

Facharbeit der Kollegstufe

Abiturjahrgang 2009/2011

Kurs:	Leistungskurs Physik
Kursleiter:	OStR Claus Hübl
Verfasser:	Jonas Viczian
Thema:	Positionsbestimmung durch Laufzeitmessung mit Ultraschall
Abgabetermin:	23.12.2010
Note:	_____
Punkte:	_____
Dem Direktorat vorgelegt am:	_____
Punkte eingetragen am:	_____
Unterschrift des Kursleiters:	_____

Inhaltsverzeichnis

1.	Bedeutung der Positionsbestimmung.....	3
2.	Positionsbestimmung	4
2.1.	Angulation	4
2.2.	Hyperbelnavigation	5
2.3.	Trilateration	6
2.4.	Cell-ID Verfahren.....	7
2.5.	Hybridnavigation.....	7
3.	Entfernungsmessung	8
3.1.	Messung der Signallaufzeit	8
3.2.	Messung der Frequenzverschiebung	10
4.	Positionsbestimmung durch Laufzeitmessung mit Ultraschall	11
4.1.	Physikalische Eigenschaften des Piezo-Kristalls	11
4.2.	Erzeugung von Ultraschall mit Piezokristallen	13
4.3.	Schallausbreitung in Luft	14
5.	Versuch	17
5.1.	Versuchsaufbau	17
5.2.	Ultraschallmodul	19
5.3.	Mikrokontroller	21
5.4.	Messungen.....	22
6.	Fazit.....	24
7.	Abbildungsverzeichnis.....	25
8.	Quellennachweis der Abbildungen	26
9.	Literaturverzeichnis.....	27
10.	Anhang	31
10.1.	DVD-Inhalt	31
10.2.	Sourcecode Positionsbestimmung	32
10.3.	Sourcecode Laufzeitmessung	34
11.	Erklärung.....	35

1. Bedeutung der Positionsbestimmung

Da ich mich schon immer für Elektronik interessierte, wollte ich auch in meine Facharbeit einen Versuch einbauen. Auf die Positionsbestimmung kam ich, da sie viele interessante Faktoren in sich vereint. In der Physik beschäftigt man sich mit den grundlegenden Fragen. Sowohl die Zeit als auch die Strecke gehören zu den SI-Basiseinheiten und haben somit eine besondere Bedeutung in der Physik. Die Bestimmung einer Position durch mehrere Abstandsmessungen ist physikalisch interessant, technisch anspruchsvoll und wirtschaftlich bedeutsam.

Schon seit Jahrhunderten betreiben die Menschen Positionsbestimmung. 1714 entwickelte der Uhrmacher John Harrison das Chronometer im Rahmen eines von der britischen Regierung ausgeschriebenen Preises zur exakten Bestimmung der geographischen Länge auf See. Damit wurde die erste präzise Uhr gebaut, welche erst am Ende des 2. Weltkriegs durch die Quarzuhr ersetzt wurde. 1730 entwickelten John Hadley und Thomas Godfrey unabhängig voneinander den Sextanten.¹ Durch die genaue Winkelmessung in der Astronavigation und der darauf basierenden genauen Positionsbestimmung hat der Sextant kurz nach seiner Erfindung bis zur Einführung der Satellitennavigation alle vorherigen Methoden ersetzt. Erst das Navigational Satellite Timing and Ranging Global Positioning System (NAVSTAR GPS), seit 1970 entwickelt und ab Mitte der 90er Jahre² funktionsfähig, löste den Sextanten ab. Somit wurden die Sterne und die Sonne als Bezugspunkte durch Satelliten ersetzt. Trotzdem muss der Sextant auch heute noch auf jedem Schiff in der Berufsschiffahrt als Ersatz für das GPS mitgeführt werden.

GPS ist den meisten Menschen ein Begriff, auch wenn sie nur selten wissen wie die Positionsbestimmung mit GPS funktioniert. Das Prinzip hinter dem System ist die Trilateration, welche ich in vereinfachter Form auch für mein Experiment verwende.

Die Positionsbestimmung hat heute eine sehr weit reichende wirtschaftliche Bedeutung.

Die Nutzung von personenbezogenen Standortinformationen ist dabei datenschutzrechtlich nicht eindeutig geklärt.

¹ „Entwicklung – Geschichte des Sextanten“, <http://www.sextant.at/entwicklung.htm>

² „NAVSTAR GPS“, <http://gpso.de/technik/navstar.html>

2. Positionsbestimmung

Für eine erfolgreiche Positionsbestimmung muss man nur 3 Schritte befolgen. Als erstes braucht man ein Bezugssystem für Raum und Zeit, damit man überhaupt eine Position angeben kann. Als nächstes muss man die Möglichkeiten, die einem das Raum und Zeit Bezugssystem zur Positionsbestimmung gibt, herausfinden. Im Bezugssystem ermöglicht das Messen von Strecken, Zeiten, Winkeln, oder Frequenzen eine Positionsbestimmung. Die Tabelle zeigt eine Übersicht.

Verfahren	Messgröße	Standlinie	Beispiel
Angulation	Winkel	Gerade	Terrestrische Navigation
Hyperbelverfahren	Laufzeitunterschied	Hyperbel	LORAN-C
Triangulation	Entfernung	Kreis	GPS
Cell - ID	Zelle	Zellform	Mobilfunk

Tabelle 1: Vorstellung von Verfahren zur Positionsbestimmung

2.1. Angulation

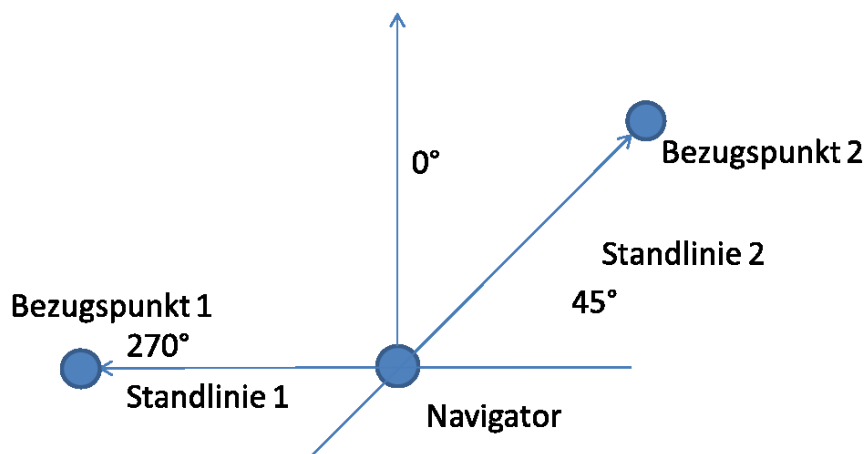


Abbildung 1: Angulation

Bei der Angulation oder Winkelpeilung werden von einem Beobachter, auch Navigator genannt, ein, zwei oder mehr Bezugspunkte angepeilt und die Winkel in Bezug auf ein Koordinatensystem gemessen. Dabei ergeben sich Standlinien, auf deren Schnittpunkt man sich befindet. Wenn nun die Positionen der Bezugspunkte bekannt sind, kann der Navigator seine Position bestimmen. Um die Genauigkeit zu verbessern, kann man mehrere Bezugspunkte anpeilen, dabei entsteht dann ein Vieleck. Der Schwerpunkt des Vielecks ist dann die Position.

2.2. Hyperbelnavigation

Die Hyperbelnavigation benutzt mindestens 3 Sendestationen, deren Position bekannt ist und die gleichzeitig ein Signal unterschiedlicher Frequenz aussenden. Die Signale treffen beim Beobachter zeitlich versetzt ein. Um die verschiedenen Signale empfangen zu können braucht der Beobachter mehrere Empfänger. Aus der Signallaufzeitdifferenzmessung ermittelt der Beobachter die relative Position zu den Sendestationen. Das System wird Hyperbelnavigation genannt, da bei 2 Sendern eine hyperbelförmige Standlinie entsteht. Deshalb werden mindestens 3 Sender benötigt, damit man den Schnittpunkt der Hyperbeln bestimmen kann. Graphisch kann man das anhand einer Hyperbelkarte darstellen. In Abbildung 2 ist der Sender L ein Mastersender; A, B und C sind Slavesender. Für jeden Slavesender wird der Laufzeitunterschied zum Mastersender gemessen und auf dieser Grundlage eine Hyperbel aus einer vorberechneten Hyperbelkarte ausgewählt.

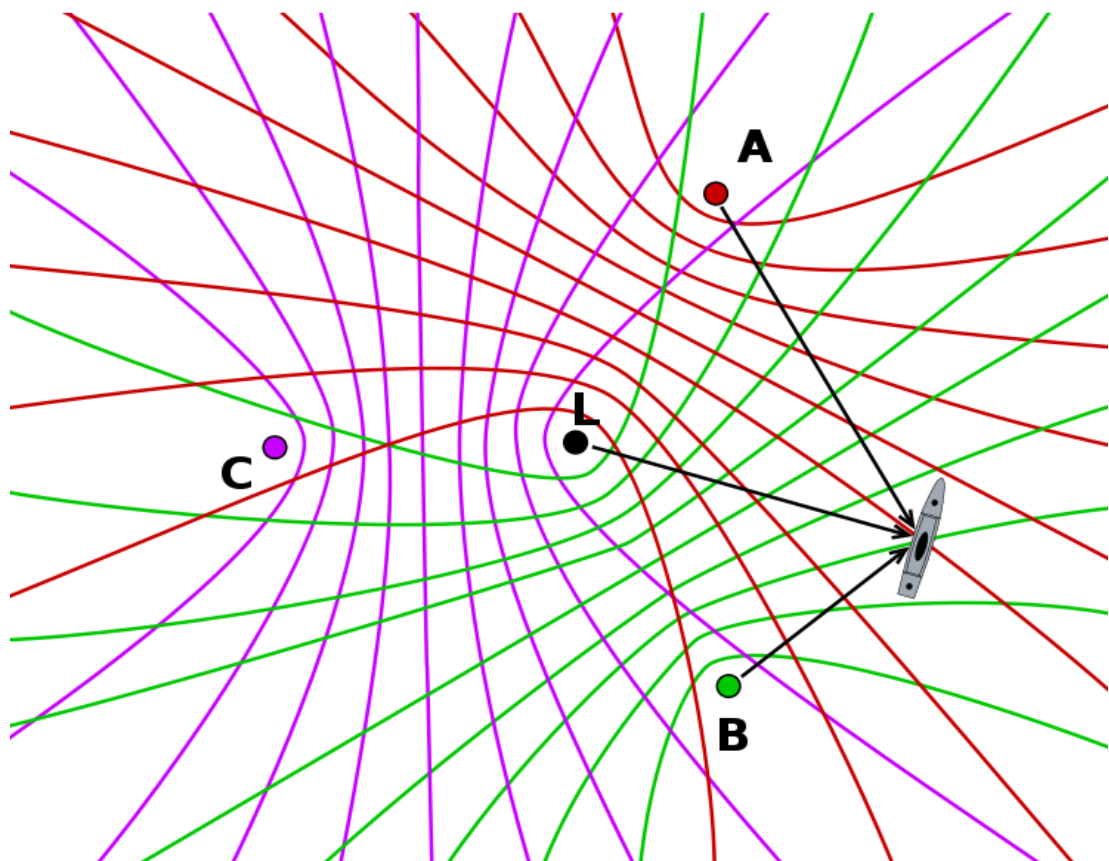


Abbildung 2: Hyperbelkarte

Der wichtigste Vorteil des Hyperbelverfahrens zur Positionsbestimmung ist, dass keine synchronisierte Zeit im Bezugssystem benötigt wird.

