplitude bei gleicher Spitze zu Spitze Spannung V_{pp} erreichen [14].

Das 1-Bit-Verfahren umfasst folgende Signalverarbeitungsschritte (vgl. Abb. 6): a) Zeitumkehren der Impulsantwort, b) zeitliche Fensterung des Signals, c) das Signal nach Fensterung verwenden, um in d) eine 1-Bit Quantifizierung vorzunehmen, sodass das Signal am Ende über Gl. 5 in eine binäre Form (0/1) gebracht werden kann. Dabei kann über den Faktor V_{pp} die Höhe der Amplitude verändert werden.

$$v_w(t) = \frac{1}{2} V_{pp} \left[1 + \text{sgn}(h_{AWi}(T-t)) \right] \quad (5)$$

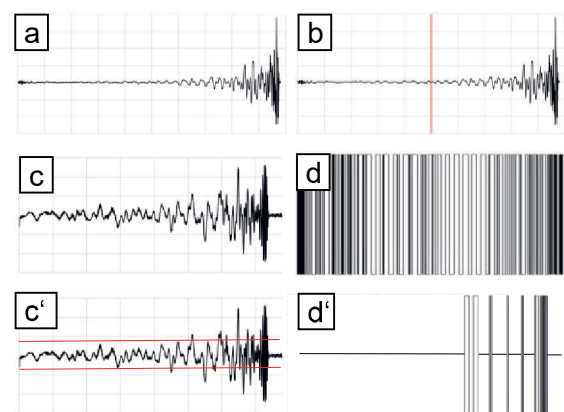


Abb. 6: (a) zeitumgekehrte Impulsantwort, (b) Fensterung des Signals, (c) Signal nach der Fensterung, (d) 1-Bit Quantifizierung, (c') Definition zweier Schwellwerte, (d') 1-Bit Quantifizierung mittels Schwellwerten

Die so veränderte Impulsantwort enthält daraufhin nur noch die Phaseninformation des ursprünglichen Signals. Um insbesondere die zu Beginn der Sequenz auftretenden Signalausgangsteile zu unterdrücken, können

zwei Schwellwerte innerhalb der Impulsantwort $h_{AW}(T-t)$ definiert werden (Abb.6c'). Oberhalb der positiven Schwelle wird der Wert daraufhin auf 1, unterhalb der negativen Schwelle auf -1 und die Zwischenwerte auf 0 gesetzt (Abb.6d'). Diese alternative Signalverarbeitung wurde in den Messungen jedoch nicht genutzt und soll lediglich Erwähnung finden. Der entscheidende Vorteil dieser 1-Bit-Methode ist, dass das binäre Signal mittels digitaler Technik ausgegeben und verstärkt werden kann.

Die Messergebnisse zeigen, dass sich wie erwartet und theoretisch beschrieben die Amplitude des Fokuspunktes gegenüber der normalen Zeitumkehr verbessert. In Anlehnung an die zuvor gewählte Darstellung (Abb. 4) wird eine Abhängigkeit der Amplitude zu der Re-Fokussierungszeit ersichtlich. Die Amplitude sinkt von einem Wert von 8,81 μm bei 64 ms auf einen Wert von 3,11 μm bei 4 ms (Faktor 2,83) (Abb. 7). Damit kann nunmehr für beide Ziel-Rezeptoren die jeweilige frequenzabhängige Empfindungsschwelle erreicht werden. Die laterale Auflösung des Fokuspunktes steigt wie schon beim Normal-Verfahren mit der RFZ an: von 44 mm bei 4 ms auf 59 mm bei 64 ms Zeitdauer.

