

FPGA basierte Plattform zur akustischen Zeitumkehrfokussierung

Falco Edner, Michael Tornow, Ulrike Steinmann

Institut für Automatisierungstechnik, 39106 Magdeburg, E-Mail: falco.edner@ovgu.de

Einleitung

Die hochaufgelöste örtliche und zeitliche Fokussierung elastischer Wellen, bspw. zur Erzeugung eines haptischen Feedbacks auf dünnen Plattenstrukturen, kann durch Anwendung der Zeitumkehrakustik realisiert werden [1]. Dafür ist die synchrone Anregung mittels der im Randbereich der Platte angebrachten Wandler mit zeitinvertierten, auf den jeweiligen Fokuspunkt kalibrierten Signalen erforderlich. In diesem Beitrag wird die technologische Umsetzung zur Anregung und Fokussierung transients elastischer Körperschallwellen auf einer ebenen Platte (720x920x3 mm³, PMMA) mit Hilfe einer eigenentwickelten FPGA-basierten Plattform vorgestellt. Diese ist hinsichtlich der Kanalanzahl, der maximalen Verstärkung und Samplingrate konfigurierbar. Die Güte der Fokussierung des fühlbaren Feedbacks wird im Hinblick auf eine hohe Auflösung und Dynamik sowie ein hohes Kontrastverhältnis der Refokussierung vergleichend zu einem kommerziellen Gerät (National Instruments NI PXI 6733, 8-kanalig) bewertet. Anhand beider Systeme soll weiterhin die Generierung simultaner Feedbacks (≥ 2) und die Entstehung unerwünschter Störimpulse außerhalb der Fokuspunkte analysiert werden. Zur quantitativen Charakterisierung der transienten Schwingungen am/ im Bereich des Fokus wird ein Scanning Laser Doppler Vibrometer (LDV, Polytec PSV 500) verwendet.

Methodik

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau besteht aus einer ebenen Kunststoffplatte (720x920x3 mm³, PMMA), welche auf der Rückseite mit 16 elektromagnetischen Aktoren (Tectonic TEAX14C02-8) an den in Abbildung 1 dargestellten äußeren Positionen ausgestattet ist. Über diesem Aufbau ist lotrecht im Abstand von 1,25 m zur Platte ein Laservibrometer Polytec PSV 500 installiert, dass die gesamte Platte vermessen kann.

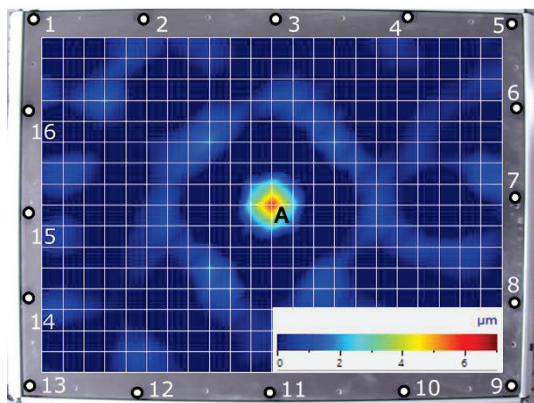


Abbildung 1: Multi-Touch-Platte mit 16 unterhalb der Platte angebrachten Wählern im Außenbereich und mit Refokussierungspunkt in der Mitte (Rasterlänge 4 cm)

Die Aktoren können wahlweise über den analogen Signalgenerator NI PXI 6733 oder über den FPGA-basierten Signalgenerator (ZynqMP Ultrascale+) mit pulsweitenmodulierten Signalen PWM angesteuert werden (Abb. 2). Zur Ansteuerung werden zeitinvertierte Impulsantworten verwendet, die durch eine Kombination eines Rekonstruktionsfilters und eines Verstärkers in der elektrischen Leistung und dem Frequenzbereich an die Aktoren angepasst werden.