2.3. Trilateration

Die Trilateration beschreibt die Technik eine Position durch Entfernungsmessung vom Beobachter zu Referenzpunkten zu bestimmen. Die Trilateration wird vor allem bei Satellitennavigationssystemen eingesetzt. Das bekannteste ist das US - amerikanische GPS. Galileo, das europäische System, ist noch nicht fertiggestellt.

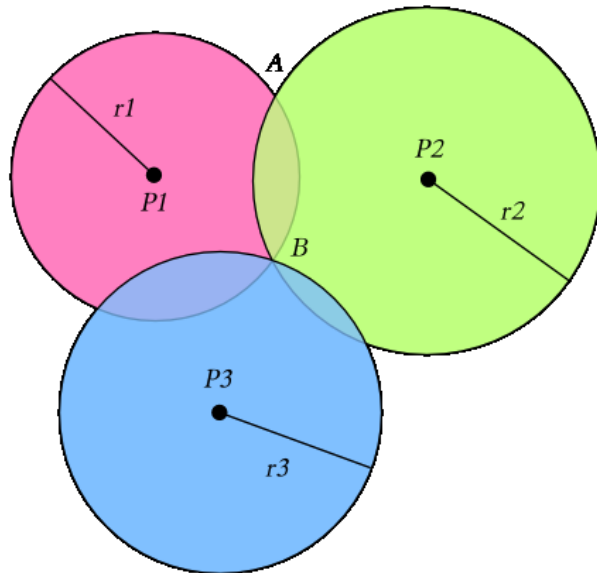


Abbildung 3: Trilateration

kann man seine Position bei einer Messung auf die Oberfläche einer Kugel begrenzen. Bei zwei Sendern befindet man sich auf einem Schnittkreis der zwei Kugeln, bei drei Sendern befindet man sich auf einem von zwei Punkten im 3-dimensionalen Raum. Von den zwei vorhandenen Punkten liegt einer auf der Erdoberfläche der andere im Weltraum. Je nachdem wo man seine Position nun bestimmen möchte, kann man die zweite Position verwerfen. Auf diesem Prinzip basiert auch ein GPS-Gerät. Beim GPS wird allerdings noch mindestens ein vierter Satellit benötigt, der die Zeit synchronisiert. Moderne GPS-Empfänger bestimmen die Entfernungen zu mehr als 10 Satelliten um die Genauigkeit zu erhöhen.

Auch in einem Mobilfunknetz besteht die Möglichkeit einer Laufzeitmessung zwischen Handy und Funkmast. Mit mindestens 3 Sendemasten ist eine Genauigkeit im Meterbereich möglich. Fehler entstehen vor allem in Städten bei Signalreflexionen an Hauswänden.

nische GPS. Galileo, das europäische System, ist noch nicht fertiggestellt.

Bei der Trilateration wird durch Laufzeitmessung eine Entfernung vom Satelliten zum Empfänger gemessen. Die erste Entfernungsmessung zu einem Satelliten heißt Pseudostrecke, da selbst kleinste Ungenauigkeiten bei der Uhr zu Fehlern führen und diese bei einer einfachen Messung nicht behoben werden können. Geometrisch

2.4. Cell-ID Verfahren

Jede Mobilfunkstation hat eine feste Position und deckt eine Funkzelle ab. Wenn sich ein Handy in eine dieser Zellen einloggt, dann weiß man ungefähr, wo man ist. Da man sich aber meistens in mehreren überlappenden Zellen aufhält, kann man durch die Schnittmenge der Zellen in denen man sich befindet eine relativ genaue Position bestimmen. Durch die Berücksichtigung der Empfangsstärke kann man die Positionsangaben präzisieren. Diese Technik ist nur den Mobilfunkbetreibern zugänglich, die wissen, wie sich die Empfangsstärke in Abhängigkeit von der Position verändert. Wenn man seine Position nur anhand der zugeordneten Funkzellen ermittelt, liegt die Genauigkeit zwischen 100m und 30 km, je nachdem wie groß die Funkzelle ist.³

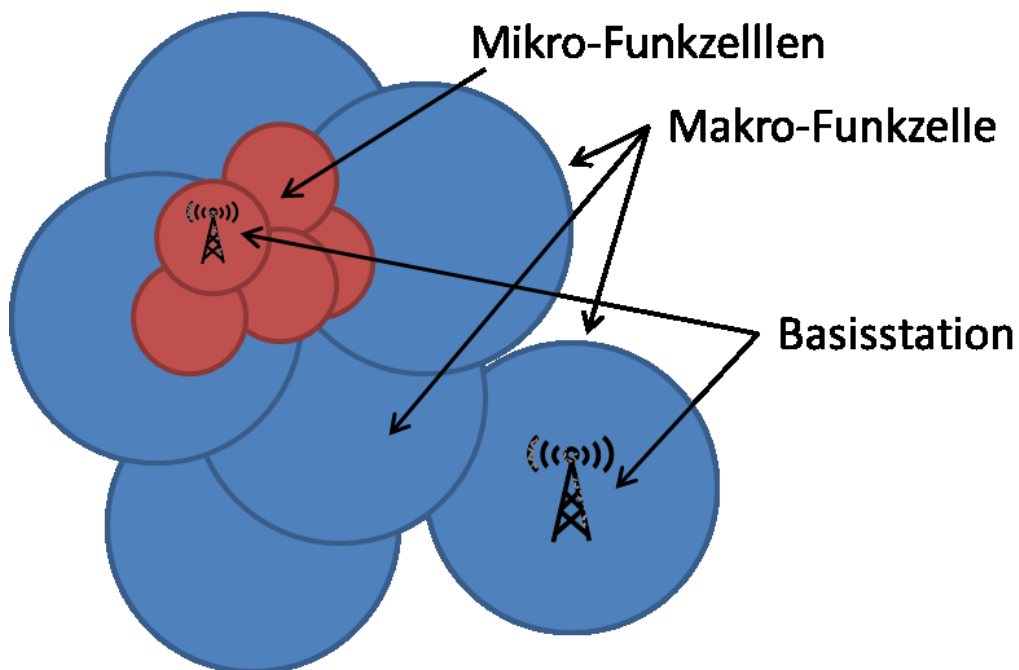


Abbildung 4: Mikro- und Makro Funkzellen

2.5. Hybridnavigation

Bei der Hybridnavigation oder auch integrierten Navigation werden mehrere Navigationstechniken zusammengefasst und entsprechend ihrer Qualität gewichtet, um eine möglichst genaue Positionsbestimmung zu erreichen. Im Mobilfunknetz kann die Lokalisierung über das Cell-ID Verfahren durch Trilateration ergänzt werden.

³ „Cell-ID-Verfahren“, <http://www.it-administrator.de/lexikon/cell-id-verfahren.html>

3. Entfernungsmessung

Entfernungen können je nach Größenordnung auf unterschiedliche Art gemessen oder indirekt bestimmt werden. Eine indirekte Möglichkeit ist die Interpretation der Eigenschaften eines Signals, das zwischen einem Sender und Empfänger ausgetauscht wird. Sender und Empfänger können an beiden Endpunkten der zu messenden Strecke positioniert sein (direkte Messung). Alternativ können Sender und Empfänger zusammen positioniert werden. Dann wird das vom beobachteten Objekt reflektierte Signal gemessen. Messbar sind die Laufzeit, die Frequenz, die Phase und die Intensität des Signals. Besonders wichtig für diese Arbeit ist die Laufzeitmessung. Im Folgenden wird diese und als weiteres Beispiel die Bestimmungsart durch Frequenzmessung erläutert.

3.1. Messung der Signallaufzeit

Jeder Mensch hat schon selbst eine Signallaufzeitmessung durchgeführt und zwar wenn er die Entfernung eines Blitzes abschätzt. Einmal gibt's den Lichtblitz, sozusagen das Auslösesignal und ein paar Sekunden später trifft der Schall ein, da dieser deutlich langsamer ist. Als Faustregel gilt: bei drei Sekunden Zeitunterschied zwischen Blitz und Donner ist das Gewitter einen Kilometer entfernt.

Bei der Signallaufzeitmessung wird als charakteristisches Signal häufig ein Puls ausgestrahlt, entweder in Form von Schall oder als elektromagnetische Welle. Dieses Signal trifft direkt auf einen Empfänger oder es wird an einem Objekt reflektiert und trifft auf einen Empfänger, der neben dem Sender steht. Durch die Laufzeitmessung des Signals kann die Entfernung zwischen Sender und Empfänger oder Sender und reflektierendem Objekt bestimmt werden. Für eine direkte Laufzeitmessung muss die Zeit zwischen Sender und Empfänger synchronisiert werden.

Mit gepulstem Radar werden so unterschiedliche Entfernungen wie die Flughöhen von Flugzeugen im Landeanflug und die Abstände der inneren Planeten unseres Sonnensystems von der Erde bestimmt.

Das spezifische Problem beim gepulsten Ultraschall ist die Form des Pulses, da sich beim Ultraschall der Kristall für ein klares Signal einschwingen muss. Damit der Kristall seine spezifische Resonanzfrequenz erreicht, benötigt er eine bestimmte Anzahl von Schwingungen.

Für das Bauteil sind diese kurzen aber heftigen Belastungsspitzen auf lange Sicht ermüdend. Dies sorgt für eine hohe Verschleißrate der Ultraschallsensoren bei unsachgemäßer Verwendung.