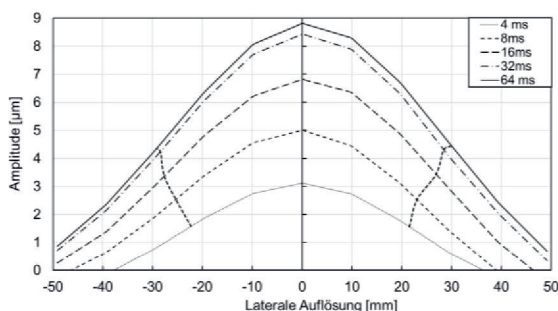


Abb. 7: Amplitude und laterale Auflösung des Fokuspunktes mittels 1-Bit-Verfahren zur Amplitudensteigerung

Amplitudenerhöhung durch Clipping

Dieses Verfahren zur Erhöhung der Amplitude des Fokuspunktes wurde von Heaton et al. als Verarbeitungsverfahren für die Zeitumkehr eingeführt und ist ähnlich dem 1-Bit-Verfahren [15]. Legt man alle Zeitumkehr-Methoden zu Grunde, zeigt das Clipping-Verfahren die höchste Amplitude [16].

Wesentliche Signalverarbeitungsschritte bei diesem alternativen Verfahren sind (Abb. 8): (a) Zeitumkehren der Impulsantwort, (b) zeitliche Fensterung des Signals, (c) Definition der minimalen und maximalen Schwellwerte, (d) das Signal an den Schwellwerten abschneiden und (e) Signal auf einen definierten Wert skalieren.

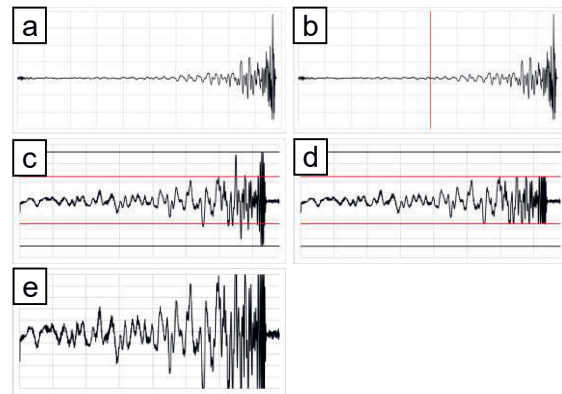


Abb. 8: (a) zeitumgekehrte Impulsantwort, (b) Fensterung des Signals, (c) Schwellwerte definieren, (d) Signal an Schwellwerten abschneiden (e) Signal auf einen bestimmten Wert skalieren

Der wesentliche technische Unterschied zum 1-Bit-Verfahren liegt in dem Beschneiden des Signals, da bei der Clipping-Methode das Signal zwischen den Schwellwerten unverändert bleibt. Entscheidend ist zudem bei dem Clipping-Verfahren die Schwellwertoptimierung.

Wie auch schon bei dem normalen und 1-Bit Verfahren gezeigt, ist auch hier ein Verringern der Amplitude in Abhängigkeit der Verkürzung der RFZ zu sehen. Diese sinkt von 12,73 μm bei 64 ms auf 3,44 μm bei 4 ms Zeitdauer (Faktor 3,7). Auch hier kann für die taktilen Rezeptoren eine ausreichend hohe Ansprechbarkeit bzgl. der frequenzabhängige Empfindungsschwelle erreicht werden.

Des Weiteren verschlechtert sich die laterale Auflösung von 49 mm bei 4 ms auf 61 mm bei 64 ms (Abb. 9).

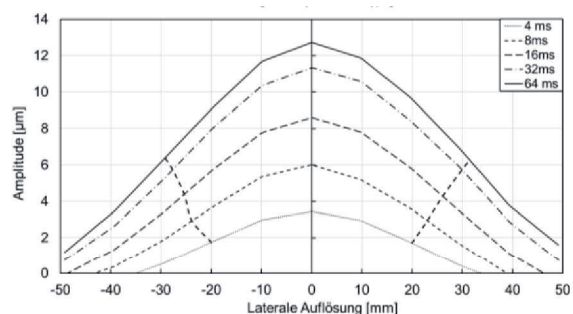


Abb. 9: Amplitude und laterale Auflösung am Fokuspunkt beim Clipping-Verfahren zur Amplitudensteigerung

Gegenüberstellung der 3 Verfahren

Abb. 10 zeigt eine Übersicht, wie sich die Amplitude des Fokuspunktes in Abhängigkeit

der genutzten Verfahren und der Re-Fokussierungszeiten unterscheidet.

