

**Neue Methoden zur präzisen und
schnellen Entfernungsmessung unter
Verwendung von Ultraschall**

Ein Ansatz

Ulrich Franke

5. Juni 2003

Neue Methoden zur sicheren, schnellen und präzisen Entfernungsmessung mit Ultraschall, Ein Ansatz. © ® Cand. Ing. Elektrotechnik ETH Ulrich Franke, Zürich 5. Juni 2003

Vorwort

Dieses Dokument soll eine Basis für eine Studie¹ neuer Methoden der Entfernungsmessungen mit Ultraschall legen. Zuerst werden die bisherigen Methoden zu diesem Prinzip vorgestellt, deren Vor- bzw. Nachteile erläutert. Darauf folgend wird ein neuer Ansatz dieses Problems vorgestellt, zuerst theoretisch und nach einer Sondierung die Erwartungen betreffend, noch ein mögliches System zur Studie der neuen Methode vorgestellt. Das Ziel dieses Papers sind neue Methoden, die eine genaue Ortung mit hoher Messwertrate und einer soliden Funktionsweise in einer Umgebung mit mehreren Ultraschall Entfernungsmessern garantieren.

¹z.B. im Zuge einer Diplomarbeit

Inhaltsverzeichnis

1	Bestehende Methoden	5
1.1	Drei bekannte Methoden	5
1.1.1	Reflexionsverfahren	5
1.1.2	Baken-Verfahren	6
1.1.3	Ultraschall Entfernungsmessung mit Pseudo-Random Sequences	6
1.2	Evaluierung der vorgestellten Methoden	7
1.2.1	Echos	7
1.2.2	Messdauer	7
1.2.3	Dispersion durch Entfernung	8
1.2.4	Übersprechen zweier Messkreise	9
1.2.5	Vor- und Nachteile der PRS-Methode	9
2	Mögliches Testsystem	11
2.1	Messmethode	11
2.2	System Architektur	12
2.3	Design eines Prototyps	12
3	Conclusion	12
4	Danke	12

1 Bestehende Methoden

Dieser Abschnitt soll einen Überblick über die existierenden Methoden zur Ultraschall Entfernungsmessung und deren Eigenschaften geben.

Es werden zuerst die einzelnen Methoden vorgestellt und daraufhin evaluiert.

Weiterhin soll dieser Abschnitt eine Basis zur Synthese neuer Methoden darstellen, auf die sich der darauffolgende Abschnitt 2 bezieht. Eingegangen wird auf das klassische Reflexionsverfahren, das Bakenverfahren und eine Implementation mittels Pseudo-Random Sequences

1.1 Drei bekannte Methoden

1.1.1 Reflexionsverfahren

Entfernungsmessung, sei es optisch oder akustisch, beruht in den meisten Fällen auf der Laufzeitmessung eines Signals, das die Strecke zwischen den beiden Objekten, deren Abstand gemessen werden soll, ein- oder mehrmals durchläuft².

Nun gibt es die Möglichkeit, das Signal zum Objekt zu schicken, das Echo abzuwarten und aus der sich ergebenden Zeitdifferenz zwischen Senden und Empfangen und der charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals die Entfernung zu berechnen, siehe Abbildung 1.

Genau das ist das Vorgehen beim Reflexionsverfahren mit Ultraschall. Ein Sender schickt ein Signal, mit einer Frequenz von z.B. $f = 40kHz$, einer Impulslänge von $\tau_{Impuls} = 1ms$ aus und wartet, bis ihn das Echo wieder erreicht, während man die Zeit Δt zwischen Aussenden und Empfangen misst. Man kann von einer ungefähren Ausbreitungsgeschwindigkeit von ca. $v_{Schall} = 330\frac{m}{s}$ ausgehen, welche jedoch stark von einigen Umgebungsvariablen abhängig ist, auf das ich aber in Abschnitt 1.2 noch zu sprechen kommen werde. Somit kann man auf triviale Art und Weise auf die Entfernung schliessen:

$$d = v_{Schall} \frac{\Delta t}{2} \quad (1)$$

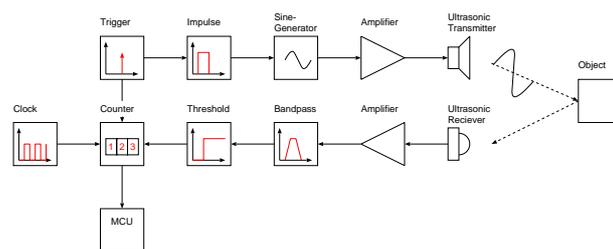


Abbildung 1: Klassisches System zur Entfernungsmessung mit Ultraschall auf Reflexionsbasis

