

Berührbare akustische Benutzerschnittstellen

Düsing, C., Rolshofen, W.

Seit Beginn des Jahres ist das Institut für Maschinenwesen Partner in einem europäischen Forschungsprojekt zur Entwicklung von berührbaren Benutzerschnittstellen auf der Basis akustischer Signale. Unterschiedliche Methoden und Techniken werden in diesem Ansatz erprobt und evaluiert. Dieser Artikel beschreibt Zielsetzungen und Lösungsansätze des Projektes.

The Institute for Mechanical Engineering of Clausthal University of Technology is one of the partners of an EU funded project concerning the development of tangible acoustic interfaces. Different methods and techniques are tested and evaluated within this context. This article briefly describes the goals and approaches of the project.

1 Einführung

Mensch-Maschine Schnittstellen lassen sich generell in zwei Arten unterteilen, berührbare oder nicht berührbare Schnittstellen. Die weitaus größte Anzahl von Schnittstellen zählt zu der Art der berührbaren wie zum Beispiel Maus, Tastatur oder touchpad. Das Hauptproblem dieser Schnittstellen ist jedoch zumeist, dass sie die Mobilität des Benutzers einschränken, so dass man sich während der Interaktion in der Regel an bestimmten Orten in der Nähe des Computers aufhalten muss.

Neben reiner Spracherkennung, die zu Anwendungen der nicht berührbaren Schnittstellen gehört, stellen Sensortechnologien auf der Basis akustischer Signale einen vielversprechenden Ansatz zur Entwicklung neuartiger Schnittstellen dar. Das EU-Forschungsprojekt TAI-CHI (**T**angible **A**coustic **I**nterfaces for **C**omputer **H**uman **I**nteraction), in dem das Institut für Maschinenwesen einer der Forschungspartner ist, befasst sich exakt mit dieser Aufgabenstellung. Weiterführende Informationen zu diesem Projekt wird in /1/ und /2/ gegeben. Wie können physikalische Objekte, egal ob flach wie ein Tisch oder dreidimensional und komplex wie ein Igel, als natürliche, unbeschränkte Berührungsschnittstellen funktionieren. Das Ziel muss es sein, durch eine entsprechende Sensorik und die Auswertung der Signale die Brücke zwischen der virtuellen und physikalischen Welt zu schließen.

Das akustische Signal kann auf zwei Arten untersucht werden. In der aktiven Methode wird das Objekt durch Klopfen, Schlagen oder Kratzen in Schwingung versetzt, die durch Sensoren aufgezeichnet wird. Im Gegensatz zur passiven Methode, wo das Untersuchungsobjekt künstlich zu Schwingungen im Ultraschallbereich angeregt wird. Bei Berührung der Objektoberfläche wird die „Dämpfung“ des Anregungssignals an den Sensoren gemessen. Gelingt die Entwicklung einer entsprechenden Methodik, einschließlich Sensorik und der Algorithmen, in diesem Projekt, so ist es prinzipiell möglich, jedes physikalische Objekt als Schnittstelle zu benutzen. Dies könnte der Tisch in einem Restaurant sein, um das Essen zu bestellen, oder der Boden einer Lagerhalle, um dem Logistiksystem zu sagen, wo etwas gelagert worden ist, oder die Mittelkonsole des Autos, um das Radio blind zu steuern. Die Möglichkeiten scheinen relativ unbegrenzt, ebenso wie die industriellen Anwendungsfälle. Das Projekt befasst sich im Detail mit den weiteren Forschungsbereichen des akustischen Verhaltens verschiedener Medien, der Entwicklung neuartiger und günstiger Sensoren, der Erforschung und Neuentwicklung von akustischen Signalbearbeitungsalgorithmen und der Entwicklung intelligenter, berührbarer Schnittstellen.