Der Vorteil der Reflektionsmessung ist, dass die zeitliche Synchronisation von Sender und Empfänger kein Problem darstellt, da diese nebeneinander stehen oder sogar in einem Bauteil vereint sind. Beispiele für dieses Verfahren sind das Radar, sowie die Entfernungsmessung mit Ultraschallsensoren, welche im Versuch verwendet wird.

Bei Laufzeitmessungen ist die Genauigkeit der Messung abhängig von der Kenntnis der genauen Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals. Beim GPS wird diese durch Atmosphäre und Ionosphäre beeinflusst; beim Ultraschall durch die Lufttemperatur. GPS erreicht eine Genauigkeit von 10 Metern. Diese Genauigkeit kann bei Benutzung von Differential – GPS erheblich gesteigert werden. Beim kostenpflichtigen Hochpräzisen-Echtzeit-Positionierungs-Service (HEPS) wird eine Präzision von 1 cm erreicht.⁴ Durch Referenzmessungen für Orte bekannter Position können systematische Fehler erkannt und teilweise durch Korrekturverfahren reduziert werden. Auch im Versuch wird eine Referenzmessung zur Genauigkeitsverbesserung verwendet.

Die wahrscheinlich teuerste Laufzeitmessung ist die Bestimmung der Entfernung zwischen Erde und Mond. Dafür wurde auf dem Mond ein Retroreflektor angebracht. Dieser wird vom McDonald Observatory mit einem Laser gepulst angestrahlt.



Abbildung 5: Messung am McDonald Observatory

⁴ „HEPS“ http://www.hvbg.hessen.de/irj/HVBG_Internet?cid=876b966304609ee3e3cddb70a3c6a403

3.2. Messung der Frequenzverschiebung

Eine empirisch festgestellte oder künstlich erzeugte Beziehung zwischen der Frequenz des Signals und der Entfernung kann als Basis für die Entfernungsmessung verwendet werden.

Ein Sender strahlt eine elektromagnetische Welle mit einer linear ansteigenden Frequenz aus. Ein Objekt innerhalb der Reichweite des Senders reflektiert dieses Signal. Ein Empfänger, der sich beim Sender befindet, empfängt die reflektierten Signale. Die Frequenz des empfangenen Signals wird mit der aktuell ausgestrahlten Frequenz des Senders verglichen. Daraus wird die Signallaufzeit errechnet, da bekannt ist mit welcher Rate die Frequenz variiert wird. Mithilfe dieser aus der gemessenen Frequenzverschiebung berechneten Laufzeit wird die Entfernung berechnet.

Entwickelt wurde dieses Verfahren von der Firma Navico für Radarsysteme. Die Firma hat die erste Halbleiter Breitband – Radartechnologie entwickelt, die das FMCW Verfahren (Frequency Modulated Continuous Wave) nutzt. Die Radargeräte, die auf dieser Technologie basieren, nennt man Broadband Radar.⁵

Ein Vorteil des Verfahrens ist, dass ständig ein Signal mit sehr niedriger Energie abgestrahlt wird und nicht immer wieder ein hoher Puls. Dadurch kann man auch in der Nähe einer solchen Radarstation arbeiten, da die abgestrahlte Energiemenge viel niedriger ist als beim herkömmlichen Radar und damit keine Gesundheitsschädigung zu befürchten ist. Aufgrund der niedrigeren ausgestrahlten Energiemenge entstehen auch deutlich weniger Reflexionen, wodurch die Zielerkennung wesentlich verbessert wird. In der linken Abbildung kann man das erkennen, hier ist eine deutlich bessere Auflösung im Vergleich zum rechten Bild vorhanden.

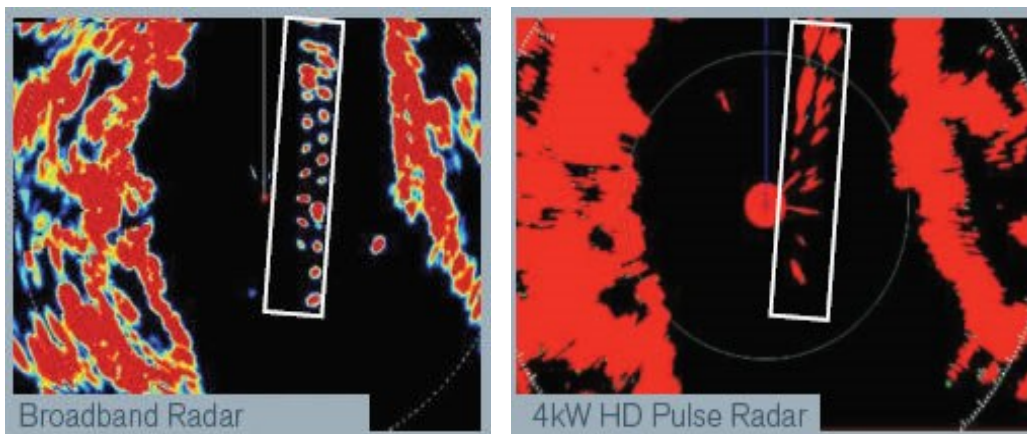


Abbildung 6: Vergleich Broadband Radar (links) und herkömmliches Radar (rechts)

⁵ „Eine wirklich andere Technologie“, <http://www.simrad-yachting.com/de/Produkte/Freizeit/Simrad-Broadband-Radar/Die-Technologie/>

4. Positionsbestimmung durch Laufzeitmessung mit Ultraschall

Bei elektromagnetischen Wellen ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit. Diese beträgt im Vakuum 299 792 458 m/s.

Für eine Positionsbestimmung, die in einem Entfernungsbereich zwischen 1cm und 10m durchgeführt werden soll, ist eine extrem hohe zeitliche Auflösung erforderlich, da Licht einen Millimeter in ungefähr 3 Pikosekunden zurücklegt. Schall hat bei Zimmertemperatur hingegen eine ungefähre Geschwindigkeit von 340m/s und legt somit eine Strecke von einem Millimeter in ungefähr 3 Mikrosekunden zurück. Damit ist Licht grob gesehen eine Million mal schneller als Schall. Mit Schall kann man auf kurzen Strecken also deutlich leichter vernünftige Ergebnisse bekommen, da die Laufzeitmessung mit erschwinglichen Mitteln durchgeführt werden kann.

4.1. Physikalische Eigenschaften des Piezo-Kristalls ⁶

Der Piezoeffekt wurde 1880 von den Brüdern Jacques und Pierre Curie entdeckt. Dieser Effekt tritt nur bei Kristallen auf, die mindestens eine polare Achse besitzen und somit kein Symmetriezentrum haben. Industriell hergestellte Piezoelemente sind meistens Keramiken, welche aus synthetischen, anorganischen, ferroelektrischen und polykristallinen Keramikwerkstoffen gefertigt werden.

Eine Achse im Kristall wird polare Achse genannt, wenn das vordere und hintere Teil der Achse nicht gleich ist. Das heißt bei einer 180° Drehung des Kristalls an einer auf der polaren Achse senkrechten Symmetrieachse würde der gedrehte Kristall nicht deckungsgleich zur Ausgangsstruktur liegen.

Die Abbildung 7 zeigt eine vereinfachte Struktur des Quarzkristalls. Anhand der Quarzkristallstruktur können die vier physikalischen Vorgänge, die beim Piezoeffekt auftreten können, sehr anschaulich beschrieben werden.

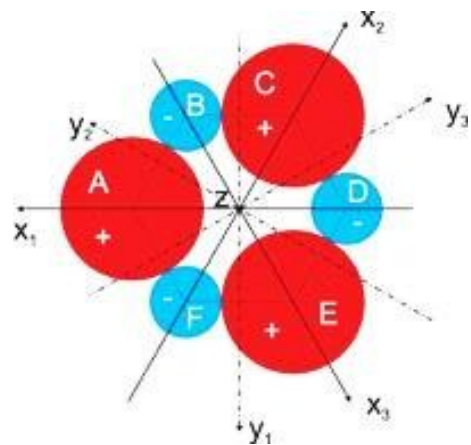


Abbildung 7: Vereinfachte Struktur des Quarzes

⁶ „Der Piezoeffekt am Beispiel des Quarzkristalls“, <http://www.piezoeffekt.de/1theory.php>

Es wird zwischen dem direkten und reziproken, sowie dem longitudinalen und dem transversalen Effekt unterschieden. Beim direkten Piezoeffekt wird durch eine Kraft auf den Kristall und der daraus resultierenden Verformung ein Dipol erzeugt, wodurch eine Spannung entsteht. Reziprok nennt man den Effekt, wenn durch Anlegen einer Spannung eine Verformung des Kristalls bewirkt wird.

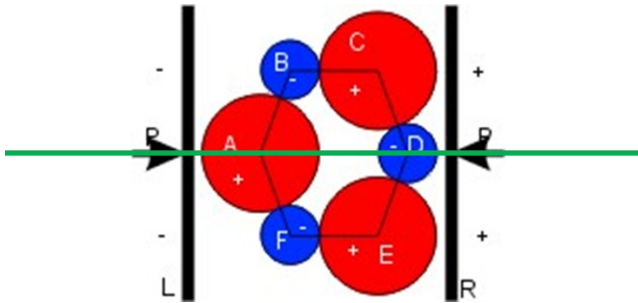


Abbildung 8: Verhalten der Strukturzelle bei Druck, parallel zu einer polaren Achse

Die zweite Bezeichnung – longitudinal oder transversal – beschreibt die Kraft-Ladungsbeziehung im Kristall. Beim longitudinalen Effekt ist die Kraftachse parallel zur Spannungsachse (polare Achse). In der Abbildung 8 stellt die grüne Achse die Spannungsachse und die Kraftachse gleichzeitig dar. Die Achse wird Spannungsachse genannt, da die Spannung in der Richtung dieser Achse durch den Dipol induziert wird. Das heißt, dass an den Flächen des Kristalls auf die die Kraft wirkt, eine Spannung durch Bildung eines Dipols induziert wird. Wenn diese Flächen nun miteinander verbunden kommt es bei Druck zu einem sehr kleinen Stromfluss zwischen diesen Flächen.

Beim transversalen Effekt stehen polare Achse und Kraftachse senkrecht aufeinander. Somit ist die Kraftachse parallel zur neutralen Achse im Kristall. Als neutral wird die Achse bezeichnet, da in dieser Richtung kein Dipol erzeugt wird.