Eine übliche Implementation besitzt eine ungefähre Struktur wie in Abbildung 1 gezeigt. Ein Microcontroller triggert einen Pulsgenerator, der damit einen Sinusgenerator steuert. Der Ausgang dessen wird verstärkt mit einem

²Methoden, die nicht auf Laufzeitmessung beruhen, wären zum Beispiel die Interferometrische- oder Phasen-Methode mit einem Laser [1]

Ultraschall-Schallwandler versendet. Gleichzeitig wird ein Counter, zum Beispiel intern im Microcontroller, gestartet. Wenn nun das Echo vom Objekt zurückkommt, wird es verstärkt, Bandpass-gefiltert, um eventuelle Nebengeräusche zu eliminieren. Daraufhin wird durch eine Schaltschwelle der Counter wieder gestoppt. Der Counter kann nun ausgelesen werden. Mit der bekannten Referenzclock kann nun die Zeit und somit die Entfernung berechnet werden.

1.1.2 Baken-Verfahren

Das Bakenverfahren³ [4] beruht auf ähnlichen Überlegungen wie das Reflexionsverfahren (siehe Abschnitt 1.1.1). Die Entfernung wird auch wieder durch die Laufzeit des übertragenen Signals bestimmt. Die einzige, jedoch wichtige, Änderung findet sich in der örtlichen Verteilung des Systems.

Der Empfänger ist vom Sender, der "Bake", getrennt, siehe Abbildung 2. Der Empfänger steuert via Infrarot den Sender an, der auf diesen Befehl hin das Signal, erzeugt wie in Abschnitt 1.1.1, abgibt. Der Empfänger lässt einen durch den ausgesendeten Startimpuls getriggerten Counter laufen, der durch das zurückgesendete Ultraschallsignal wieder gestoppt wird. Da das Verhältnis der Schallgeschwindigkeit zur Lichtgeschwindigkeit k vernachlässigbar klein ist, hat die Dislozierung keinen Einfluss auf den Messvorgang:

$$k = \frac{v_{Schall}}{v_{Licht}} = 1.10076E - 6 \quad (2)$$

Durch diese Aufteilung muss nun der Schall die zu messende Strecke nur einmal durchlaufen, was jede einzelne Messung um die Hälfte verkürzt. Weitere Vorteile sollen noch im Laufe dieses Textes erläutert werden.

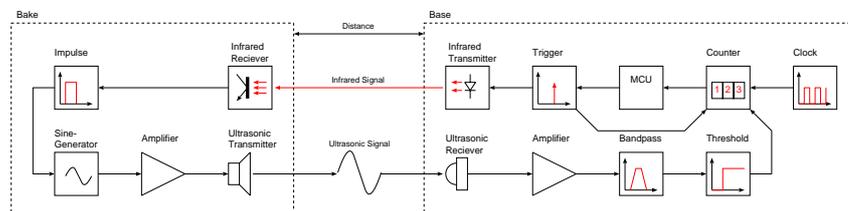


Abbildung 2: System zur Entfernungsmessung mit Ultraschall mittels Bake

1.1.3 Ultraschall Entfernungsmessung mit Pseudo-Random Sequences

Auch dieses Verfahren ([2], [3]) beruht wieder auf der Entfernungsmessung mittels Laufzeitmessungen, aber mit einigen Erweiterungen (man vergleiche Abbildung 3 mit Abbildungen 1 und 2).

Erstens wird Anstatt des sinuodialen Signals ein Random-Noise Pattern⁴ verwendet.