2 Methoden

In diesem Projekt werden vier prinzipiell unterschiedliche akustische Verfahren und Methoden untersucht. Aus den oben veranschaulichten, möglichen Anwendungsfällen ergeben sich für den Betrachter eine Vielzahl verschiedener Randbedingungen, welche von Fall zu Fall variieren. Sicherlich mag es möglich sein, sich für den Fall flacher und homogener Objekte auf eine Methode beschränken zu können, jedoch stößt man bei der Variation allein dieser beiden Parameter schnell an die Grenzen einzelner Methoden. Daher werden hier vier unterschiedliche Methoden untersucht und analysiert, um ein möglichst breites Anwendungsfeld abdecken zu können. Diese Methoden werden im Folgenden kurz beschrieben und erläutert, ebenso wie der Aspekt der Entwicklung von Senso-

ren und entsprechender Hardware für die Endbenutzer.

Das Laboratoire Ondes et Acoustique (LOA) in Frankreich untersucht die akustische Signalanalyse auf Basis der time-reversal Methode. Der Ansatz, welcher hier benutzt wird, bezieht sich auf die Eindeutigkeit der Impulsantwort in einer chaotischen Senke. Daher wäre es prinzipiell möglich, eine solche Senke mit nur einem Sensor zu erfassen. Aus Gründen der Exaktheit werden in der Regel jedoch mindestens zwei Sensoren eingesetzt. Die Hauptforschungsschwerpunkte liegen hier in der Entwicklung eines mathematischen Modells, basierend auf den Eigenmoden, welches den Anforderungen, die aus dem Projekt erwachsen, genügen. Zusätzlich dazu soll eine praktikable 2D/3D Modellierung helfen, die akustische Wellenausbreitung zu charakterisieren.

Die Universität Politecnico Milano (PoliMi) untersucht, inwieweit die Auswertung von Laufzeitdifferenzen an verschiedenen Empfängern dazu benutzt werden kann, um die Signalquelle zu bestimmen. Dieses Verfahren ist unter Seismologen weitestgehend bekannt und wird zur Lokalisierung von Erdbeben seit Jahrzehnten angewandt. Nun gilt es, dies auf andere Randbedingungen anzupassen und die Parameter in den Algorithmen entsprechend zu modifizieren, so dass es auch auf kleinere Objekte effizient angewendet werden kann.

An der Universität Birmingham (UNI BHAM) wird das Verfahren der akustischen Holographie in Luft untersucht. Dabei werden akustische Quellen in der Luft mit sogenannten Mikrofonarrays aufgezeichnet. Ähnlich der bekannten optischen Holographie ist es möglich, durch bestimmte Algorithmen ein dreidimensionales Bild parallel zur Aufnahmeebene zurückzuprojizieren. Im akustischen Bereich gibt dies Aufschluss über die Verteilung der akustischen Signale im dreidimensionalen, luftgefüllten Raum. Die Hauptforschungsaufgabe liegt darin, ein mathematisches Modell zu entwickeln, welches detailliert genug ist, um die Quelle relativ exakt im dreidimensionalen Raum zu bestimmen ohne jedoch zu komplex für eine Implementierung in ein Echtzeitsystem zu sein.

Am Institut für Maschinenwesen (IMW) wird das Verfahren der akustischen Holographie für die Schallausbreitung in festen Medien untersucht. Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Verfahren, ist dies bislang recht wenig erforscht und findet nur wenig Anwendung. Hauptaugenmerk der Untersuchungen liegt in der Betrachtung der Veränderung

von Geschwindigkeiten und Frequenzen in festen Medien sowie dem Einfluss verschiedener Objekteigenschaften. Verschiedene Sensoranordnungen für die unterschiedlichen Anwendungsfälle werden untersucht. Dies soll sowohl für aktive und passive Verfahren ermöglicht werden. Der folgende Abschnitt 3 wird dies detaillierter beschreiben.

