

# Akustische Ortung mobiler Objekte in großen Räumen

Matthias Schneider, Daniel Wehden, Ralf Salomon

Institut für Angewandte Mikroelektronik und Datentechnik, Universität Rostock

{Matthias.Schneider, Daniel.Wehden, Ralf.Salomon}@Uni-Rostock.de

Dieser Beitrag beschreibt ein Indoor-Positionierungssystem für ein mobiles Gerät in der Landwirtschaft zur Umwälzung von Getreide in Silo's bzw. in großen Räumen (Lagerhallen) unter der Forderung von geringen Kosten (unter 1000 €) und geringem Installationsaufwand auf der Grundlage von hörbarem Schall.

## Einleitung

Zu feuchtes, zu warmes oder anderweitig überlagertes Getreide verursacht jedes Jahr erhebliche wirtschaftliche Schäden, die zu Lasten der Landwirte gehen. Das systematische Umwälzen des eingelagerten Getreides ist eine weit verbreitete Gegenmaßnahme, die ihrerseits jedoch mit erheblichen Personalzusatzkosten verbunden ist. Für diese Tätigkeit wurde jüngst ein Roboter konstruiert, genannt Kornknecht [6], der unterhalb einer etwa 30 cm × 60 cm großen Plattform zwei Schnecken beherbergt, die das Getreide umwälzen können.

Gegenstand dieses Beitrages ist ein System zur Positionsbestimmung (Lokalisierung) des Roboters. Aus den gelieferten Daten (Koordinaten) kann eine nachgeschaltete Software die notwendigen Steuerkommandos für den Roboter ableiten, was letztlich ein autonomes, d.h. personalfreies Umwälzen des eingelagerten Getreides in bis zu 50 m × 50 m großen Silos gewährleistet. Aufgrund konstruktiver Gegebenheiten wird eine Genauigkeit von 30 cm benötigt, wobei die Kosten des Positionserkennungssystem 1000 € nicht überschreiten dürfen.

## Verbreitete Positionserkennungssysteme

GPS (global positioning system [7]) ist ein sehr verbreitetes Verfahren, dass die geforderten Anforderungen bezüglich Präzision und Kosten erfüllen würde. Allerdings lässt sich GPS nicht innerhalb geschlossener Räume, insbesondere bei Vorhandensein metallischer Abschirmungen in Decken und Wänden einsetzen. Alternativ ermöglichen Sensornetzwerke [8] die Positionsbestimmung mit der geforderten Genauigkeit. Allerdings erfordern diese Verfahren einen derart hohen Installationsaufwand, der den angestrebten Kostenrahmen bei weitem sprengen würde. Mechanische Verfahren wie die Entfernungsbestimmung mittels Laser erfordern eine präzise mechanische Nachführung, die mit zu hohen Kosten verbunden sind und somit hier nicht weiter berücksichtigt werden.

## Akustische Ortung

Aufgrund der oben beschriebenen Probleme bezüglich verfügbarer Ortungstechniken fokussiert der vorliegende Beitrag auf die Positionsbestimmung mittels Schall. Dazu wird, wie in Abbildung 1 skizziert, der Roboter mit einem Sender ausgestattet, dessen Signale an den vier Wand-Decken-Ecken des Silos empfangen werden.

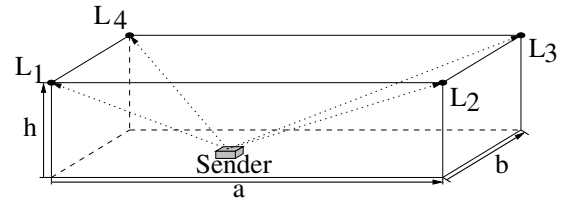


Abbildung 1: Anordnung von Schallsender und -empfänger im Silo.

**Laufzeitmessung:** In der beschriebenen Konfiguration ermittelt jeder Empfänger die Zeit, die das akustische Signal benötigt, um den Empfänger zu erreichen. Zu diesem Zweck signalisiert der Sender mittels eines zusätzlichen elektrischen Signals, das mit etwa  $v_e \approx 300.000 \text{ km/s}$  übertragen wird, den Empfängern den Anfang der akustischen Übertragung. Da sich der Schall mit konstanter Geschwindigkeit  $v_s \approx 340 \text{ m/s}$  ausbreitet und dabei deutlich langsamer als das elektrische Signal ist, kann somit jeder Empfänger direkt seine Entfernung zum Roboter ableiten.

