

# Ultraschallbasierte digitalholographische Objekterkennung - Messtechnische Validierung

Tobias Wenzel<sup>1</sup>, André Gerlach<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Berlin, Email: tobias-wenzel@gmx.de

<sup>2</sup> Robert Bosch GmbH, Forschung und Voraentwicklung, Gerlingen, Email: andre.gerlach@de.bosch.com

## Einleitung

Die automatische räumliche Erfassung und Bewertung von Gegenständen ist eine wichtige Aufgabe technischer Systeme. Heutige Objekterkennungssysteme erreichen nicht die Leistungsfähigkeit biologischer Vorbilder. Diese Arbeit soll zur Weiterentwicklung technischer Systeme beitragen.

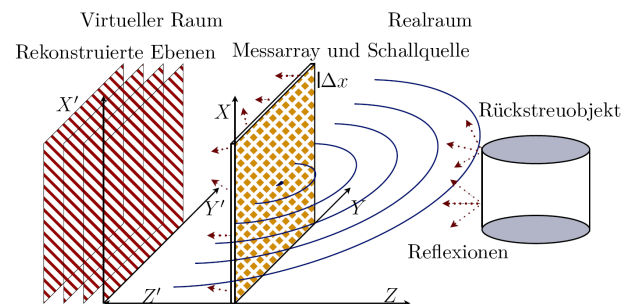
Die Holographie ist das wichtigste Verfahren zur verlustfreien dreidimensionalen Erfassung der Umwelt. Die digitale Aufzeichnung und Rekonstruktion eines beliebigen Raumes wurde sowohl optisch [1] als auch mit Radar und Ultraschall [2, 3] und anderen Wellen behandelt.

In dieser Untersuchung wird die Holographie nicht nur zur Erfassung der räumlichen Position und Lage von Objekten genutzt, sondern auch zur Erkennung von Objekten unabhängig von Farbe, Form und Kontrast durch einen virtuellen Vergleich mit Musterhologrammen. Im optischen Bereich wurde dazu bereits mit Fourier-Filterung, holographischer Quasi-Korrelation von 2D-Bildern [4], Kreuzkorrelation von rekonstruierten Feldern [5] und komparativer Holographie [6] gearbeitet. Die dort auftretenden Probleme der störenden Oberflächeninformationen größerer Objekte werden in dieser Arbeit durch die Verwendung langer Wellenlängen vermieden. Dabei wird statt Infrarot- oder Terahertz-Strahlung Ultraschall eingesetzt, um eine bessere Durchführbarkeit und eine kostengünstigere Verwendung zu ermöglichen. Es wird gleichzeitig der Vorteil ausgenutzt, die Phase des Ultraschalls direkt aufzeichnen zu können. So ist es bei einer Übereinstimmung von Objekten in Messdaten und digitalen Musterhologrammen möglich, virtuelle Teile einer ebenen Referenzwelle zu rekonstruieren, um das Objekt zu orten und zu erkennen.

Das Verfahren wurde von Tobias Wenzel bereits früher im Rahmen von „Jugend forscht“ theoretisch untersucht. Nunmehr wurde es experimentell getestet. Über die ersten Ergebnisse wird berichtet.

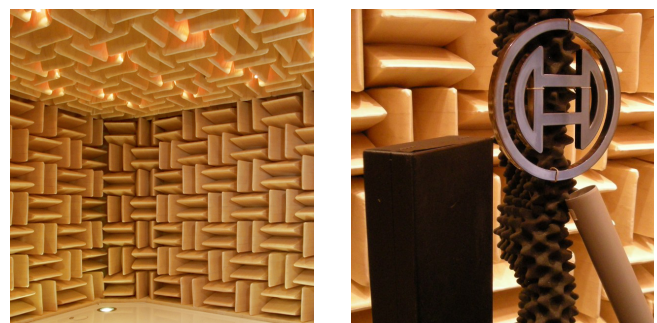
## Experimentelle Untersuchung

Zur Überprüfung der Nutzbarkeit von Ultraschallhologrammen für den virtuellen Wiedererkennungsprozess wurden nach dem Aufbau in Abb. 1 Schallmessdaten aufgezeichnet. Die Messungen fanden in einem reflexionsarmen Halbraum (Abb. 2 links) der Robert Bosch GmbH statt, der speziell für Schallmessungen im Hörfrequenz- und hörnahen Ultraschallbereich ausgestattet ist [7]. Bei der Gestaltung aller Raumelemente wurde auf eine re-



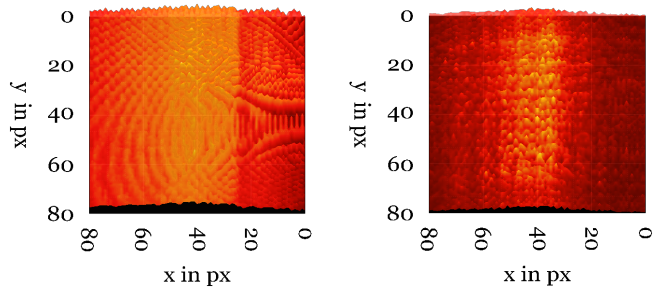
**Abbildung 1:** Schematischer Ablauf der holographischen Aufzeichnung und der virtuellen Rekonstruktion. Vor der Rekonstruktion werden verschiedene Welleninformationen miteinander verrechnet.