In der University of Wales, Cardiff (UWC), werden Sensoren für die Aufnahme akustischer Signale in festen und gasförmigen Medien für die entsprechenden Anwendungsfälle entwickelt. Für dreidimensionale Objekte sollen Sensoren auf Basis polarisierter fluoropolymerer, polyvinylidener Fluoride entwickelt werden. Diese können als flexible, dünne und leichte Schichten ähnlich einem Klebestreifen gefertigt und verwendet werden. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften der Objekte beim Aufbringen nicht beeinflusst. Eine Herstellung in großen Mengen ermöglicht einen relativ kostengünstigen Einsatz. Für den Einsatz im luftgefüllten Raum sollen entsprechende Sonararrays entwickelt werden, die es ermöglichen, in breiten Frequenzbereichen zu messen.

Das Center for Engineering and Technology Transfer (CeTT) in der Schweiz entwickelt in dem Projekt ein Multikanal DSP Hardware Modul zur Signalverarbeitung. Die verschiedenen, zuvor beschriebenen Verfahren sowie die entsprechenden Algorithmen, sollen direkt in dieses Modul integriert werden. Die Auswertung gemessener Signale soll in Echtzeit erfolgen und über Standardschnittstellen (audio, video, usb, firewire) ausgegeben werden. Dieses DSP Modul soll die Grundlage für die industrielle Anwendung der Untersuchungsergebnisse darstellen und wird im Anschluss an das Projekt verfügbar sein.

3 Akustische Holographie

Die Grundidee der optischen Holographie formulierte Gabor [3] schon im Jahre 1948. Es bedurfte aber erst weiterer Erfindungen, wie z.B. des Lasers, bis das Prinzip umgesetzt werden konnte. Notwendig für eine holographische Abbildung sind die Aufnahme eines Hologramms und die Bildrekonstruktion (Bild 1).

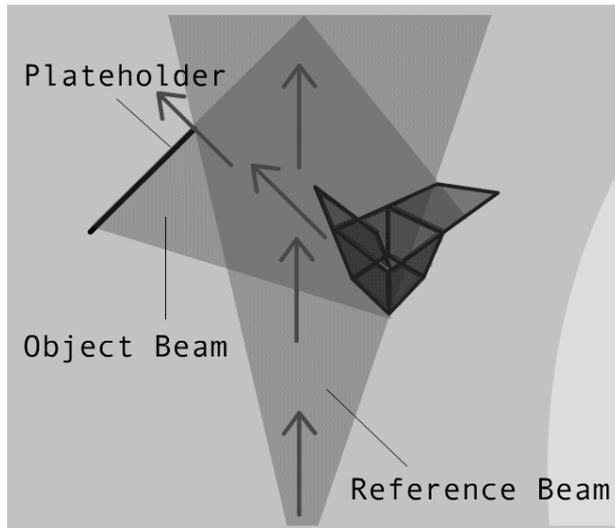


Bild 1: Überlagerung von Objekt- und Referenzstrahl auf einer Fotoplatte /4/.

Fällt in einen Objektpunkt ein ebene Wellenfront ein, so wird in diesem Punkt eine gebeugte Kugelwelle erzeugt. Diese wird, im Gegensatz zur ursprünglichen Referenzwelle als Objektwelle bezeichnet. Durch die Überlagerung der beiden Wellen lässt sich die Amplituden- und Phasenverteilung mittels einer Fotoplatte aufzeichnen. Der große Vorteil von Holographie liegt in dem hohen Informationsgehalt der Hologramme, denn aus der zweidimensionalen Oberfläche der Fotoplatte kann das dreidimensionale Wellenfeld rekonstruiert werden. Ursache dafür ist die gespeicherte Phaseninformation /5/.

In der Nahfeld Akustischen Holographie (NAH) wird stattdessen das zweidimensionale Schalldruckfeld aufgezeichnet und dazu verwendet, dass z.B. das dreidimensionale Schalldruckfeld sowie das Feld der Teilchengeschwindigkeit, die Oberflächengeschwindigkeit und die Intensität einer vibrierenden Schallquelle bestimmt werden kann /6/.