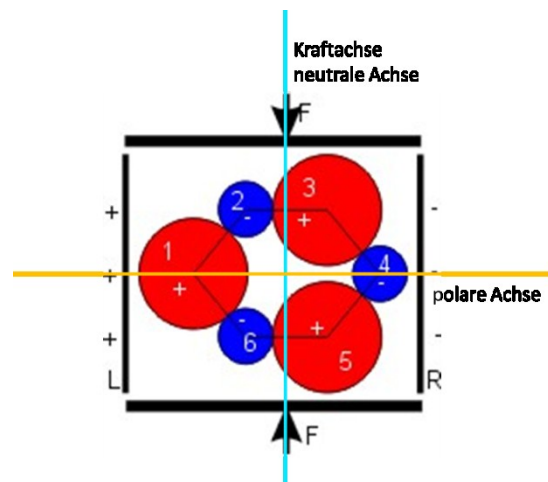


Abbildung 9: Verhalten der Strukturzelle bei Druck, parallel zu einer neutralen Achse

4.2. Erzeugung von Ultraschall mit Piezokristallen

Für die Erzeugung von Ultraschall durch den Sender wird der reziproke Piezoeffekt benutzt: der Piezokristall führt bei Anlegen einer elektrischen Spannung eine mechanische Bewegung aus. Durch Anlegen einer Wechselspannung mit der Resonanzfrequenz der mechanischen Eigenschwingung des Kristalls, können sehr frequenzstabile Schwingungen erzeugt werden.⁷

Wenn nun eine Rechteckspannung mit 40 kHz angelegt wird, schwingt der Piezokristall und erzeugt in Verbindung mit einer Membran Ultraschall mit 40 kHz.

Um ein möglichst klares Signal zu erhalten, verwendet man industriell produzierte Bauteile, da nur hier die hohe Qualität des Kristalls erzeugt werden kann. In meinem Experiment werden Bauteile mit einer Resonanzfrequenz von 40 kHz verwendet, da bei dieser klar definierten Resonanzfrequenz kein Problem mit Hintergrundgeräuschen entsteht. Dies zeigen die Maxima der Graphen bei 40 kHz in Abbildung 10. Das Diagramm stellt die Sensitivität eines Ultraschallempfängers und eines Senders der Firma Murata in Abhängigkeit von der Frequenz dar.

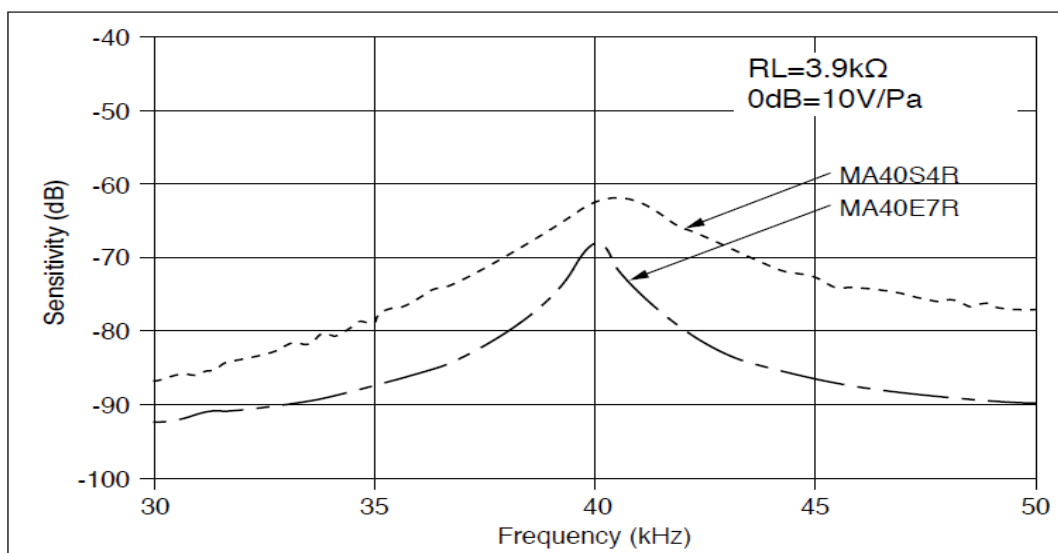


Abbildung 10: Frequenzsensitivität der Ultraschall-Sender und -Empfänger

⁷ „Piezoeffekt“, <http://www.techniklexikon.net/d/piezoeffekt/piezoeffekt.htm>

4.3. Schallausbreitung in Luft

Die Schallausbreitung in Luft spielt eine weitere wesentliche Rolle für das Experiment, da gerade bei größeren Abständen die Dämpfung, sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall deutlichen Einfluss auf die Messergebnisse haben. Die Frequenz hat in Bezug auf die Geschwindigkeit keinen Einfluss wie Gassendi⁸ schon im 17. Jahrhundert bewiesen hat. Allerdings darf die Frequenz nicht ganz vernachlässigt werden, da unterschiedliche Frequenzen die Dämpfung des Schalls in einer bestimmten Luftfeuchtigkeit verändern. Vorrang für mein Experiment hat die Geschwindigkeit für die Luft, da bei einer falschen Geschwindigkeitsannahme für die Luft mein Experiment nur eine ungenaue Positionsbestimmung ermöglicht. Im Folgenden wird die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur gezeigt.

Variablen, Größen und Konstanten:

κ – Adiabatenexponent; ρ – Dichte; p – Gasdruck

R – universelle Gaskonstante; M – Molekulargewicht

T – absolute Temperatur

Aus der Gleichung der Schallgeschwindigkeit in idealen Gasen:

$$c_g = \sqrt{\frac{\kappa * p}{\rho}}$$

und der Gleichung für ideale Gase:

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R * T}{M}$$

folgt:

$$c_g = \sqrt{\frac{\kappa * R}{M} * T}$$

⁸„Environmental Effects on the Speed of Sound”, Audio Eng. Soc., Vol.36, No.4, 1988 April, Seite 2

Der Adiabatenexponent ist das Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten bei konstantem Druck c_p und konstantem Volumen c_v .

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Für Luft bei 0°C ist der Adiabatenexponent 1,403. Bei 100°C ist er 1,401. Für die Temperaturbereiche in denen ich messe wird $\kappa = 1,402$ angenommen. Die universelle Gaskonstante ist $R = 8,3145 * 10^3 * \text{J} * \text{K}^{-1} * \text{kmol}^{-1}$ und das Molekulargewicht für Luft beträgt $28,96 * \text{kg} * \text{kmol}^{-1}$.

Damit folgt für die Geschwindigkeit für Luft:

$$c_{\text{Luft}} = \sqrt{1,402 * \frac{8,3145 * 10^3 \text{ JK}^{-1} \text{ kmol}^{-1}}{28,96 \text{ kg} * \text{ kmol}^{-1}} * T} = 20,063 \frac{\text{m}}{\text{s}} * \sqrt{\text{K}^{-1} * T}$$

Gleichung 1: Schallgeschwindigkeit in Luft

Für 0° C (273 K) errechnet sich eine Schallgeschwindigkeit von ungefähr 332 m/s. Für eine Zimmertemperatur von 20° C (293 K) errechnet sich eine Geschwindigkeit für die Schallausbreitung in Luft von 343 m/s.

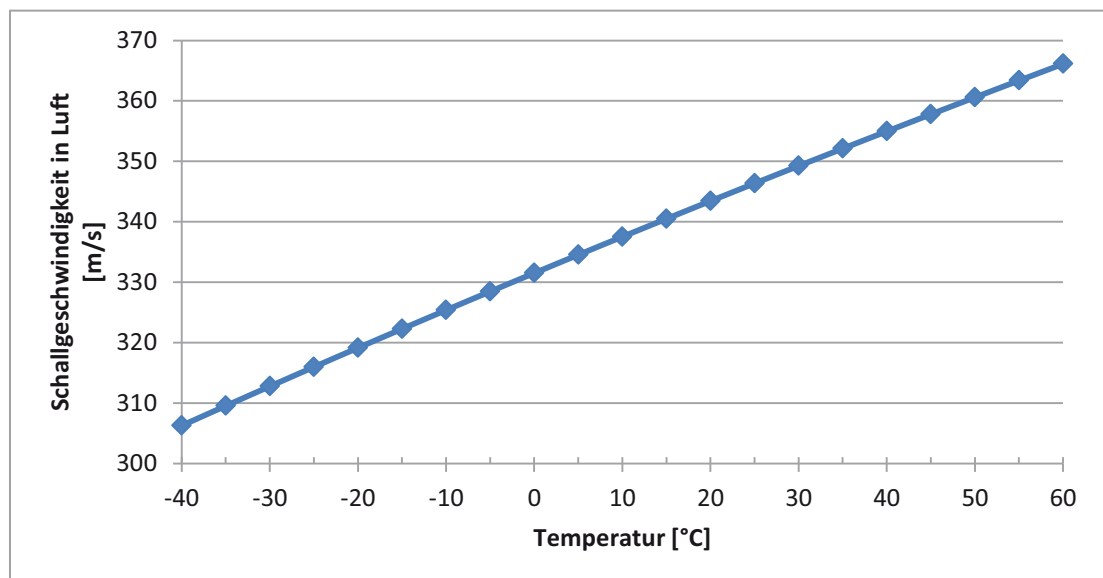


Abbildung 11: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Auf den ersten Blick scheint die Schallgeschwindigkeit linear abhängig von der Temperatur zu sein. Dies täuscht, da die Temperatur in Gleichung 1 unter der Wurzel steht.

In der Abbildung 12 ist die Schallabsorption der Luft in Abhängigkeit von Schallfrequenz und relativer Luftfeuchtigkeit zu erkennen. Bei hohen Frequenzen dämpft Luft sehr stark. Im Bereich der Luftfeuchtigkeit von 0% bis 30% existiert zusätzlich ein sehr rascher Anstieg in der Absorption. Die Dämpfung der Luft wirkt also wie ein Filter auf das Signal. Die steilen Flanken des Signals werden abgeflacht, die Hüllkurve wird abgerundet. Bei 40 kHz ist eine noch deutlich höhere Absorption zu erwarten. Die „richtige“ Detektion des reflektierten Pulses erfordert eine gute Abstimmung der Filter, Verstärker und des Komparators im Ultraschallmodul.

Der Luftdruck kann vernachlässigt werden, da nach Gleichung 1 der Druck die Geschwindigkeit der Schallausbreitung in Luft nicht beeinflusst.

Um die Interpretation der Messergebnisse der Laufzeiten zu verbessern muss die Temperatur berücksichtigt werden, was durch einen Temperatursensor zu bewerkstelligen ist. Dann kann man für jede Laufzeitmessung, die durchgeführt wird, die korrekte Schallgeschwindigkeit ermitteln und daraus dann die korrekte Entfernung.