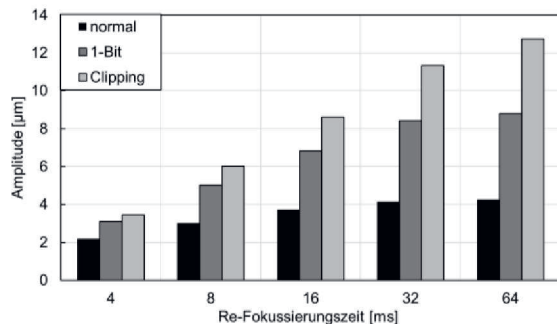


Abb. 10: Gegenüberstellung der maximalen Fokusamplituden zu der Re-Fokussierungszeit und zu den Verstärkungsverfahren

Im direkten Vergleich als auch über alle RFZ wird bei beiden Verstärkungsmethoden die Amplitude gegenüber der normalen Zeitumkehr gesteigert, wobei das Clipping-Verfahren den wesentlichsten Einfluss hat. Bei einer kurzen RFZ von 4 ms liegen die Amplituden aller Verfahren nah beieinander, wobei eine Steigerung der Amplitude bei dem 1-Bit-Verfahren um das 1,42-fache und bei dem Clipping-Verfahren um das 1,57-fache im Gegensatz zu der normalen Zeitumkehr beobachtet wird (Tab.1). Bei Zunahme der RFZ steigt auch der Unterschied zwischen den einzelnen Verfahren. Bei der normalen Zeitumkehr steigt der Wert von 4 ms gegenüber 64 ms um das 1,94-fache. Vergleicht man für die längste RFZ (64 ms) die Verfahren, so skalieren die Amplituden um das 2,07-fache (1-Bit) und das 3-fache (Clipping) relativ zur normalen Fokusamplitude (Tab.1).

Tab. 1: Normierte Verstärkungsfaktoren der Amplituden bei den verschiedenen Verfahren bezogen auf die normale Zeitumkehr TR

RFZ [ms]	Faktor Normale TR	Faktor 1-Bit	Faktor Clipping
4	1,00	1,42	1,57
8	1,38	1,66	1,99
16	1,70	1,83	2,31
32	1,88	2,04	2,74
64	1,94	2,07	3,00

Die laterale Auflösung des Fokuspunktes steigt bei allen drei Verfahren in Abhängigkeit der RFZ und somit der Fokusamplitude an. Die vorliegende Datenlage lässt allerdings keinen belastbaren Rückschluss darauf zu, inwiefern bei vorgegebener, für alle 3 Verfahren *identischer* Fokusamplitude eine Verbesserung der lateralen Auflösung erzielt werden kann. Es ist zu vermuten, dass das 1-Bit und Clipping

Verfahren aufgrund der Signalmodifikationen einen Einfluss höherfrequenterer Anteile mit sich bringt und λ_{\min} bzw. L folglich kleiner wird. Eine experimentell darauf ausgerichtete Untersuchung ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

Kontrast des Fokuspunktes

Das Verhältnis der Amplitude am Fokuspunkt gegenüber dem quadratischen Mittelwert der Amplituden über die Platte zum Zeitpunkt des Impulses kann als Messwert für die Fokusqualität zu Grunde gelegt werden [17]. Für die Beurteilung des Kontrastes wurde im Mittelpunkt der Multi-Touch-Platte mittels Zeitumkehr ein Impuls erzeugt und gleichzeitig die gesamte Oberfläche mit einem Raster von 20x20 mm vermessen (Abb. 11).

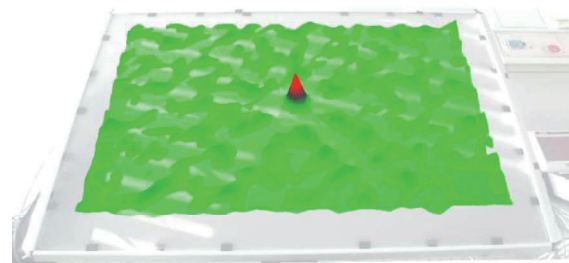


Abb. 11: Auslenkungen auf der Multi-Touch-Oberfläche zur Zeit der Impulserzeugung

Der quadratische Mittelwert aller Oberflächenamplituden (wobei bei der Berechnung der Bereich des Fokuspunktes nicht berücksichtigt wird) liegt gegenüber der normalen Zeitumkehr bei den Verstärkungsverfahren höher und führt zu einem verstärkten Grundrauschen der Platte (Abb. 12). Zudem steigt hier der Mittelwert wie auch im Vergleich zu den Ergebnissen aus Abb. 4 asymptotisch mit der RFZ an.