Verallgemeinert besteht Holographie aus der Messung eines Wellenfeldes auf einer geeigneten Oberfläche und deren Anwendung zur Bestimmung des Wellenfeldes in einer dreidimensionalen Region. Diese Beschreibung entspricht der Dirichlet Randwert-Bedingung auf einer Oberfläche mit bekannter Greenscher Funktion. In diesem Fall ist die holographische Rekonstruktion einfach die Konvolution (bzw. Dekonvolution) der gemessenen Grenzwerte mit der Greenschen Funktion.

Die Grundannahme ist, dass die Schallquelle ein Wellenfeld $\Psi(\mathbf{r}, t)$ erzeugt, welche der folgenden Wellengleichung genügt.

$$\nabla^2 \Psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0$$

Dabei entspricht ∇^2 dem Laplace-Operator und c einer konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Außerdem sind weitere Annahmen notwendig, wie die Existenz einer unendlich ausgedehnten Oberfläche, die das dreidimensionale Zielgebiet umschließt, und dass bei bekannter Greenscher Funktion die homogene Helmholtz-Gleichung mit der Wellenzahl $k = \omega/c$ erfüllt ist.

$$\nabla^2 \tilde{\Psi}(\mathbf{r}, \omega) + k^2 \tilde{\Psi}(\mathbf{r}, \omega) = 0$$

Man erhält das komplexe Wellenfeld $\Psi(\mathbf{r}, \omega)$, dessen Amplitude und Phase vom Quellabstand \mathbf{r} abhängt, indem eine Fourier-Transformation des Feldes $\Psi(\mathbf{r}, t)$ durchgeführt wurde. Für die räumliche Analyse wird ein fester Frequenzwert ω verwendet, um ein Wellenfeld zu finden, welches der Helmholtz-Gleichung genügt.

Bei zunehmendem Abstand zwischen Quelle und Aufzeichnungsebene werden unterschiedliche Näherungen gültig, die nach den Regionen ihrer Gültigkeit benannt werden. Die in diesem Projekt eingesetzte Näherung heißt Rayleigh-Sommerfeld, welche sich auf die Rayleigh-Integrale und die Sommerfeld-Abstrahl Bedingung beziehen. Sie ist am allgemeinsten und im gesamten Raum gültig.

Ein mathematisches Modell des Huygens-Fresnel-Prinzips lässt sich aus der Rayleigh-Sommerfeld Beugungsformel herleiten, da diese dem Faltungintegral entspricht. Wegen des Faltungssatzes ist die Faltung im Fourierraum eine Multiplikation. Durch die analytische Berechnung der Transferfunktion (Greensche Funktion) lässt sich nun die Wellenausbreitung zwischen unterschiedlichen Ebenen wie folgt berechnen /7/, /8/.

$$\tilde{\Psi}(x_B, z_B) = F^{-1} \left\{ F[\tilde{\Psi}(x_H, z_H)] \cdot e^{ikz \sqrt{1 - \lambda^2 (\gamma^2 + \delta^2)}} \right\}$$

Hierbei stehen die Indizes „B“ und „H“ für die Bild- bzw. Quell- und Hologrammebene. Die verwendete Wellenlänge ist λ und γ sowie δ beschreiben die zugehörigen Ortsfrequenzen /5/.

4 Experiment und Ausblick

In unterschiedlichen Versuchsreihen wurde die Theorie und der Algorithmus aus Abschnitt 3 Akustische Holographie angewendet. Die Untersu-

chungsobjekte waren eine Stahl-, Holz- und Glas-keramikplatte mit verschiedenen Abmaßen, auf denen mit einem Impulshammer bzw. durch Klopfen mit einem Finger ein Messsignal erzeugt wurde (s. Bild 2). Die eingesetzten Sensoren waren ICP Beschleunigungsaufnehmer der Firma PCB und die Signalaufzeichnung erfolgte mit dem OROS Analyser. Abschließend wurden die Messdaten mit dem Rayleigh-Sommerfeld Algorithmus unter MATLAB ausgewertet.