Alternativ kann eine Referenzmessung durchgeführt werden, deren Ergebnis die notwendigen Korrekturinformationen liefert.

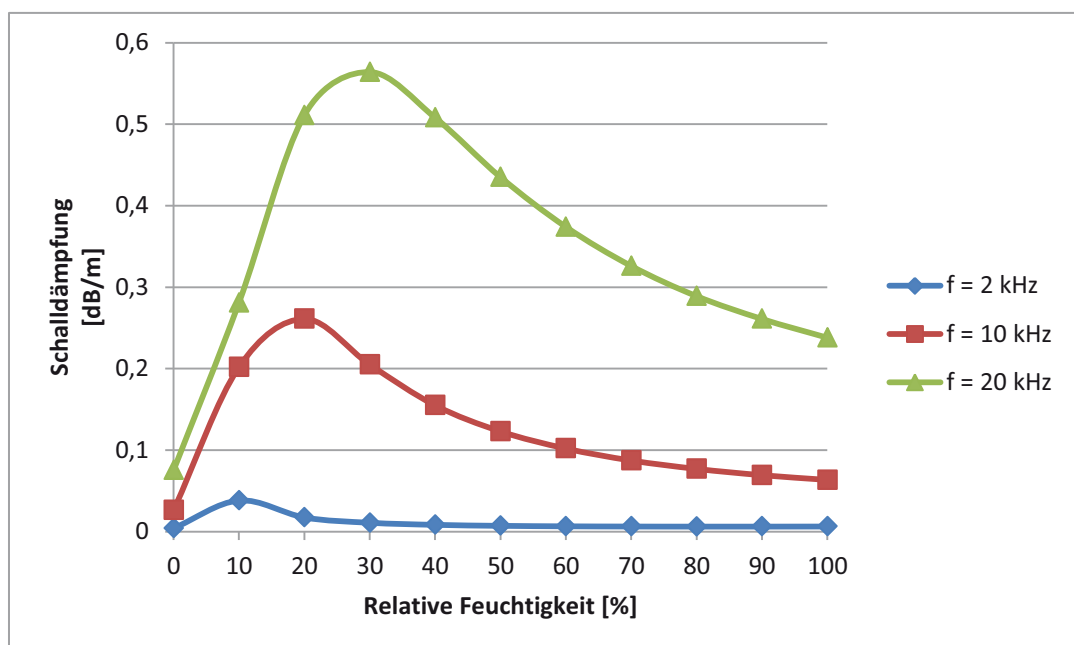


Abbildung 12: Schallabsorption in Luft bei 20°C

5. Versuch

5.1. Versuchsaufbau

Der Versuch besteht aus zwei Ultraschallsensoren, sowie einem Mikrokontroller. Der Mikrokontroller sendet nacheinander Auslösesignale an die Ultraschallsensoren. Daraufhin senden diese Sensoren 8 Ultraschallpulse mit einer Frequenz von 40 kHz aus. Es werden 8 Ultraschallpulse gesendet, damit der Resonanzkörper des Ultraschallmoduls das Schwingen anfangen kann, was vor allem beim Empfang wichtig ist. Zusätzlich wird zeitgleich mit den Ultraschallpulsen eine Spannung über einen Echoport ausgegeben. Mithilfe der Timer 1 und 3 des Mikrokontrollers wird die Zeit bis zum Eintreffen des Echos gemessen. Die Dauer des Spannungspulses ist linear abhängig von der Entfernung des Objektes. Über $s = v * t$ wird die zurückgelegte Strecke des Schalls berechnet. Die Laufzeitmessung misst die Laufzeit für Hin- und Rückweg. Alle Koordinaten und Entfernungen sind hier in Zentimetern angegeben. Somit folgt für die Entfernung Ultraschallsensor i – Objekt:

$$s_i = \frac{1}{2} v * t_i$$

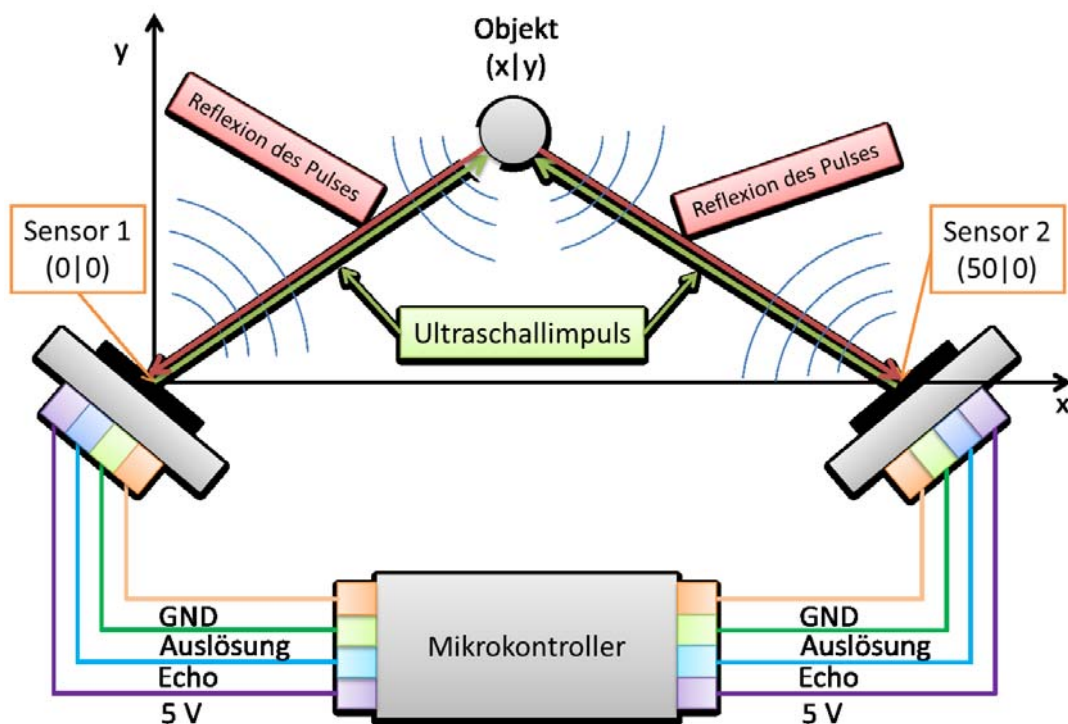


Abbildung 13: Versuchsaufbau des Experiments

Nach Messung der Entfernung von 2 Punkten aus, wird mithilfe der Kreisgleichung $s^2 = (x - x_m)^2 + (y - y_m)^2$ die Position des Objektes im kartesischen Koordinatensystem bestimmt. x_m und y_m stehen für die Koordinaten des Mittelpunkts des Kreises. In diesem Versuch sind die Sensoren die Mittelpunkte der Kreise und somit legen die Koordinaten der Sensoren die Koordinaten x_m und y_m fest.

Die Entfernung des Objekts zu den Sensoren 1 und 2 wird mit s_1 bzw. s_2 angegeben. Damit gilt für den ersten Sensor der die Koordinaten (0|0) hat:

$$\text{I: } s_1^2 = x^2 + y^2$$

Und für den zweiten Sensor mit den allgemeinen Koordinaten ($x_m|0$):

$$\text{II: } s_2^2 = (x - x_m)^2 + y^2$$

Dies löst man nach x auf, indem man y gleichsetzt.

$$s_1^2 - x^2 = s_2^2 - (x - x_m)^2$$

$$s_1^2 - x^2 = s_2^2 - x^2 + 2x * x_m - x_m^2$$

$$\text{III: } x = \frac{s_1^2 - s_2^2 + x_m^2}{2x_m}$$

Gleichung I nach y auflösen und Gleichung III einsetzen

$$y = \sqrt{s_1^2 - x^2} \quad ; \quad y = \pm \sqrt{s_1^2 - \left(\frac{s_1^2 - s_2^2 + x_m^2}{2x_m} \right)^2}$$

Bei dem Versuch wird das Objekt immer im positiven y-Bereich positioniert, daher folgt für die allgemeine Koordinate des Objekts.

$$\left(\frac{s_1^2 - s_2^2 + x_m^2}{2x_m} \mid \sqrt{s_1^2 - \left(\frac{s_1^2 - s_2^2 + x_m^2}{2x_m} \right)^2} \right)$$

$$\text{Für } x_m = 50 \Rightarrow \left(\frac{s_1^2 - s_2^2 + 2500}{100} \mid \sqrt{s_1^2 - \left(\frac{s_1^2 - s_2^2 + 2500}{100} \right)^2} \right)$$

Diese Gleichung wird auch im Programm zur Bestimmung der Position verwendet.

5.2. Ultraschallmodul

Eingesetzt werden Ultraschallmodule des Typs SRF05, die von der Devantech Ltd. hergestellt und vertrieben werden. Die Module kosten pro Stück 25€. Laut Datenblatt ist die Betriebsspannung 5V, die Stromaufnahme 4 mA, die maximale Reichweite vier Meter, die minimale ein Zentimeter. Zur Messung der Entfernung wird Ultraschall mit einer Frequenz von 40 kHz eingesetzt.

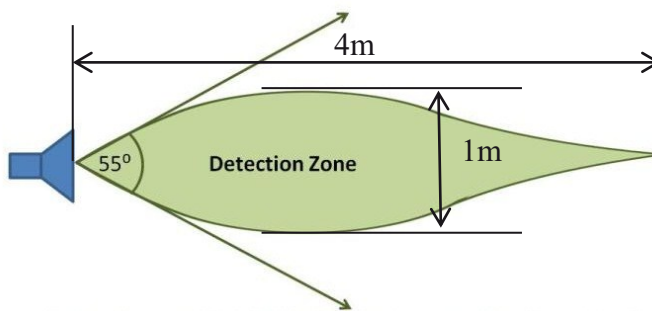


Abbildung 14: Messbereich des Ultraschallsensors

Die Abbildung 14 zeigt den Messbereich des Sensors. Dieser ist 4m lang und maximal

1m breit. Nach vorne ist in einem Bereich von $\pm 27,5^\circ$, also 55° eine Messung möglich, da bei einem größeren Winkel die Signalleistung zu schwach wird.⁹ Schon bei $27,5^\circ$ in eine Richtung ist die Signalleistung um 6 Dezibel reduziert. Da die Dezibel Skala eine logarithmische Skala ist, ist die Signalleistung nur noch ein $\frac{1}{4}$ -mal¹⁰ so stark und damit für den Empfänger nicht mehr messbar.