flexionsarme Ausführung bis zu hohen Frequenzen geachtet. Die im Messraum notwendige elektrische Positioniereinrichtung wurde mit absorbierendem Schaumstoff möglichst vollständig verkleidet. Als Schallsender wurde ein piezoelektrischer Wandler 120KHF25 der Firma SensComp verwendet. Dieser besitzt eine Arbeitsfrequenz von 125 kHz, einen Öffnungswinkel von 10° (−6 dB) und ist speziell für die Luftschallabstrahlung mit einer Anpassungsschicht versehen. Als Sensoren wurden zwei 1/8-Zoll-Mikrofone Typ Brüel & Kjær 4138 verwendet, eines feststehend als Referenzmikrofon und eines von der Positionierungseinrichtung bewegt für die Abtastung des Schallfeldes. Dieser Mikrontyp ist für Messungen bis 140 kHz geeignet.



**Abbildung 2:** links Reflexionsarmer Halbraum, rechts die drei verwendeten Rückstreubjekte (Quader, Zylinder und Bosch-Logo).

Das Schallfeld wurde mit einem der Sensoren in einer Ebene an  $N \times M = 81 \times 81$  Punkten mit einem quadratischen  $\Delta x, y = 5$  mm Raster abgetastet. So wurden Hologramme des leeren Raumes und dreier verschiedener Objekte (Abb. 2 rechts) aufgenommen. Abb. 3 zeigt die gemessene Intensität des komplexen Wellenfeldes der Reflexion am Zylinder und seiner virtuellen Rekonstruktion.



**Abbildung 3:** links aufgezeichnetes akustisches Hologramm ( $f = 123$  kHz) des Zylinders aus Abb. 2 rechts, rechts eine Ebene des rekonstruierten Wellenfelds.

## Holographisches Vergleichsverfahren

Die Wellenfelder  $\mathcal{O}_A(x, y) := A_{\mathcal{O}_A} e^{-i\Phi_{\mathcal{O}_A}}$  der Objekte im Raum werden als Hologramm im Vergleich zu einer ebenen virtuellen Referenzwelle  $R(x, y) := A_R e^{-i\Phi_R} = 1$  aufgezeichnet. Die auf Grund der langen Wellenlänge nur groben Objektumrisse im Raum lassen sich durch eine virtuelle Propagation der Wellenfelder rekonstruieren (siehe Abb. 3). Zur Propagation des quadratischen Wellfeldes  $\mathcal{O}(x, y, z = 0)$  in die Ebene  $\mathcal{O}(x, y, z \neq 0)$  (Gl. 1) wurde der FFT Algorithmus und der Faltungssatz mit der Transfer Funktion  $G_F(n, m)$  in Fresnel-Näherung [6] (Gl. 2) verwendet. Es gilt  $n, m \in \{0, 1, 2, \dots, N - 1\}$ .

$$\mathcal{O}(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1} \{ \mathcal{F} \{ \mathcal{O}(x, y, 0) \} \cdot G_F(n, m) \} \quad (1)$$

$$G_F(n, m) = \exp \left\{ i\pi z \left( \frac{\lambda [n^2 + m^2]}{N^2 \cdot \Delta x} - \frac{2}{\lambda} \right) \right\} \quad (2)$$

Zur Objekterkennung können rekonstruierte Objektumrisse verglichen werden. Mit dem präsentierten Verfahren wird der Zwischenschritt der Rekonstruktion überflüssig. Messungen und Musterhologramme können so miteinander verrechnet werden, dass bei der Wellenfeldpropagation ein Intensitätspeak an dem Ort des erkannten Objekts (Abb. 4) entsteht, der leicht automatisch ausgewertet werden kann. Der Peak ist der erfolgreich rekonstruierte Teil einer Referenzwelle  $\mathcal{C}_{AM}(x, y, 0)$ , die als reelles Bild (letzter Term) des Feldes  $E_{AM}$  in Gl. 3 bei der Multiplikation des gemessenen Wellenfeldes  $\mathcal{O}_A(x, y, 0)$  mit dem Musterhologramm  $H(\mathcal{O}_M(x, y, 0))$  entsteht.