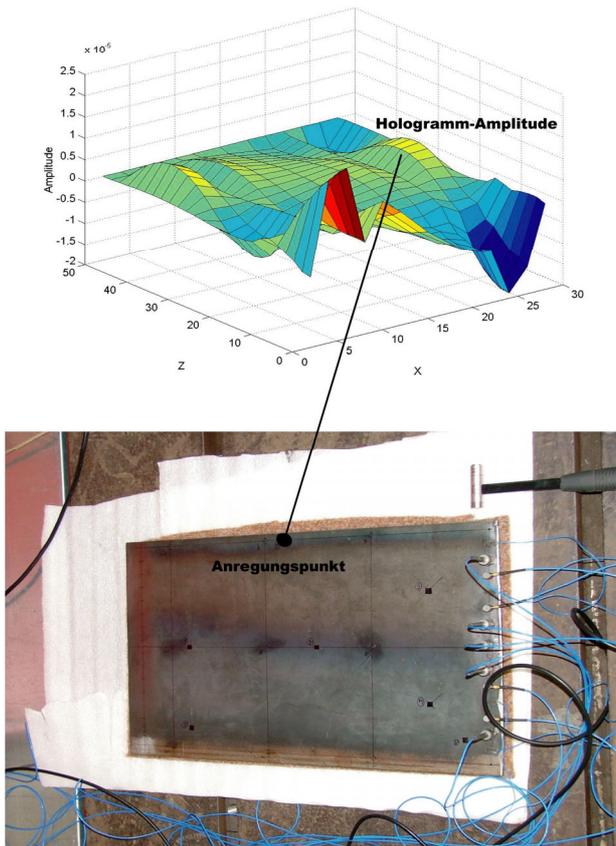


Bild 2: Messaufbau Stahlplatte und zugehöriges Messergebnis der Amplitudenverteilung

An dem Plattenrand, wo die Sensoren angeordnet sind, kommt es zu großen Störeffekten, deren Ursache noch nicht eindeutig geklärt ist. Ein Grund könnte der Aufbau, die Anordnung und die Lage der Sensoren während dieser Untersuchung sein.

Aufgrund dessen müssen weitere Experimente durchgeführt werden, damit die Lokalisierung des Anregungspunktes bzw. der Quelle genauer ist!

Der in MATLAB programmierte Code des Auswertalgorithmus wird in die Programmierumgebung EyesWeb übertragen, welche von den Projektpartnern der Universität Genua stammt.

5 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde die Zielsetzung des europäischen Forschungsprojektes TAI-CHI beschrieben. Die unterschiedlichen akustischen Analysemethoden, die von den Partnern erforscht werden, wurden kurz erläutert, ebenso wie die Hardwareentwicklung von Sensoren und einem industriell anwendbaren DSP Modul. Die ersten Untersuchungen des Instituts für Maschinenwesen wurden in Abschnitt 4 vorgestellt.

Das TAI-CHI Projekt wird von der Europäischen Union im sechsten Rahmenprogramm als Specific Targeted REsearch Project (STREP) unter der Vertragsnummer 507882 gefördert.

6 Literatur

- /1/ TAI-CHI Konsortium: Technical Annex of the Project, Vertragsdokument, 2004
- /2/ TAI-CHI Konsortium: Project Website; <http://www.mec.cf.ac.uk/research/pubs/taichi.html>, 2004
- /3/ Gabor, D., 1948: A new microscopic principle. Nature, 161, 777-778.
- /4/ MIT Museum's Holography: eye on holography <http://www.mit.edu/~sdh/holography/eoh/index.html>
- /5/ Roye, W., 1987: Beitrag zur Weiterentwicklung der akustischen Holografie beim Einsatz in der Materialprüfung. VDI-Verlag, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 117.
- /6/ Maynard, J., Williams, E. und Lee, Y., 1985: Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. J. Acoust. Soc. Am., 78, 4, 1395-1413.
- /7/ Goodman, J., 1996: Introduction to Fourier Optics. The McGraw-Hill Companies, 2nd edition.
- /8/ Williams, E., 1999: Fourier Acoustics- Sound Radiation and Nearfield Acoustic Holography. Academic Press.