Die vom Sender ausgehenden und beim Empfänger eingehenden akustischen Signale sind in Abbildung 2 dargestellt. Dabei handelt es sich um einen „Burst“ von fünf Perioden. Bei einer mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa  $v_s \approx 340 \text{ m/s}$  genügt eine Abtastfrequenz von 10 KHz, um eine Genauigkeit von etwa 4 cm zu erreichen, was sich durch preiswerte Komponenten erreichen lässt.

**Schallfrequenz und Dämpfung:** Bei Verwendung von punktförmigen Schallquellen mit isotroper Schallabstrahlung ist eine deutliche Intensitätsabnahme entlang der radialen Ausbreitung des Schalls zu beobachten. Diese Abnahme lässt sich im wesentlichen durch die beiden physikalischen Effekte Divergenz und Absorption beschreiben [3]. Für die hier betrachtete Form der Wellenausbreitung ist der Divergenzpegel

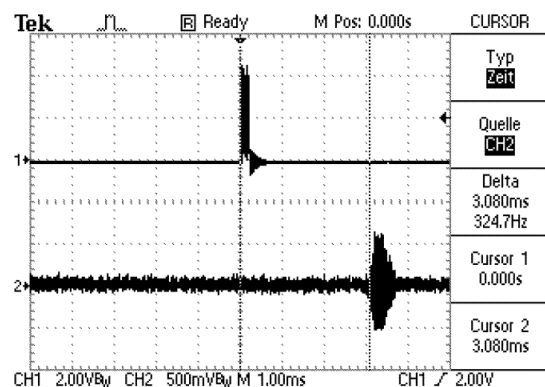
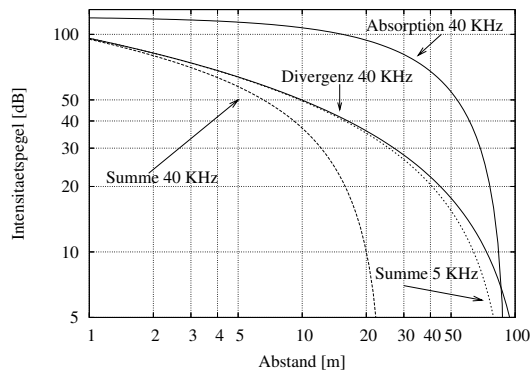


Abbildung 2: Laufzeitmessung am Oszilloskop.



**Abbildung 3:** Einfluss von Divergenz und Absorption auf die Intensitätsabnahme eines 40 KHz und 5 KHz Schallsignals.

gegeben durch:  $L_{div} = 20 \text{ dB} \lg(r_1/r_2)$ , wobei  $r_1$  und  $r_2$  die radialen Abstände des Beobachtungsausgangs- und Endpunktes der Intensitätsabnahme von der Schallquelle sind.

Für die Absorption gilt entsprechend  $L_{abs} = -D(r_2 - r_1)$ , wobei der Dämpfungsbeitrag  $D$  prognostisch in Abhängigkeit von der Schallfrequenz sowie der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit berechnet werden kann [4].

Abbildung 3 illustriert, wie sich Divergenz und Absorption auf die Abnahme  $\Delta L = L_{div} + L_{abs}$  eines 40 KHz Signals auswirken. Bei diesen Frequenzen ist der Einfluss der Absorption derartig groß, dass mit herkömmlichen Sendern nur Weiten von etwa 20 m realisierbar sind. Für Frequenzen unter 5 KHz ist jedoch der Dämpfungsbeitrag  $D$  so gering, dass der Schall auch noch in 100 m Entfernung mit herkömmlichen Geräten detektierbar ist. Nachteilig ist jedoch, dass diese Frequenzen für das menschliche Ohr gut hörbar sind, so dass die konkrete Signalform von besonderer Bedeutung ist. Daher werden im vorliegenden Beitrag nur Signale bestehend aus fünf Perioden betrachtet (siehe oben und Abbildung 2), die als einfache „Klickgeräusche“ wahr genommen werden.