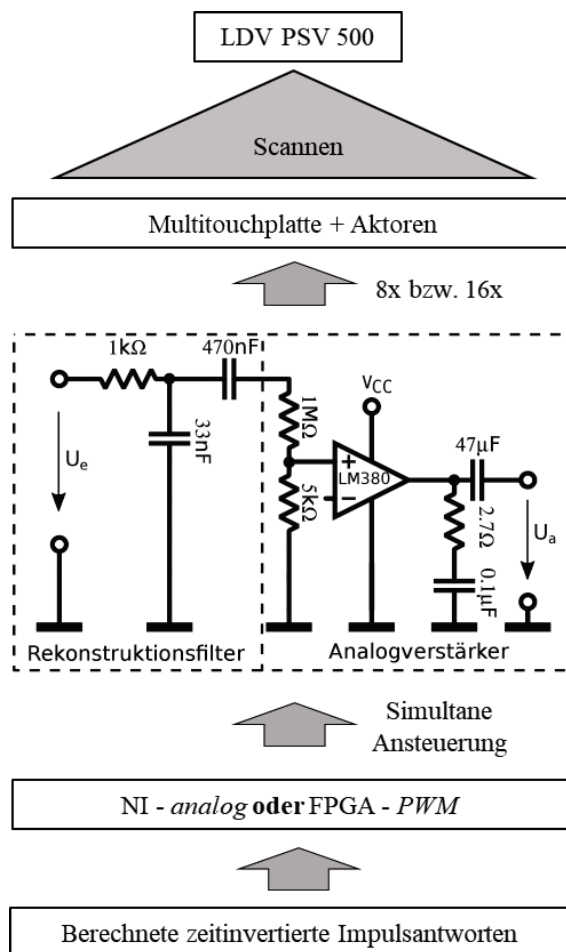


Abbildung 2: Schema der Bereitstellung zeitinvertierter Signale für den analogen Signalgenerator NI PXI 6733 und dem PWM-Generator im FPGA

Kalibrierung

Ein breitbandiges Sinus-Chirp-Signal ($f = 300\text{Hz} \dots 10\text{kHz}$, $t = 400\text{ms}$) wird an den jeweiligen im Außenbereich befindlichen Wandler $v_w(t)$ ($W = 1-16$ in Abb. 1) gesendet. Zeitgleich erfolgt die Aufnahme der vertikalen Auslenkungen

$u_A(t)$ am definierten Zielort A mit einer Abtastrate von 125 kS/s mittels des lotrecht über der Platte angebrachten Scanning Laser Doppler Vibrometers. Aus diesen beiden Signalen wird die Übertragungsfunktion H_{AW} nach Gl. 1 im Frequenzbereich gebildet [2], [3].

$$H_{AW}(\omega) = \frac{U_A(\omega)}{V_W(\omega)} \quad (1)$$

Im nächsten Schritt erfolgt die inverse Fourier-Transformation nach Gl. 2.

$$h_{AW}(t) = F^{-1}(H_{AW}(\omega)) \quad (2)$$

Danach findet die Zeitumkehrung $h_{AW}(T-t)$ aller i Impulsantworten $h_{AW}(t)$ und die Zwischenspeicherung dieser Signale statt. Der Zielpunkt A ist somit für ein haptisches Feedback kalibriert und kann für die gewünschte taktile Rückmeldung abgerufen werden, indem alle 16 Wandler die entsprechenden $h_{AW}(T-t)$ emittieren.

Signalgenerierung

Analoge Ansteuerung

Die analogen Signale werden durch das NI PXI 6733 generiert, welches mit Digital/Analog-Umsetzern (DAU) mit 16 Bit Amplitudenaufösung arbeitet und eine maximale Samplerate von 740 kS/s erreichen kann. Damit liegen am Ausgang dieses Systems annähernd zeit- und wertekontinuierliche Signale vor, welche direkt von einem Analogverstärker verarbeitet und danach auf die Wandler ausgegeben werden können. Die zeitumgekehrten Impulsantworten $h_{AW}(T-t)$ enthalten Frequenzen, die bis 2 kHz relevant sind.