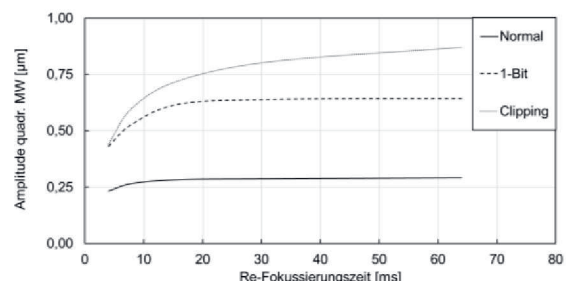


Abb. 12: Quadratischer Mittelwert der Oberflächenamplituden ohne Fokuspunkt bei veränderter Re-Fokussierungszeit und Verstärkungsverfahren

Wird der quadratische Mittelwert ins Verhältnis zu der Amplitude des Fokuspunktes gesetzt

(Abb. 13), kann eine Aussage über das Signal-Rausch-Verhältnis SNR der Verfahren bzw. deren Fokusqualität in Abhängigkeit von der RFZ getroffen werden. Es wird ersichtlich, dass durch die jeweiligen Verstärkungsverfahren (1-Bit, Clipping) die Fokusamplitude zwar erhöht wird, das aber mit einem ebenso verstärkten Grundrauschen einhergeht. In Bezug auf diese Betrachtungsweise (SNR) zeigen die drei Verfahren ein relativ vergleichbares Kontrastverhältnis und ähnliche Fokusamplitude. Letztere steigt mit zunehmender Zeitdauer bei allen drei Verfahren an und erreicht ab ca. 30 ms einen konstanten Wert.

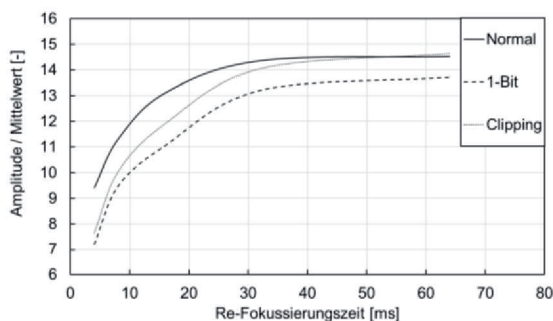


Abb. 13: Verhältnis der Amplitude des Fokuspunktes zum quadratischen Mittelwert der Oberflächenamplituden ohne Fokuspunkt bei veränderter Re-Fokussierungszeit und in Abhängigkeit des Verstärkungsverfahrens

Zusammenfassung

In diesem Beitrag konnte gezeigt werden, dass mittels einer begrenzten Anzahl von 8 Wandlern überwiegend spürbare Amplituden auf der verwendeten Multi-Touch-Oberfläche erzeugt werden konnten und dass das Verfahren der Zeitumkehr-Fokussierung für die Multi-Touch-Interaktion geeignet ist. Mit zunehmender Re-Fokussierungszeit steigt die Amplitude des Impulses asymptotisch bis zu einem gleichbleibenden Wert an und mittels des 1-Bit und Clipping-Verfahrens konnte die Amplitude bei 64 ms Re-Fokussierungszeit von $4,2\ \mu\text{m}$ bei normaler TR bei dem 1-Bit-Verfahren um Faktor 2,07 auf $8,7\ \mu\text{m}$ und bei dem Clipping-Verfahren um Faktor 3,0 auf $12,6\ \mu\text{m}$ gesteigert werden. Ein hinreichend hoher Kontrast des Fokuspunktes zur gesamten Oberfläche konnte beobachtet werden, wobei alle drei verwendeten Verfahren relativ betrachtet, gleiche Kontrastverhältnisse liefern. Es konnte die Möglichkeit einer dynamischen Anregung von Punkten mittels Impulsfolgen bis zu 250 Hz mit ausreichend hoher Amplitude nachgewiesen werden. Zusammenfassend konnte belegt werden, dass das verwendete

TR-Verfahren für den Anwendungsfall geeignet ist.