## Resultate

Die oben beschriebenen Konzepte wurden in einer Reihe von Messungen (Labor und Silo) experimentell untersucht. Dazu wurde ein Sender mit einem „Burst“ bestehend aus 5 Perioden kurzzeitig in Schwingung versetzt. Sowohl das Sende- als auch Empfangssignal wurden im selben Zeit-Spannungsdiagramm (Abbildung 2) auf einem Oszilloskop dargestellt und durch Messung der Zeitdifferenz zwischen der 1. Signalfanke des Sende- und Empfangssignals die Laufzeit des Schallimpulses bestimmt.

Die Messungen ergaben, dass sich mittels eines 40 KHz Ultraschallsenders der Abstand zwischen Sender und Empfänger mit einer Genauigkeit von unter 25 mm bestimmen lässt. Allerdings ist die maximale Distanz auf 20 m beschränkt, womit sich die gestellte Anforderung von 50 m nicht erfüllen lässt.

Die Messergebnisse für hörbaren Schall im Bereich von 5 KHz ergaben eine erreichbare Genauigkeit von unter 50 mm bei einer stark erweiterten Maximaldistanz von ungefähr 50 m. Die oben beschriebenen Messergebnisse sind nochmals in Tabelle 1 zusammengefasst.

**Tabelle 1:** Laufzeitmessergebnisse für 40 und 5 kHz Schallsignal.

Frequenz	Reichweite	Ungenauigkeit
40 KHz	18,0 m	21,30 mm
5 KHz	50,0 m	40,17 mm

Die Messergebnisse haben ferner gezeigt, dass die durch Reflexionen an Wänden und Objekten verursachte Nachhallzeit [1] aufgrund der geringen Fahrgeschwindigkeit von etwa 1 m/min keinen negativen Einfluss auf die Robotersteuerung hat.

## Verbesserung gegenüber Störgeräuschen

Insbesondere hörbarer Schall ist im vorliegenden Anwendungsfall sehr anfällig gegenüber akustischen Störgeräuschen. Um hier eine Verbesserung zu erzielen, wird das übertragene akustische Signal um weitere „Bursts“ erweitert, die ebenfalls aus 5 Perioden bestehen jedoch variierende Zeitabstände zueinander haben. Auf der Empfängerseite wird das Empfangssignal  $e()$  mit dem entsprechenden Referenzsignal  $r()$  kreuzkorreliert [2]:  $k(\tau) = \sum_{i=0}^{N-1} a(i)b(i+\tau)$ , wobei  $N$  die Zahl der Messwerte und  $\tau$  die Zeitverschiebung repräsentieren. Die tatsächliche Laufzeit  $\tau$  wird durch den Maximalwert  $k(\tau)$  rekonstruiert.

## Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag hat ein Ortungssystem vorgestellt, das mit hörbarem Schall arbeitet und sich somit kostengünstig (unter 1000 €) realisieren lässt. Die Messungen ergaben eine Genauigkeit von besser als 50 mm auf einer Länge von bis zu 50 m. Zur Verbesserung der Robustheit gegenüber Störgeräuschen wurde die Kreuzkorrelation eingesetzt.

## Literatur

- [1] Ekbert Hering, Rolf Martin und Martin Stohrer, *Physik für Ingenieure*. VDI Verlag, 1995.
- [2] John G. Proakis und Dimitris G. Manolakis, *Digital Signal Processing - Principles, Algorithms and Applications*. Macmillan Publishing Company, 1992.
- [3] Jürgen A. Stein, *Physik für Ingenieure - Schall*. AVH - Verlag Hamburg, 1997.
- [4] ISO 9613-1: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 1. International Organization for Standardization, 1993.
- [5] DIN 9613-2: Dämpfung des Schalls bei Ausbreitung im Freien. Deutsches Institut für Normung e.V., 1996.
- [6] <http://www.getreidetechnik-web.de>.
- [7] Elliot D. Kaplan, *Understanding GPS: Principles and Applications*. Artech House Publishers, 1996
- [8] Ian F Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Snkarasubramaniam and Erdal Cayirci, *A Survey on Sensor Networks* IEEE Communication Magazine (August 2002), 102-114