FPGA-Ansteuerung mittels Pulsweitenmodulation

Es ist bekannt, dass die Anzahl der Kanäle die Amplitude des Fokus beeinflusst. Aufgrund der limitierten Kanalanzahl (8) des PXI 6733 kann dies nur in Grenzen praktisch umgesetzt werden. Folglich sollte ein System entwickelt werden, das äquivalente Signale erzeugen kann, jedoch über eine deutlich höhere Anzahl an Kanälen verfügt und diese synchron ansteuern kann.

Mittels FPGAs, die über eine Vielzahl (> 8) exakt ansteuerbarer I/O-Anschlüsse verfügen, kann durch die Verwendung pulswidenmodulierter Signale ein Kanal je Anschluss dargestellt werden. Pulsweitenmodulierte Signale sind zeit-kontinuierlich, aber wertediskret, daher ist ein Rekonstruktionsfilter erforderlich, bevor die Signale mit einem Analogverstärker verarbeitet werden.

Für die Ansteuerung mit dem FPGA System werden die analogen Signale $h_{AW}(T-t)$ durch Sägezahnabtastung in pulswidenmodulierte (PWM) Signale konvertiert. Hierzu wird zu jedem Zeitpunkt der Wert des Analog-Signals mit dem eines Sägezahnsignals verglichen und auf ‚Low‘ gesetzt, wenn der Wert des Signals größer ist als die Sägezahnspannung, ansonsten ist der Ausgangswert ‚High‘.

In Tab. 1 sind die Maximalkonfigurationen und die in den Experimenten verwendeten Konfigurationen abgebildet.

Tabelle 1: Maximale und verwendete Konfiguration der Signalgeneratoren NI PXI 6733 (ADC) und FPGA ZynqMP Ultrascale+ (PWM)

System	Samplerate	Auflösung	Kanäle
Maximalkonfiguration			
NI PXI 6733	740 kS/s	16 Bit	8
FPGA ZynqMP	300 kS/s	14 Bit	32
Experimentalkonfiguration			
NI PXI 6733	125 kS/s	16 Bit	8
FPGA ZynqMP	50 kS/s	12 Bit	8/16

Rekonstruktionsfilter & Verstärker

Der Rekonstruktionsfilter ist ein Bandpass mit einem Durchlassbereich von 300 Hz bis 4,8 kHz. Hierdurch werden zum einen der Gleichanteil des Signals als auch die Oberwellen, welche durch die PWM entstehen, unterdrückt. Für die Analogsignale des NI-Systems ist der Rekonstruktionsfilter aufgrund der enthaltenen Frequenzen transparent.

Der Verstärker, bestehend aus einem Spannungsteiler zur Anpassung der Ausgangsspannung und einem LM380, stellt einen Analogverstärker dar. Der LM380 ist ein 2,5 W Audioleistungsverstärker, welcher durch entsprechende Beschaltung auch als Differenzverstärker konfiguriert werden kann. Die aus Filter und Verstärker bestehende Stufe erlaubt es, die PWM-Signale (FPGA) mit den Analogsignalen (NI) zu vergleichen. Dies wäre bei Einsatz von Klasse-D-Verstärkern, welche häufig in Kombination mit PWM-Signalen verwendet werden, nicht der Fall.

Die Aktoren besitzen eine maximale elektrische Leistung von 2 W (RMS) bei einer Impedanz von 8 Ohm. Damit ergibt sich eine maximale Ansteuerspannung von $4 V_{pp}$. Der Spannungsteiler am Eingang des Analogverstärkers mindert die Eingangsspannung von $1,8 V_{pp}$ um Faktor 200 auf $90 mV_{pp}$, wobei der Verstärker das Signal um Faktor 50 wieder erhöht und sich eine Ausgangsspannung von $0,45 V_{pp}$ ergibt. Dieser Wert liegt deutlich unter dem maximalen Wert, ist aber völlig ausreichend zur Generierung einer spürbaren taktilen Rückmeldung auf der Platte.