Zweitens wird das zu sendende Signal nicht mit einem Oszillator erzeugt, sondern es wird aus dem Speicher eines Prozessorsystems gelesen und D/A

³Bake: Festes Orientierungszeichen bzw. Seezeichen an Land für die Seefahrt, z.B. die Kugelbake.

⁴Eine zufallsähnliche Folge von Zahlen, deren Autokorrelation **voll**, die Kreuzkorrelation mit einer anderen Folge jedoch **nicht** ausschlägt.

gewandelt und verstärkt gesendet. Damit hat man eine vollständige Kontrolle über das Quellensignal.

Drittens wird der Counter nicht durch einen analogen Trigger gestoppt, sondern man berechnet mit dem Empfangenen und dem Referenzsignal aus dem Speicher die Korrelation, die genau dann ausschlägt, wenn der Empfangsdatenstrom mit dem gespeicherten Referenzsignal korreliert. Dieser Ausschlag stoppt den internen Counter.

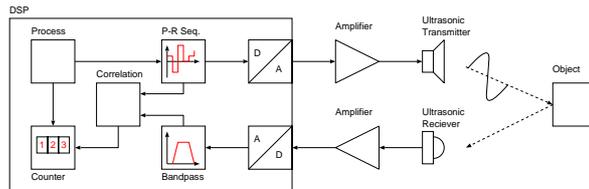


Abbildung 3: System zur Entfernungsmessung mittels Random Noise Pattern

1.2 Evaluierung der vorgestellten Methoden

1.2.1 Echos

Ein grosses Problem der klassischen Ultraschall Entfernungsmessung sind die auftretenden Echos, sei es durch Flächen hinter dem zu erfassenden Objekt oder seitlich. Der Öffnungswinkel eines Ultraschallempfängers ist extrem gross, das gilt auch für den Sender.

Da nun Verfahren 1.1.1 und 1.1.3 auf dem Reflexionsverfahren beruhen, trifft in den meisten Fällen nicht nur das gewünschte Echo beim Empfänger ein. Um nun die relevanten Signale aus dem chaotischen Strom reflektierten Schalls heraus zu filtern, bedarf es durchdachter Algorithmen und selbst dies garantiert nicht eine sichere Funktionsweise.

Aus diesem und einem weiteren Grund, der später noch angesprochen wird, wurde das Bakenverfahren (siehe Abschnitt 1.1.2) vorgestellt. Bezüglich der Reflexion besitzt es nämlich den Vorteil, dass das Messsignal nur in Richtung Empfänger propagiert und man nicht auf Basis eines Echos misst. Der Grossteil der Reflektierten Signale bewegt sich vom Empfänger weg, abgesehen von seitlichen Echos, deren Störfaktor man durch eine einfache Massnahme eliminieren kann, da das Messsignal den kürzesten Weg vom Sender zum Empfänger besitzt und dadurch sicher immer als erstes eintrifft, was beim Reflexionsverfahren nicht garantiert ist.

1.2.2 Messdauer

Ein weiteres Problem für Systeme, in denen die gemessene Entfernung eine Regelgrösse ist⁵, ist die mittlere Messzeit. Dazu kommt noch, dass man oft, um die Auflösung zu steigern, die Messergebnisse mittelt. Damit würde das System, ausgehend vom Reflexionsverfahren (Abschnitt 1.1.1), eine enorm tiefe Messrate besitzen. Ein Beispiel dazu:

⁵die in Echtzeit überwacht werden muss

Beispiel: Man möchte Entfernungen bis zu 20 Metern mit dem Reflexionsverfahren messen. Im schlimmsten Falle also wäre das Objekt am weitesten entfernt ($d = 20m$). Bei einer Schallgeschwindigkeit von $v_{Schall} = 330 \frac{m}{s}$ würde es

$$t_{Propagation} = \frac{2d}{v_{Schall}} = 121.21ms$$

dauern, bis das Signal vom Sender zum Objekt und zurück propagiert wäre. Nicht eingerechnet wäre weder die Pulslänge ($t_{Puls} \approx 1ms$), noch die Zeit, die man warten müsste, bis alle eventuellen weiteren Echos abgeklungen wären ($t_{Postecho} \approx t_{Propagation}/2$).