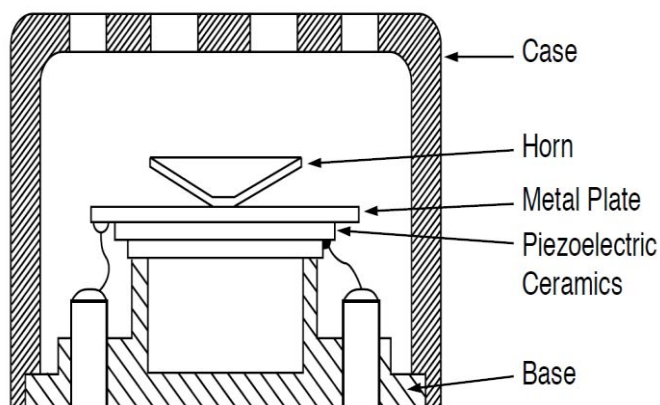


Abbildung 15: Offener Ultraschallsensor

Sender und Empfänger des Ultraschallmoduls sind „offene Ultraschallsensoren“: sie haben im Gegensatz zu geschlossenen Ultraschallsensoren kein geschlossenes Gehäuse, sondern ein offenes. Abbildung 15 zeigt den am Sockel angebrachten mehrteiligen Piezo-

Summer. Dieser besteht aus einem Resonator (Horn), einer Metallschicht und einer piezoelektrischen Keramik. Der Resonanzkörper (Resonator) ist kegelförmig, um die Ultraschallwellen möglichst effizient abzustrahlen.

⁹„Robot Obstacle Detection and Avoidance with the Devantech SRF05 Ultrasonic Range Finder“, <http://picaxe.hobbizine.com/srf05.html>

¹⁰„Was Sie schon immer zum Rechnen mit dB wissen wollten ...“, http://www2.rohde-schwarz.com/file_6407/1MA98_4D.pdf

Abbildung 16 stellt den zeitlichen Verlauf der Messung dar. Es wird ein Impuls vom Mikrokontroller gesendet, dieser triggert das Modul, welches acht Ultraschallpulse ausgibt. Zeitgleich wird der Echopuls mit steigender Flanke begonnen. Beim Eintreffen des Echos wird der Puls mit fallender Flanke beendet. Die Impulslänge wird mit dem Mikrokontroller gemessen. Die Entfernung zu dem gesuchten Objekt wird berechnet.

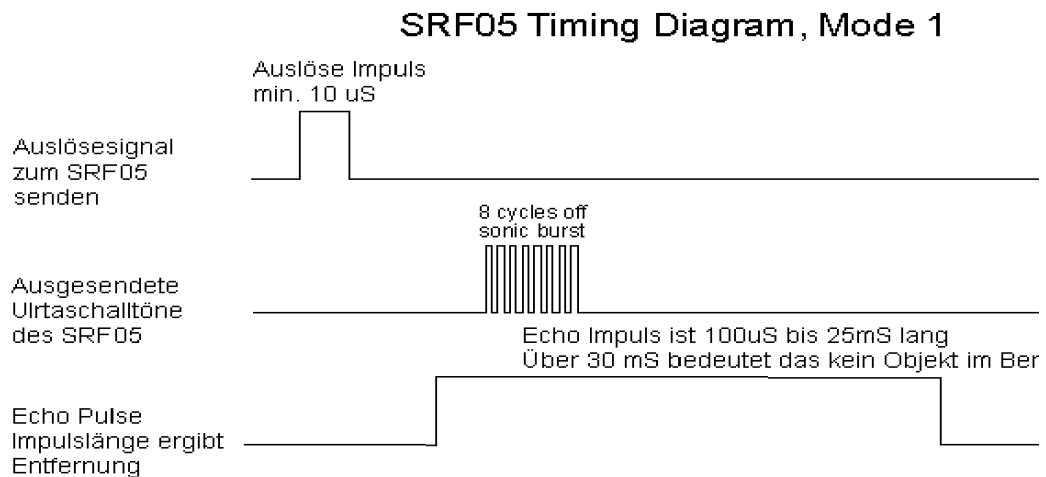


Abbildung 16: Ablauf der Entfernungsmessung

Abbildung 17 zeigt das verwendete Modul von hinten und von vorne, sowie die im Experiment verwendeten Ports. Auf ein Schaltbild wurde seitens des Herstellers leider verzichtet.

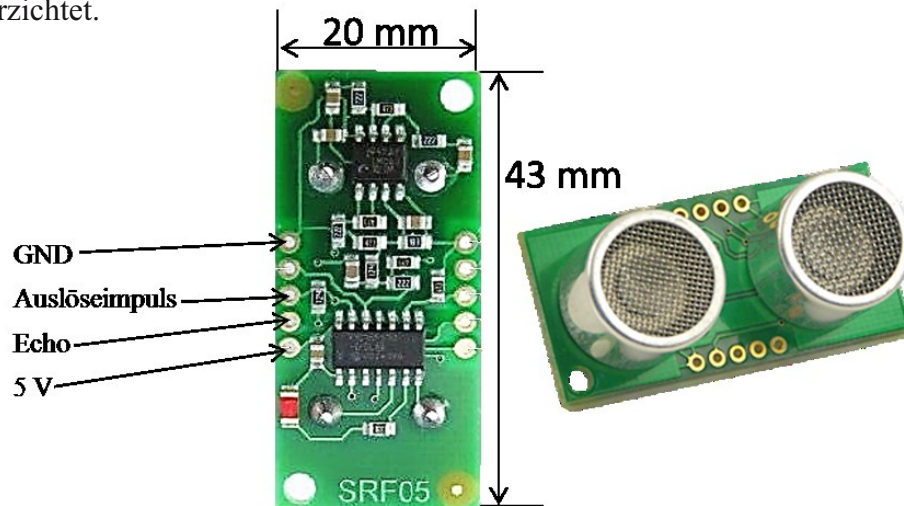


Abbildung 17: Rückseite und Vorderseite des Ultraschallmoduls

Die wesentlichen Komponenten sind Ultraschallsender und -empfänger, ein 8-Bit Mikrokontroller (PIC 16F 630), ein integrierter dualer Operationsverstärker (National LMC 6032 IM), sowie Widerstände und Kondensatoren. Das Modul ist komplett in SMD (Surface Mounted Device) – Technik aufgebaut.

5.3. Mikrokontroller

Ein Mikrokontroller integriert einen Mikroprozessor und weitere Bauteile: Zeitgeber, Zähler, Speicher, digitale und analoge Ein- und Ausgänge und serielle Schnittstellen, z.B. I²C. Allerdings ist es selbst heutzutage noch keine Selbstverständlichkeit einen Quarz als Taktgeber in den Controller zu integrieren. Des Weiteren befinden sich teilweise noch Steuerbausteine für die USB-Ansteuerung auf dem Mikrokontroller. Damit braucht man für Mikrokontroller Anwendungen kaum weitere Bauteile.

Mikrokontroller werden fast immer durch die Bit-Zahl des internen Datenbusses unterschieden. Es gibt 4/8/16/24/32/64 Bit Mikrokontroller. Die natürlichen Zahlen, die ein 8 Bit (=1 Byte) Mikrokontroller direkt verarbeiten kann, gehen von 0-255. Wenn man größere Zahlen verarbeiten will, ist dies nur mit einem größeren Zeitaufwand möglich, da mehrere Befehle verarbeitet werden müssen.

Die Taktfrequenz kann extern durch Taktgeber, Oszillatoren, oder Quarze zugeführt werden. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit den Mikrokontroller mit einem internen Taktgeber, dem RC-Oszillator, zu versorgen. Die Taktfrequenz reicht von 1MHz bei einfachen und bis über 100MHz bei leistungsfähigen Mikrokontrollern.

Ohne Mikrokontroller wäre die Welt von heute nicht mehr vorstellbar, da sie in vielen technischen Bereichen eingesetzt werden. Mikrokontroller werden für Ladegeräte, Motorsteuerungen, Roboter, Messwerterfassungssysteme, Temperatursteuerungsanlagen, MP3- und CD- Player und viele weitere Aufgaben verwendet.

Der verwendete Mikrokontroller ist ein Atmel Mega128, welcher auf dem C-Control-Board von Conrad ElectronicsTM sitzt. Der Mikrokontroller läuft mit einer Frequenz von 15 MHz. Für die Positionsbestimmung durch Laufzeitmessung ist er schnell genug, da die kleinste Zeiteinheit, die er messen kann, bei 68 Nanosekunden liegt.

Der Mikrokontroller besitzt insgesamt vier Zeitgeber. Zwei Timer sind 16-Bit Timer die anderen beiden sind 8-Bit Timer. Für die Laufzeitmessung werden die 16-Bit Timer benutzt, da diese eine natürliche Zahl von 0 bis 65535 wiedergeben können. Ohne Vorteiler kann eine genaue Zeitmessung im Bereich von 68ns bis hin zu 4ms durchgeführt werden. Dadurch ist eine Auflösung von 0,02 mm bis in eine maximale Objektentfernung von 75 cm möglich. In dieser Zeitspanne tritt kein Interruptüberlauf auf. Dies erleichtert die Programmierung.

Aus praktischen Gründen wird die Entfernung auf einen Millimeter gerundet, da systembedingte Fehler bei der Messung auftreten können. Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur wird in einer eigenen Messreihe untersucht.

Die Dokumentation des C-Control Boards wird auf einer CD beigelegt. Abbildung 18 zeigt den Mikrokontroller und das Experimentierboard, das ich für mein Projekt benutze.



Abbildung 18: Mikrokontroller und C-Control Board

5.4. Messungen

Die Programme, die ich für die Messungen selbst entwickelt habe, sind im Anhang dokumentiert. Um die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der Temperatur zu zeigen, wurden Messungen in der Sauna bei den Temperaturen 20°C, 40°C und 60°C durchgeführt. Die Strecke Objekt – Ultraschallmodul betrug 50 cm, das heißt die insgesamt vom Schall zurückgelegte Strecke betrug 1m. Bei steigender Temperatur steigt die Schallgeschwindigkeit und daraus folgt eine kürzere Laufzeit.

Temperatur [°C]	20	40	60
Laufzeit [ms]	2,93	2,82	2,74
Schallgeschwindigkeit [m/s] gemessen	341	355	365
Schallgeschwindigkeit [m/s] berechnet, Gleichung 1, S.15	343	355	366

Tabelle 2: Messung der Schallgeschwindigkeit in steigender Lufttemperatur

Für eine möglichst genaue Positionsbestimmung wurde die Entfernungsmessung geeicht.