Bei der Gegenüberstellung der Signale beider Systeme, NI PXI 6733 und FPGA, in Abbildung 3 wird eine sehr gute Übereinstimmung der Auslenkung am Wandler 1 deutlich. Die Spannungsamplitude des analogen Anregungssignals wurde hierbei auf das Niveau von $1,8 V_{pp}$ des FPGA-Systems angepasst. Es kann somit gezeigt werden, dass das eigenentwickelte FPGA-System im Vergleich zur kommerziellen NI-Plattform Anregungssignale generiert, die zu einer vergleichbaren zeitlich transienten Schwingung am

Schallwandler führt. Der minimale zeitliche Versatz von 0,2 ms beider Signale erklärt sich durch die leicht unterschiedlichen Triggerzeitpunkte beider Systeme, die zum Start der Schwingungsmessung mittels Laservibrometer notwendig sind.

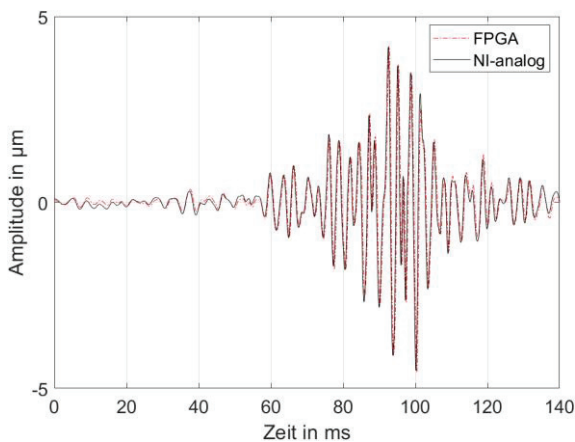


Abbildung 3: Auslenkung Wandler 1 bei Anregung mit analogem und PWM Signal

Re-Fokussierung am kalibrierten Punkt A $u_{FPA}(t)$

Nachdem die Vergleichbarkeit beider Systeme hinsichtlich der zeitinvertierten Impulsantworten gezeigt werden konnte, wird nachfolgend die Re-Fokussierung (RF) im kalibrierten Punkt A untersucht. Dabei werden von den 16 derzeit maximal verfügbaren Kanälen (FPGA) 8 genutzt, um einen Vergleich zum Referenzsystem NI PXI 6733 mit 8 synchronen Ausgangskanälen zu ermöglichen. Im Ergebnis ist in Abb. 4 zu erkennen, dass sich für beide Systeme die am Punkt A überlagernden elastischen Wellen in einer identischen zeitlichen und örtlichen Fokussierung äußern. Das Referenzsystem und die eigenentwickelte Plattform lassen aufgrund der mechanischen Auslenkung ein vergleichbares haptisches Feedback erwarten.

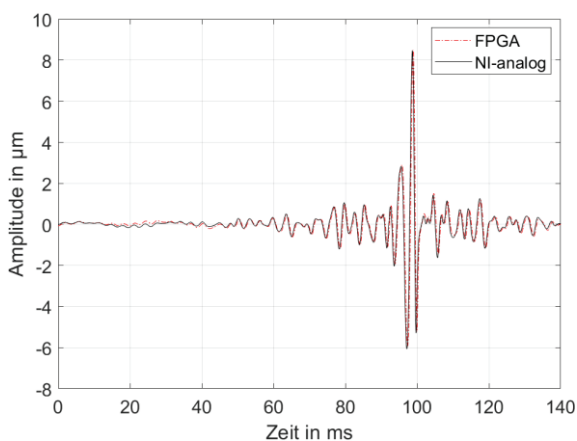


Abbildung 4: Zeitliche Verläufe der Auslenkungen am kalibrierten Fokuspunkt A bei 8-kanaliger Ansteuerung mittels NI und FPGA System

Erhöhung Wandleranzahl

Nachdem gezeigt werden konnte, dass sich beide Systeme quantitativ vergleichbar verhalten, soll im nächsten Schritt die Kanalanzahl gesteigert werden. Im aktuellen

Entwicklungsstadium wurde auf 16 Kanäle erhöht. Die Nutzung von 32 Kanälen und Ansteuerung von ebenso vielen Wandlern wird derzeit erprobt und ist nicht Bestandteil dieses Beitrags. Anhand der 16 Kanäle soll die Auswirkung auf das Signal-Rausch-Verhalten (Kontrastverhältnis der Platte) bei einem Einzelfokus und bei mehreren Fokuspunkten analysiert werden.