Damit wäre man ungefähr bei einer maximalen Messdauer von $t_{Messdauer} \approx 200ms$, was eine erbärmliche Messrate von 5 Messungen pro Sekunde bedeuten würde. Man kann nun nur noch von Echtzeit reden, wenn das System an sich sehr langsam ist, was in den meisten Fällen nicht der Fall sein wird.

Aber auch hier kommt einem wieder das Bakenverfahren zur Hilfe. Wie leicht ersichtlich, beträgt die für das Messsignal zu überbrückende Distanz zwischen Empfänger und Sender nur die wirkliche zu messende Distanz. Damit hätte man schon einmal die Propagationszeit im Vergleich zum Reflexionsverfahren um die Hälfte reduziert. Es kommt einem jedoch noch ein weiterer Umstand zur Hilfe:

Da man nicht mehr auf das zurückkommende Echo warten muss, kann man unter Verwendung geschickter Codierung, was im Folgenden noch beschrieben werden soll, die Messimpulse in kurz aufeinanderfolgenden Abständen absenden. Hierzu ein weiteres Beispiel zu einer "Pipeline-Messung":

Beispiel: Wir nehmen an, wir würden die gleiche Impulslänge wie im Beispiel zuvor senden ($t_{Puls} = 1ms$). Zwischen den Pulsen fügen wir $t_{NichtPuls} = 4ms$ ein, damit die Pulse eine wohldefinierte Grenze besitzen. Auf zurückkommende Echos müssen wir jetzt nicht mehr warten, da wir uns des Bakenverfahrens bedienen. Man sendet einen kontinuierlichen Strom an Daten. Damit hat man eine mittlere Messrate von

$$f_{Messung} = \frac{1}{t_{NichtPuls} + t_{Puls}} = 200Hz$$

Das ist eine Verbesserung zum vorherigen Verfahren um Faktor 100. Man darf jedoch nicht vergessen, dass hier sich die Entfernung in einer anderen Art und Weise bemerkbar macht. Die Resultate kommen zwar mit einer höheren Rate beim Empfänger an, die Verzögerung zwischen Messungsbeginn und Resultat ist jedoch immernoch von der einfachen Distanz d und der Schallgeschwindigkeit v_{Schall} abhängig ($t_{Delay} = d/v_{Schall}$).

1.2.3 Dispersion durch Entfernung

Wie bei allen Wellen, die sich in einem Medium ausbreiten, unterliegt auch die Schallwelle einer Dämpfung, die von der Entfernung abhängig ist. Deshalb gibt es bei den Verfahren 1.1.1 und 1.1.2 eine Dämpfungsabhängige Messwertverzerrung: Die Flanken des Impulses (Einhüllenden des Wellenpaketes) flachen bei

zunehmender "Flugzeit" immer mehr ab. Dadurch schaltet der Stopp-Trigger des Empfängers (siehe Abbildungen 2 und 1) verzögert, was zu einem Fehler im Messwert führt.

Es ist möglich einen Teil dieses Fehlers durch eine Korrekturfunktion⁶ wieder herauszurechnen, jedoch sind die Flanken des Signals mit einer Triggerstufe dieser Art allgemein sehr schwer zu erfassen. Genau darauf zielt das Verfahren der Entfernungsmessung mittels Pseudo-Random Sequences ab. Hier wird nicht die Amplitude eines Signals als Triggerreferenz benutzt, sondern seine "Ähnlichkeit" mit dem Abgesendeten.

Implementiert wird dieser Ansatz, indem man die Korrelation des empfangenen Signals mit dem Gesendeten berechnet. Die Korrelation ist sehr empfindlich und schlägt hart aus, sobald das sich das empfangene Signal sich mit dem gespeicherten Referenzsignal deckt. Dabei ist die Korrelation unabhängig von einer eventuellen Dämpfung des Signals.