Literaturverzeichnis

- [1] C. Hudin, J. Lozada, and V. Hayward, "Localized Tactile Feedback on a Transparent Surface through Time-Reversal Wave Focusing," (eng), *IEEE transactions on haptics*, vol. 8, no. 2, pp. 188–198, 201510.1109/TOH.2015.2411267.
- [2] J. Pasquero et al., "Haptically Enabled Handheld Information Display With Distributed Tactile Transducer," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 9, no. 4, pp. 746–753, 200710.1109/TMM.2007.895672.
- [3] M. E. Altinsoy and S. Merchel, "Electrotactile Feedback for Handheld Devices with Touch Screen and Simulation of Roughness," (eng), *IEEE transactions on haptics*, vol. 5, no. 1, pp. 6–13, 201210.1109/TOH.2011.56.
- [4] J. Reisinger and J. Wild, "Haptische Bedienschnittstellen," in *Infotainmentsysteme im Kraftfahrzeug*, Wiesbaden: Vieweg, 2008, pp. 115–145.
- [5] T. Nara et al., "Surface acoustic wave tactile display," *IEEE Comput. Grap. Appl.*, vol. 21, no. 6, pp. 56–63, 200110.1109/38.963461.
- [6] E. C. Chubb, J. E. Colgate, and M. A. Peshkin, "ShiverPaD: A Glass Haptic Surface That Produces Shear Force on a Bare Finger," (eng), *IEEE transactions on haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 189–198, 201010.1109/TOH.2010.7.
- [7] M. Wiertelowski, D. Leonardis, D. J. Meyer, M. A. Peshkin, and J. E. Colgate, "A High-Fidelity Surface-Haptic Device for Texture Rendering on Bare Finger," in *Lecture Notes in Computer Science, Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications*, M. Auvray and C. Duriez, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 241–248.
- [8] M. Fink, "Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles," (eng), *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 39, no. 5, pp. 555–566, 199210.1109/58.156174.
- [9] R. T. Verrillo and S. J. Bolanowski, "Tactile Responses to Vibration," *Handbook of Signal Processing*, vol. 4, pp. 1185–1213, 200810.1007/978-0-387-30441-0_62.
- [10] L. A. Jones and N. B. Sarter, "Tactile displays: guidance for their design and application," (eng), *Human factors*, vol. 50, no. 1, pp. 90–111, 200810.1518/001872008X250638.
- [11] T. A. Kern, *Entwicklung Haptischer Geräte*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [12] Didier Cassereau and Mathias Fink, "Time-Reversal of Ultrasonic Fields-Part III: Theory of the Closed Time-Reversal Cavity," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 39, no. 5, pp. 579–592, 1992.
- [13] R. Lerch, G. Sessler, and D. Wolf, *Technische Akustik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

- [14] A. Derode, A. Tourin, and M. Fink, "Ultrasonic pulse compression with one-bit time reversal through multiple scattering," *Journal of Applied Physics*, vol. 85, no. 9, pp. 6343–6352, 199910.1063/1.370136.
- [15] C. Heaton, B. E. Anderson, and S. M. Young, "Time reversal focusing of elastic waves in plates for an educational demonstration," (eng), *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, no. 2, p. 1084, 201710.1121/1.4976070.
- [16] M. L. Willardson, B. E. Anderson, S. M. Young, M. H. Denison, and B. D. Patchett, "Time reversal focusing of high amplitude sound in a reverberation chamber," (eng), *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 143, no. 2, p. 696, 201810.1121/1.5023351.
- [17] C. Hudin, J. Lozada, and V. Hayward, "Spatial, temporal, and thermal contributions to focusing contrast by time reversal in a cavity," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 333, no. 6, pp. 1818–1832, 201410.1016/j.jsv.2013.11.016.