Kontrastverhältnis bei Verdopplung der Wandleranzahl

Das Kontrastverhältnis wird im Folgenden als Zusammenhang zwischen der Amplitude des Fokuspunktes und den auf der restlichen Platte über die Zeit erfassten maximalen Amplituden verstanden. In Abbildung 5 ist das Kontrastverhältnis während einer Re-Fokussierung einschließlich der absoluten Fokusamplitude für 8 und 16 Wandler (beides FPGA) dargestellt. Es zeigt sich allgemein, dass die Werte auf der Platte zum Fokuszeitpunkt hin steigen und danach abfallen, wobei die eigentliche Fokussierung bei 100 ms klar ersichtlich ist.

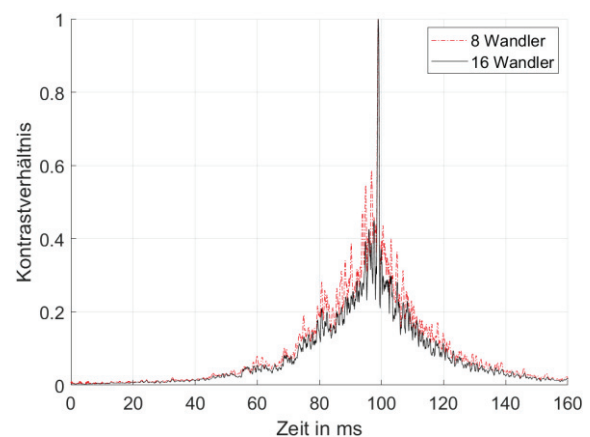


Abbildung 5: Kontrastverhältnis auf der gesamten Platte während des RF-Prozesses bei Nutzung des FPGA-Systems mit 8 und 16 Wandlern

Es ist weiterhin erkennbar, dass bei Verdopplung der Wandleranzahl (8→16) die identische Auslenkung zum Fokuszeitpunkt mit einer über die Zeit geringeren maximalen Auslenkung über der restlichen Platte erreicht werden kann. Das mittlere Kontrastverhältnis (arithmetischer Mittelwert aller Kontrastverhältnisse über die gesamte Erfassungszeit) sinkt hierbei um etwa 22 % bei der doppelten Wandleranzahl. Die Spannungsamplituden der Re-Fokussierungssignale kann bei der doppelten Anzahl an Wandlern um Faktor 2 reduziert werden, was durch das lineare Verhalten der Platte begründet ist. Da die maximalen Auslenkungen auf der Platte durch eine höhere Anzahl an Wandlern gesenkt werden kann, ist eine Minimierung des Grundrauschens der Platte während der Ausbreitung der transienten elastischen Wellen erkennbar. Hierdurch werden (haptische oder akustische) Störungen außerhalb des Fokuspunktes reduziert, was zu einer Verbesserung der Signalqualität führt, da nur im jeweiligen Fokuspunkt ein ausreichend fühlbares Signal erzeugt werden kann. Vor dem Hintergrund einer haptisch angemessenen Amplitude im Fokuspunkt soll ergänzend angemerkt sein, dass eine reine Verstärkung der Anregungssignale an den Wandlern nicht zielführend ist. Aufgrund des linearen Verhaltens der Platte bei Beaufschlagung mit elastischen

Wellen steigender Amplitude wird auch die Auslenkung – sowohl im Fokus als auch auf der gesamten Platte – proportional steigen. Das Kontrastverhältnis bleibt unverändert und verbessert sich nicht wie bei der Erhöhung der Wandleranzahl. Vielmehr werden die Amplituden außerhalb des Fokuspunktes eventuell so verstärkt, dass sie taktile relevante Werte erreichen und ein haptisches Feedback unspezifisch und zufällig über der Platte verteilt entsteht.