Wenn man nun diesen Ausschlag benützt, um den Counter zu stoppen, ist es möglich, Genauigkeiten bis in den Millimeterbereich zu erzielen [2] (zum Vergleich: mit dem herkömmlichen Reflexionsverfahren ist unter sehr günstigen Umständen eine Auflösung von 2.5cm erreichbar [4]). Das System besitzt jedoch noch einige Drawbacks, die noch eine Erhöhung der Präzision erlauben sollten (siehe Abschnitt 1.2.5).

Diese höhere Auflösung und Unabhängigkeit von Dispersion muss allerdings mit einem höheren Hardwareaufwand beglichen werden. Ein DSP mit entsprechender I/O-Peripherie, unter anderem Analog zu Digital und Digital zu Analog Wandler, sind der Preis.

1.2.4 Übersprechen zweier Messkreise

Mit den Verfahren 1.1.1 und 1.1.2 ist es nicht möglich, zwei oder mehrere Entfernungsmessungssysteme miteinander zu betreiben. Die unterschiedlichen Signale würden bei den Empfängern nicht unterscheidbar sein und eine kontrollierte Messung verunmöglichen.

Wie schon in den Abschnitten zuvor dominieren auch hier die Vorteile des Pseudo-Random-Sequence Verfahrens. Das ausgesendete Pseudo-Rauschen hat ähnliche Eigenschaften wie weisses Rauschen. Eine Autokorrelation einer Pseudo-Random Sequence schlägt voll aus, im Gegensatz zu einer Kreuzkorrelation mit einer anderen Pseudo-Random Sequence, da diese nicht korrelieren.

Damit kann man die Empfänger auf Sender einstellen, die ihre Signale durch eine ihnen vorgegebene Signatur kennzeichnen. Die Unterscheidung ist sehr eindeutig (siehe [2]), es sind **sicher** mehrere solcher Systeme in näherer Umgebung miteinander betreibbar.

1.2.5 Vor- und Nachteile der PRS-Methode

Die in [2] und [3] vorgestellte Methode der Pseudo-Random Sequences zur Entfernungsmessung besitzt in ihrer Originalimplementierung noch einige Nachteile, die zur Reduzierung der Genauigkeit führen. Zwei davon, die den stärksten Einfluss besitzen, seien hier kurz erklärt:

⁶Korrektur des Systematischen Fehlers

Falsches Referenzsignal zur Bildung der Korrelation: Die Korrelation soll aus dem kontinuierlichen Strom von empfangenen Daten die Originalsequenz herausfinden. Dazu muss man diese als Referenz gespeichert haben. In den oben erwähnten Papers wird dazu die erzeugte und im Speicher abgelegte Pseudo-Random Sequence benutzt. Mit diesem Ansatz wird schon die mögliche Genauigkeit reduziert:

Das im Speicher abgelegte Signal entspricht weder dem Signal, was am Ausgang des Senders austritt, also nach D/A-Wandlung, Verstärkung und Schallwandler, noch dem Signal, welches durch ein Mikrofon, Verstärker und A/D-Wandler wieder diskretisiert eingelesen wird.

Es wird somit die Korrelation mit einem verunreinigten Referenzsignal gebildet. Es wurden weder die Nichtlinearitäten des Senders noch des Empfängers berücksichtigt. Das wären die genannten Elemente wie Schallwandler, D/A- und A/D-Wandler, Verstärker u.s.w.. Man wird also nie ein genaues "Passen" des Referenzsignals mit dem Empfangenen erreichen, d.h. man verfälscht die Messung allein schon durch die Verwendung eines falsches Referenzsignals.

Um dies zu eliminieren, genügt eine schon recht einfache Massnahme: Man erzeugt die Pseudo-Random Sequence wie gehabt, aber anstatt diese direkt als Referenzsignal zu benutzen, sendet man diese einmal durch das System und zeichnet sie wieder auf. Dies kann zum Beispiel in einem schalltoten Raum erfolgen, um ungewünschte Nebengeräusche zu eliminieren.

Durch dieses Vorgehen werden die Nichtlinearitäten des Systems dem Referenzsignal aufgeprägt. Somit besitzt man nun ein Referenzsignal, das die Nichtlinearitäten des Systems "gespeichert" hat, sodass diese nicht mehr als Fehler bei der Berechnung der Korrelation mit dem empfangenen Signal auftreten.