$$E_{AM}(x, y, 0) = \mathcal{O}_A (R^2 + \mathcal{O}_M^2 + R^* \mathcal{O}_M + R \mathcal{O}_M^*) \quad (3)$$

$$\mathcal{C}_{AM}(x, y, 0) = \mathcal{O}_A R \mathcal{O}_M^* \quad (4)$$

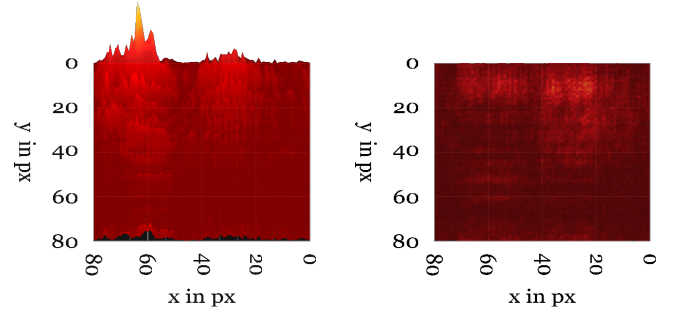
$$= A_{\mathcal{O}_A} A_{\mathcal{O}_M}^* A_R e^{-i(\Phi_R + \Phi_{\mathcal{O}_A} - \Phi_{\mathcal{O}_M})} \quad (5)$$

$$= A_{\mathcal{O}}^2 A_R e^{-i\vec{k}_R \cdot \vec{r}} \quad | \text{ wenn } \mathcal{O}_A = \mathcal{O}_M$$

Eine ungewollte Amplitudenmodulation des Vergleichswellenfeldes  $\mathcal{C}_{AM}$  durch  $A_{\mathcal{O}}$  kann herausgerechnet werden. Das Wellenfeld  $\mathcal{C}_{AM}(x, y, 0)$  wird ebenfalls nach Gl. 1 im Raum  $z > 0$  propagiert. Erste experimentelle Ergebnisse sind in Abb. 4 dargestellt. Die Intensität des Peaks gibt die Ähnlichkeit zwischen gefundenem und gesuchtem Objekt und die x,y,z Position den Ort an.

## Diskussion und Ausblick

Das Verfahren scheint geeignet, optische Erkennungsmethoden in einigen Umgebungen zu ersetzen und sie im



**Abbildung 4:** links Intensität des Feldes  $\mathcal{C}_{AM}$ , wobei  $\mathcal{O}_A$  das Wellenfeld des Bosch-Ankers und  $\mathcal{O}_M$  das Wellenfeld der Objekte in Abb. 2 ist. Der Peak zeigt die Position des erkannten Bosch-Ankers in einer Ecke des Sichtfeldes bei  $z = 80$  cm an. rechts  $\mathcal{O}_A$  ist hier das Hintergrundwellenfeld ohne Objekt; es wird kein Objekt erkannt und es entsteht kein Peak.

allgemeinen sinnvoll ergänzen. Die erfassten Daten des Schalldruckfeldes können zusätzlich auf andere Art ausgewertet werden (siehe Einleitung), um weitere Informationen zu gewinnen.

Holographische Objekterkennungsverfahren sind für viele Gebiete in Industrie, Technik und Medizin interessant. Akustische Verfahren erweitern die Anwendungen auf größere Objekte. Ein mögliches Anwendungsgebiet des Verfahrens ist daher die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung von großen Objekten und in Materialien, die für Licht nicht transparent sind. Auch zur Steuerung von Robotersystemen könnte das beschriebene System eingesetzt werden, da mit der Verwendung des FFT Algorithmus ein sehr schneller Vergleich mit vielen Vergleichshologrammen möglich ist. Dazu müsste allerdings ein Array von mehreren tausend Mikrofonen eingesetzt werden.

Nachteile des Erkennungssystem sind der hohe technische Aufwand sowie das teilweise nichtlineare Verhalten von Ultraschall in Luft. Einige Objekte sind mit Schall schlecht zu erkennen, weil sie die Wellen spekulär reflektieren. Die momentan noch niedrige Genauigkeit des Systems in lateraler Richtung kann in Zukunft mit Multiwellenlängen-Ultraschallholographie [2] verbessert werden. Die bestehenden Ansätze werden weiter untersucht, um das Verfahren genauer zu charakterisieren. Auch Filtermethoden für das rekonstruierte Wellenfeld wie z. B. Tiefpassfilter sind weiterhin Gegenstand der Forschung.

## Literatur

- [1] L. Ma, H. Wang, Y. Li, H. Jin, ZNU. *Journal of Optics A: Pure Appl. Opt.* 6 (2004)
- [2] A. Knoll, IEEE. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7 No. 4 (1991)
- [3] W. P. Mason, R. N. Thurston. *Physical Acoustics*, Academic Press (1973)
- [4] Y. Li, J. Rosen. *Opt. Soc. Am. A*, Vol. 19 No. 9 (2002)
- [5] B. Javidi, E. Tajahuerence. *Opt. Lett.*, Vol. 25 No. 9 (2000)
- [6] T. Kreis, BIAS. *Handbook of Holographic Interferometry*, Wiley-VCH (2005)
- [7] A. Gerlach, V. Wittstock, C. Bethke, BOSCH. *Halbfreifeldraum für Schallmessungen im hörnahen Ultraschallbereich*, 32. DAGA (2006)