Kontrastverhältnis bei mehreren Fokuspunkten

Die gleichzeitige Fokussierung von $n > 1$ Punkten erfolgt durch eine Überlagerung von n Wellenfeldern eines jeden einzelnen Fokuspunktes, wobei jedes Wellenfeld durch 16 Wandler (bzw. zeitinvertierte Impulsantworten) generiert wird. In Abbildung 6 wird die Erzeugung von Multi-Foki in Form verschiedener Symbole veranschaulicht. Es werden gleichzeitig 3 Punkte für „I“ und 7 Punkte für „U“ durch softwareseitige Addition der Ansteuersignale der jeweiligen Einzelpunkte generiert.

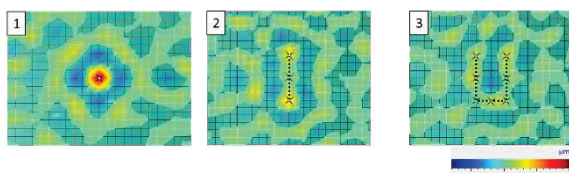


Abbildung 6: Einzelpunkt und Überlagerung von Einzelpunkte zu einer I und U Form

Die Amplituden in den Fokuspunkten sind kleiner bei der Überlagerung als bei einem einzelnen Punkt, was der Energieerhaltung im System entspricht. In Tabelle 2 ist zu sehen, wie die maximale Amplitude je nach Anzahl der Punkte abnimmt und das mittlere Kontrastverhältnisse sich mit zunehmender Zahl der Fokuspunkte in nicht proportionaler Beziehung zu n verschlechtert. Zur Generierung einer spürbaren taktilen Rückmeldung über mehrerer Foki muss eine entsprechende Anpassung der Ansteuerspannung erfolgen, jedoch ohne zu starke haptische oder akustische Störungen außerhalb des Fokuspunktes zu verursachen.

Tabelle 2: Mittelwerte und Kontrastverhältnis in Abhängigkeit der Fokuspunkteanzahl n

Variante	Fokuspunkteanzahl n	Mittelwert aller Fokuspunkte [μm]	mittleres Kontrastverhältnis
Mittelpunkt	1	9,2	0,018
I-Form	3	3,1	0,035
U-Form	7	1,8	0,041

Fazit

Es wurde eine eigenentwickelte FPGA-Plattform für die hochaufgelöste örtliche und zeitliche Fokussierung elastischer Wellen auf einer dünnen Platte durch Anwendung der Zeitumkehrakustik vorgestellt. Das FPGA System zeichnet sich durch mehr Kanäle, besserer Verstärkung und Samplingrate und deren Konfigurierbarkeit aus. Beim Vergleich mit einem kommerziellen 8 Kanal NI-System zeigt sich eine quantitativ sehr gut übereinstimmende Refokussierung.

Unter Verwendung von 16 Wandlern kann die FPGA-basierten Plattform ihren Vorteil hinsichtlich höherer haptischer Intensität im Fokuspunkt und einem verbesserten Kontrastverhältnis gegenüber dem NI-System erkennen lassen.

Bei Fokussierung an mehr als einer Zielkoordinate bietet sich prinzipiell eine hohe Anzahl von Wandlern an. Die Güte der Fokussierung nimmt hierbei jedoch mit zunehmender Zahl der Fokuspunkte ab, weswegen für den Erhalt taktile relevanter Auslenkungen die Ansteuerspannung angepasst werden muss.

Das FPGA-System überzeugt mit einem deutlich geringeren Bauraum und ermöglicht den Betrieb als Stand-alone Plattform ohne PC oder Lizenzeinschränkungen (kostenpflichtige Labview-Software).

Literaturverzeichnis

- [1] C. Hudin, J. Lozada, and V. Hayward, “Localized Tactile Feedback on a Transparent Surface through Time-Reversal Wave Focusing,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 8, no. 2, pp. 188–198, 2015, doi: 10.1109/TOH.2015.2411267.
- [2] M. Fink, “Time reversal of ultrasonic fields. I. Basic principles,” *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 39, no. 5, pp. 555–566, 1992, doi: 10.1109/58.156174.
- [3] F. Edner and U. Steinmann, “Dynamisches haptisches Feedback für Multi-Touch-Interaktionen,” *20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, pp. 634–641, 2019, doi: 10.5162/SENSOREN2019/P1.19.