Diese Verbesserung wird eine erheblich genauere Fokussierung der in der Berechnung der Korrelation auftretenden Peaks erlauben, was wiederum zu einer genaueren Zeitauflösung der Flugzeit führen wird. Und eine genaue Zeitauflösung der Flugzeit ist Voraussetzung für eine präzise Entfernungsmessung.

Geringe Samplerate: Eine wesentlich offensichtlicherer Einfluss auf die Genauigkeit des Systems findet sich in einer schlecht gewählten Samplerate des Empfängers. In [3] ist die Samplerate des Empfängers bzw Senders bei $200kHz$ angesetzt. Der Grund einer verminderten Auflösung ist nun der folgende:

Wie in den Abschnitten vorher besprochen, messen wir die Entfernung mittels Messung der Flugzeit, auch TOF, *Time Of Flight*, genannt. Also ist es Voraussetzung, diese möglichst genau aufzulösen. Wenn wir nun das System zeitdiskret implementieren, bestimmt uns die Samplerate die Auflösung des Systems.

Idealerweise wird das Fenster des Referenzsignals beim schieben über den gesampelten Empfänger-Datenstrom genau bei einer Sampleposition ausschlagen⁷, an der Position, an der das Signal "angekommen" ist. Diese Position ist nun eine Sampleposition auf dem diskretisierten Zeitraster, welches mit der Zeitauflösung, also der Samplerate aufgelöst ist.

Also ist die Zeitauflösung eine fundamentale Tatsache, die die maximale Entfernungsauflösung festlegt. Wenn man nun eine Samplerate von $f_{Sample} = 200kHz$ verwendet, liegt somit die maximale Zeitauflösung bei $\Delta t = 1/200kHz$

⁷In Realität ist dem nicht so, es gibt an der Basis des Peaks eine Verschmierung. Da aber der Ausschlag einen wohldefinierten Peak besitzt, verändert die zur Verdeutlichung gemachte Vereinfachung nicht die Tatsachen

das entspricht einer Entfernungsauflösung von $\Delta d = v_{Schall} \Delta t = 1.65mm$. Somit ist das System auf diese maximale Auflösung (ohne Mittelung) beschränkt. Will man nun die Auflösung erhöhen, ist es nötig, die Samplefrequenz zu erhöhen.

2 Mögliches Testsystem

Die vorherigen Abschnitte gaben eine Übersicht über die gebräuchlichsten Methoden der UEM. Die Nachteile der einzelnen Methoden wurden erläutert und es wurden Modifikationen der einzelnen Verfahren vorgeschlagen, die zu Verbesserungen führen könnten. Dieser Abschnitt stellt ein mögliches System vor, welches sich der vorgestellten Methoden und der vorgeschlagenen Verbesserungen bedient.

2.1 Messmethode

Eine geeignete Methode für ein genaues Ultraschall-Entfernungs-Messsystem setzt sich aus den vorgestellten Methoden zusammen. Dabei müssen die Verbesserungen noch mit eingebracht werden. Die Messmethode wird demnach auf dem Laufzeitmessungsverfahren beruhen, in dem das Messsignal, durch Anwendung des Bakenverfahrens, die Messstrecke nur einmal in einer Richtung durchläuft. Das erlaubt höhere Messraten, damit eine höhere Mittelungsrate, was sich schlussendlich in genaueren Messungen äußern wird. Als Messsignal wird ein Pseudo-Random Pattern eingesetzt, das effizient das Umgebungsrauschen und das Übersprechen zwischen zwei oder mehreren Messkreisen eliminiert. Weiterhin kann dadurch eine Signatur der einzelnen Messsignal-Impulse erfolgen, was eine Identifikation und Zuordnung ermöglicht. Ein möglicher Ablauf einer solchen Messung könnte in etwa so aussehen:

1. Die Basisstation sendet einen Code an die Bake (Infrarot) und startet einen internen Timer
2. Die Bake sendet ein Pseudo-Random Pattern, welches durch den Code bestimmt ist
3. Das Messsignal durchläuft die Messstrecke und wird von einem Mikrofon empfangen
4. Die Basisstation wandelt kontinuierlich den empfangenen Datenstrom. Schlägt nun die Korrelation zwischen dem gespeicherten Referenzsignal und einem Ausschnitt des kontinuierlich empfangenen Datenstrom aus, wird der interne Timer gestoppt und die Zeit bestimmt
5. Die gemessene Zeit wird in eine Entfernung umgerechnet und vom systematischen Fehler bereinigt
6. Diese bereinigte Zeit wird nun in die Mittelung gespiesen (Tiefpass), welches die Messwertschwankungen (Quantisierungsruschen und Restrauschen des Systems) senkt und damit die Präzision weiter erhöht.
7. Das System startet von neuem mit Punkt 1

Dazu ist noch zu sagen, dass die Messungen sich überschneiden können, somit kann mit Punkt 1 wieder begonnen werden, nachdem eine gewisse Totzeit eingehalten wurde.

2.2 System Architektur

Eine Basisstation eines solchen Systems würde als zentrales Element einen Mixed-Signal DSP-Controller enthalten, da ein solcher zum einen die nötige Rechenleistung zur Durchführung der Berechnungen (Filter, Korrelation, Elimination des systematischen Fehlers) bereitstellt, als auch mit der notwendigen Peripherie aufwarten kann (A/D-Wandler, Schnittstellen zum Versenden der Messresultate). Ein solcher Controller wäre zum Beispiel der ADSP-2199x Mixed Signal DSP Controller von Analog Devices [5].

Die Bake bestünde aus einem Infrarotempfänger, welcher die Kommunikation mit der Basisstation ermöglicht, einem Microcontroller, welcher die Decodierung des empfangenen Signals durchführt und die jeweilige, dem Code entsprechende, im RAM abgelegte Pseudo-Random Sequenz an die Leistungsstufe des Senders übergibt. Als ein solcher Microcontroller käme zum Beispiel der MSP430 von Texas Instruments in Frage, da dieser durch seinen niedrigen Energieverbrauch, grossen RAM und die vorhandenen Schnittstellen die Anforderungen zur Verwendung in einer Bake erfüllen kann [6], [7].

2.3 Design eines Prototyps

3 Conclusion

Dieses Paper stellte die gängigsten Methoden der heutigen Entfernungsmessung unter Verwendung von Ultraschall vor, legte deren Schwachpunkte dar und schlug die entsprechenden Verbesserungsansätze vor. Weiterhin wurde eine Methode präsentiert, welche die Vorteile der einzelnen vorgestellten Methoden vereint und somit eine höhere Genauigkeit und Messrate als in den üblichen Verfahren erreichen könnte. Ein zur Realisierung einer solchen Methode in Hardware geeignetes Testsystem wurde vorgeschlagen.

4 Danke

Literatur

- [1] Rainer Joeckel, Manfred Stober: *Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung*, 4. Auflage, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart 1999
- [2] K.W. Jörg, M Berg, M. Müller, *Towards Sophisticated Mobile Robot Sonar Sensing using Pseudo-Random Sequences*, EUROBOT '97, 2nd Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots, Brescia, Italy, October 22–24, 1997
- [3] K.W. Jörg, M. Berg, *First Results in Eliminating Crosstalk and Noise by Applying Pseudo-Random Sequences to Mobile Robot Sonar Sensing*, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Osaka, Japan, November 4–8, 1996
- [4] G. Schwanz, *Bakensystem mit Entfernungsbestimmung*, <http://www.gs-roboter.de/Experimente/neuebake.htm>, 10.04.2003,
- [5] Analog Devices: *ADSP-2199x Mixed Signal DSP Controller Hardware Reference*, Analog Devices, Inc. Digital Signal Processor Division, Technical Library, 2003
- [6] Texas Instruments: *MSP430x13x, MSP430x14x mixed Signal Microcontroller Datasheet*, 2000–2003, Texas Instruments Incorporated
- [7] Texas Instruments: *MSP430x13x, MSP430x14x mixed Signal Microcontroller Users Guide*, 2000–2003, Texas Instruments Incorporated