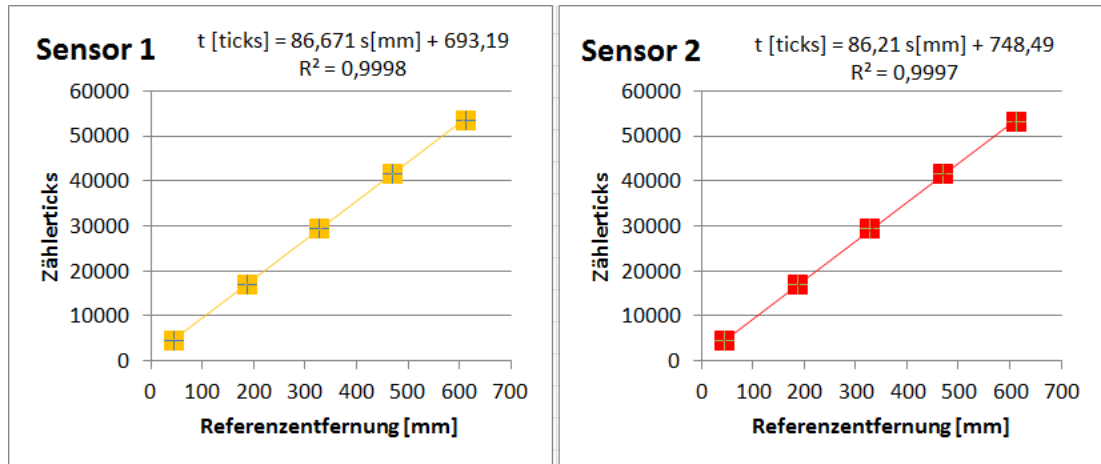


Abbildung 19: Ermittlung der Korrekturgrößen

Nun wurde die eigentliche Messung durchgeführt. Nach Berücksichtigung aller Faktoren war die erreichte Positionsgenauigkeit bei 80% der Messungen besser als 2 cm. In nachfolgender Tabelle werden die Abweichungen von den realen Positionen dargestellt.

Wenn die Position nicht bestimmt werden konnte, wurde der Bereich rot markiert.

		x [cm]				
		5	15	25	35	45
y [cm]	5					
	15					
	25	2,7	1,5	1,6	1,7	
	35		0,8	0,5	1,3	
	45		0,6	1,0	2,2	
	55		1,1	0,9	2,0	
	65		1,1	0,9	3,0	

Tabelle 3: Abweichung der gemessenen Position von der realen Position in cm

Das Messobjekt – ein Glaszylinder mit 5cm Durchmesser – konnte mit 1mm Genauigkeit positioniert werden. Eine Möglichkeit, die Genauigkeit zu verbessern und den nutzbaren Messbereich zu erweitern, wäre die Nutzung von mehr Ultraschallmodulen. Dies entspräche dem Trilaterationsverfahren des GPS.

6. Fazit

Die Facharbeit ist mit der Messung und deren Auswertung abgeschlossen. Welche Bedeutung wird die Entfernung- und Positionsbestimmung über Laufzeitmessungen haben? Die Satellitennavigation, die erst seit 15 Jahren verfügbar ist, wird eine immer wichtigere Rolle in unserem Leben einnehmen, da die Genauigkeit immer besser wird und dies z.B. fahrerlose Fahrzeuge im Agrarbereich ermöglicht.

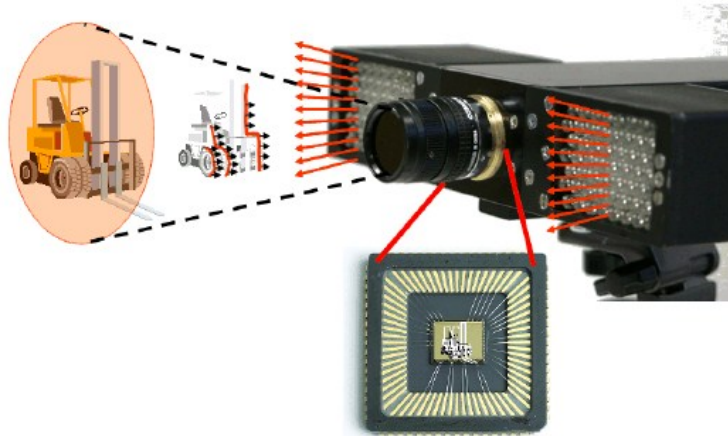


Abbildung 20: 3D Bildgebungsverfahren basierend auf der PMD Laufzeit Kamera

Die deutsche Firma PMDTechnologies ist ein Pionier auf dem Gebiet der bildgebenden Laufzeitmessung mit frequenzmoduliertem Licht. Die patentierten 3-D Kameras arbeiten mit „smart pixels“, die es der Kamera ermöglichen, für jeden Pixel zusätzlich zum Grauwert auch einen Entfernungswert auszugeben.¹¹ Diese Technik wird sich in den nächsten Jahren im Automobilbereich etablieren (Audi ist einer der Investoren), da die Kamera die Sicherheit im Straßenverkehr durch die Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen deutlich erhöhen kann.

Insgesamt hat mir das Thema Positionsbestimmung durch Laufzeitmessung mit Ultraschall einen guten Überblick und gleichzeitig Tiefgang zu Methoden der Navigation und Positionsbestimmung gegeben. Die Versuche waren eine Herausforderung, da ich mir viele zusätzliche Fähigkeiten aneignen musste, unter anderem die Programmierung von Mikrokontrollern. Gerade diese Herausforderung und die Durchführung des Experiments haben mir sehr viel Spaß gemacht. Die Positionsbestimmung mit Ultraschall lässt sich sehr gut in den Unterricht integrieren, da die Schulphysik vollkommen ausreicht.

¹¹ „A 3D TIME OF FLIGHT CAMERA FOR OBJECT DETECTION“, http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/publications/200705_PMD_ETHZuerich.pdf

7. Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Angulation</i>	<i>4</i>
<i>Abbildung 2: Hyperbelkarte</i>	<i>5</i>
<i>Abbildung 3: Trilateration</i>	<i>6</i>
<i>Abbildung 4: Mikro- und Makro Funkzellen</i>	<i>7</i>
<i>Abbildung 5: Messung am McDonald Observatory</i>	<i>9</i>
<i>Abbildung 6: Vergleich Broadband Radar (links) und herkömmliches Radar (rechts)</i>	<i>10</i>
<i>Abbildung 7: Vereinfachte Struktur des Quarzes</i>	<i>11</i>
<i>Abbildung 8: Verhalten der Strukturzelle bei Druck, parallel zu einer polaren Achse</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 9: Verhalten der Strukturzelle bei Druck, parallel zu einer neutralen Achse</i>	<i>12</i>
<i>Abbildung 10: Frequenzsensitivität der Ultraschall-Sender und -Empfänger</i>	<i>13</i>
<i>Abbildung 11: Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur</i>	<i>15</i>
<i>Abbildung 12: Schallabsorption in Luft bei 20°C</i>	<i>16</i>
<i>Abbildung 13: Versuchsaufbau des Experiments</i>	<i>17</i>
<i>Abbildung 14: Messbereich des Ultraschallsensors</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 15: Offener Ultraschallsensor</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 16: Ablauf der Entfernungsmessung</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 17: Rückseite und Vorderseite des Ultraschallmoduls</i>	<i>20</i>
<i>Abbildung 18: Mikrokontroller und C-Control Board</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 19: Ermittlung der Korrekturgrößen</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 20: 3D Bildgebungsverfahren basierend auf der PMD Laufzeit Kamera</i>	<i>24</i>

8. Quellennachweis der Abbildungen

- Abbildung 2 <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hyperbelkarte.svg>
- Abbildung 3 <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Trilateration.png>
- Abbildung 5 <http://mcdonaldobservatory.org/news/gallery/image.php?id=2>
- Abbildung 6 <http://www.simrad-yachting.de/Produkte/Radaranlagen/Simrad-Broadband-Radar/Sehen-Sie-selbst/>
- Abbildung 7 <http://www.piezoeffekt.de/1theory.php>
- Abbildung 8 <http://www.piezoeffekt.de/1theory.php> + eigene Bearbeitung
- Abbildung 9 <http://www.piezoeffekt.de/1theory.php> + eigene Bearbeitung
- Abbildung 10 <http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s15e.pdf> , Seite 9
- Abbildung 12 [http://bsd.rane.com/pdf/ranenotes/Enviromental Effects on the Speed of Sound.pdf](http://bsd.rane.com/pdf/ranenotes/Enviromental_Effects_on_the_Speed_of_Sound.pdf), Seite 7
- Abbildung 14 <http://picaxe.hobbizine.com/srf05.html>
- Abbildung 15 <http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s15e.pdf> , Seite 5
- Abbildung 16 <http://www.robotikhardware.de/download/srf05doku.pdf> , Seite 2
- Abbildung 17 http://www.shop.robotikhardware.de/shop/catalog/product_info.php?products_id=133
- Abbildung 18 http://www.c-control.de/c-control-pro/c-control-pro/startseite_c-control-pro.html
- Abbildung 20 http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/publications/200705_PMD_ETHZuerich.pdf , Seite 2

Alle Quellenangaben wurden am 22.12.2010 überprüft.

Alle Abbildungen ohne Quellenangabe wurden selbstständig von mir erstellt.

9. Literaturverzeichnis

1. Bohn - Environmental Effects on the Speed of Sound
Journal of the Audio Engineering Society 1988
[http://bsd.rane.com/pdf/ranenotes/Environmental Effects on the Speed of Sound.pdf](http://bsd.rane.com/pdf/ranenotes/Environmental%20Effects%20on%20the%20Speed%20of%20Sound.pdf) (22.12.2010)
2. GPS - Essentials of Satellite Navigation
http://www.u-blox.com/images/downloads/Product_Docs/GPS_Compendum%28GPS-X-02007%29.pdf (18.12.2010)
3. Adiatenexponent
http://www.personal.uni-jena.de/~plerra/physik/protokolle/seite_101-versuch_205.pdf (15.12.2010)
4. How GPS Receivers Work
<http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/travel/gps1.htm> (15.12.2010)
5. Piezoelektrizität
[http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrizität](http://de.wikipedia.org/wiki/Piezoelektrizit%C4%84t) (21.12.2010)
6. Mathematical Introduction to Integrated Navigation Systems with Applications
<http://www.aiaa.org/content.cfm?pageid=161&lumeetingid=2539> (15.12.2010)
7. Funknavigation
<http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Funknavigation.html> (15.12.2010)
8. Bayesian analysis of lunar laser ranging data
<http://quasar.as.utexas.edu/papers/LunarBayes.pdf> (21.12.2010)
9. Was ist ein Mikrokontroller?
http://www.mikrocontroller.net/articles/AVR-Tutorial#_Was_ist_ein_Mikrocontroller.3F (21.12.2010)
10. Eine wirklich andere Technologie
<http://www.simrad-yachting.com/de/Produkte/Freizeit/Simrad-Broadband-Radar/Die-Technologie/> (19.12.2010)

11. Entfernungsmessung
<http://de.wikipedia.org/wiki/Entfernungsmessung> (21.12.2010)
12. Robot Obstacle Detection and Avoidance with the Devantech SRF05 Ultrasonic Range Finder
<http://picaxe.hobbizine.com/srf05.html> (19.12.2010)
13. NAVSTAR GPS
<http://gpso.de/technik/navstar.html> (20.12.2010.)
14. ENTWICKLUNG - Geschichte des Sextanten
<http://www.sextant.at/entwicklung.htm> (20.12.2010)
15. Grundlagen der Nanostelltechnik
http://www.physikinstrumente.de/de/pdf_extra/2009_PI_Katalog_Grundlagen_der_Nanostelltechnik-Tutorial.pdf (21.12.2010)
16. Heat Capacity Ratio
http://en.wikipedia.org/wiki/Heat_capacity_ratio (19.12.2010)
17. HEPS
http://www.hvbg.hessen.de/irj/HVBG_Internet?cid=876b966304609ee3e3cddb70a3c6a403 (20.12.2010)
18. Indoor-Ortung
<http://www.tm.tfh-wildau.de/~sbruntha/wiki/index.php/Indoor-Ortung>
(15.12.2010)
19. Integrierte Navigation
http://www.nav.uni-stuttgart.de/navigation/forschung/integrierte_navigation/
(15.12.2010)
20. LMC6032 CMOS Dual Operational Amplifier
<http://www.national.com/ds/LM/LMC6032.pdf> (21.12.2010)

21. Lokalisierung und Ortsbestimmungs-Verfahren für mobile Systeme
http://www.elektroniknet.de/kommunikation/technik-know-how/kommunikations-module-u-systeme/article/1522/2/Lokalisierung_und_Ortsbestimmungs-Verfahren_fuer_mobile_Systeme/ (15.12.2010)
22. Loran-C Signal Characteristics
http://jproc.ca/hyperbolic/loran_c_sigchar.html (15.12.2010)
23. PIC16F630/676 Data Sheet
<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40039F.pdf> (21.12.2010)
24. Piezoeffekt
http://www.torabi.de/physik/projektlabor/bin/PL_268_Piezoeffekt.pdf
(19.12.2010)
25. Piezoeffekt
<http://www.techniklexikon.net/d/piezoeffekt/piezoeffekt.htm> (15.12.2010)
26. Positionsbestimmung
<http://www.kowoma.de/gps/Positionsbestimmung.htm> (15.12.2010)
27. Roboter-Autos: Google baut fahrerlose Fahrzeuge
<http://www.computer-nach-wunsch.de/news/roboter-autos-google-baut-fahrerlose-fahrzeuge.htm> (21.12.2010)
28. Ultrasonic Sensor Application Manual
<http://www.murata.com/products/catalog/pdf/s15e.pdf> (21.12.2010)
29. Was Sie schon immer zum Rechnen mit dB wissen wollten.
http://www2.rohde-schwarz.com/file_6407/1MA98_4D.pdf (21.12.2010)
30. Berechnung des Verhältnisses zwischen atmosphärischem Druck und der Höhe für trockene Luft
http://www.atmosphere.mpg.de/enid/1_Die_Stratosphaere_verstehen/_Druck_u_Hoehe_1md.html (15.12.2010)

31. Cell-ID-Verfahren

<http://www.it-administrator.de/lexikon/cell-id-verfahren.html> (15.12.2010)

32. Chronometer

<http://de.wikipedia.org/wiki/Chronometer> (20.12.2010)

33. Der Piezoeffekt am Beispiel des Quarzkristalls

<http://www.piezoeffekt.de/1theory.php> (15.12.2010)

34. A 3D TIME OF FLIGHT CAMERA FOR OBJECT DETECTION

http://www.pmdtec.com/fileadmin/pmdtec/downloads/publications/200705_PMD_ETHZuerich.pdf (16.12.2010)

35. Lateration

<http://de.wikipedia.org/wiki/Lateration> (22.12.2010)

Als weitere Quelle dienten mir Gespräche mit Diplom Physiker Falk Viczian.

10. Anhang

10.1. DVD-Inhalt

Ordner Quellen: Alle elektronischen Quellen, die ich verwendet habe.

Ordner Bilder: Alle Bilder der Dokumentation meiner Versuche, sowie die Webseiten für die Bilder mit Quellenangabe.

Ordner Programme: Sourcecode

Ordner Facharbeit: Enthält diese Facharbeit in elektronischer Form.

10.2. Sourcecode Positionsbestimmung

```

//-----
// Über den Timer Prescaler wird das Teilungsverhältnis (Oszillatorfrequenz/ps)
// festgelegt. (14,7456MHz/ps)
//
/*
Vorteiler (prescaler)   Zeitbasis (Dauer eines Ticks)
PS_1   (1)   67,8 ns
PS_8   (2)   542,5 ns
PS_64  (3)   4,34 µs
PS_256 (4)   17,36 µs
PS_1024 (5)  69,4 µs
*/
// Deklaration der Formatierungsvariablen
#define SPACE 0x20
#define CR 13
// globale Variablendeklaration
float PM_Wert2, PM_Wert;
float Entfernung2, Entfernung;
int Anzahl_Messungen_Timer3, Anzahl_Messungen_Timer1;
// Deklaration der Portvariablen
#define PORT_TRIGGER 7
#define PORT_TRIGGER2 47

//-----
// Messung
//
void Timer1_ISR(void)
{
    PM_Wert2=Timer_T1GetPM();           // Messwert auslesen
    Irq_GetCount(INT_TIM1CAPT);        // Interrupt zurücksetzen
}

void Timer3_ISR(void)
{
    PM_Wert=Timer_T3GetPM();           // Messwert auslesen
    Irq_GetCount(INT_TIM3CAPT);       // Interrupt zurücksetzen
}

//-----
// Hauptprogramm
//
void main(void)
{
    // Interrupt Service Routine definieren
    Irq_SetVect(INT_TIM3CAPT,Timer3_ISR);

    // LCD_Service Port wird auf Eingang gesetzt, da es sonst zu Problemen kommt
    Port_DataDirBit(39,PORT_IN);

    Port_DataDirBit(PORT_TRIGGER,PORT_OUT); // Ausgabe vorbereiten
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,0);         // Ausgang ausschalten

    // Interrupt Service Routine definieren
    Irq_SetVect(INT_TIM1CAPT,Timer1_ISR);
    Port_DataDirBit(PORT_TRIGGER2,PORT_OUT); // Ausgabe vorbereiten
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER2,0);         // Ausgang ausschalten

    // Endlosschleife zur Positionsbestimmung
    while (true)
    {
        //Das erste Modul misst Entfernung
        Entfernungsmessung1();
        AbsDelay(50);

        //Das zweite Modul misst Entfernung
        Entfernungsmessung2();
        AbsDelay(50);

        //Koordinaten werden berechnet und ausgegeben
        Meldung();
        AbsDelay(500);
    }
}

```



```

void Entfernungsmessung1 (void)
{
    int i,x;

    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,1);    // Ausgang einschalten
    for (i=0;i<20;i++);              // Pulsbreite lms
    // Pulsenmessung initialisieren und starten
    Timer_T3PM(0,PS_1);
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,0);    // Ausgang ausschalten

    while (PM_Wert==0)
    {
        for(x=0;x<20000;x=x+1);
    };
}

void Entfernungsmessung2(void)
{
    byte i,x;
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER2,1);   // Ausgang einschalten
    for (i=0;i<20;i++);              // Pulsbreite lms
    // Pulsenmessung initialisieren und starten
    Timer_T1PM(0,PS_1);
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER2,0);   // Ausgang ausschalten

    while (PM_Wert2==0)
    {
        for(x=0;x<5;x=x+1);
    };                                // Pulsbreite messen
}

void Meldung(void)
{
    float x,y,r1,r2,xm;

    // Berechnung der Entfernungen mit den Korrekturfaktoren
    r1=((PM_Wert-693.19)/86.671)+25;
    r2=((PM_Wert2-748.49)/86.21)+25;
    xm = 500;
    // Berechnung der Koordinaten aus den Entfernungen
    x=((pow(r1,2)-pow(r2,2)+pow(xm,2))/(2*xm));
    y=sqrt(pow(r1,2)-pow(x,2));
    x=x/10;
    y=y/10;

    AbsDelay(1000);
    Port_DataDirBit(39,PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(21,PORT_IN);

    // LCD initialisieren und ausgeben der Werte
    // x:"x-Koordinate [cm]"
    // y:"y-Koordinate [cm]"
    LCD_Init();
    LCD_CursorOff();

    LCD_CursorPos(0x00);
    AbsDelay(100);
    LCD_WriteText("x");
    LCD_WriteChar(0x3A);
    LCD_WriteFloat(x,2);

    LCD_CursorPos(0x40);
    LCD_WriteText("y");
    LCD_WriteChar(0x3A);
    LCD_WriteFloat(y,2);

    Port_DataDirBit(39,PORT_IN);
}

```

10.3. Sourcecode Laufzeitmessung

```

// Deklaration der Formatierungsvariablen
#define SPACE 0x20
#define CR 13
// globale Variablendeklaration
float PM_Wert;
float Entfernung;
// Deklaration der Portvariablen
#define PORT_TRIGGER 7

//-----
// Messung
//

void Timer3_ISR(void)
{
    PM_Wert=Timer_T3GetPM();           // Messwert auslesen
    Irq_GetCount(INT_TIM3CAPT);       // Interrupt zurücksetzen
}
//-----
// Hauptprogramm
//
void main(void)
{
    // Interrupt Service Routine definieren
    Irq_SetVect(INT_TIM3CAPT,Timer3_ISR);
    // LCD Service Port wird auf Eingang gesetzt
    Port_DataDirBit(39,PORT_IN);
    // Ausgabe vorbereiten
    Port_DataDirBit(PORT_TRIGGER,PORT_OUT);
    // Ausgang ausschalten
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,0);

    while (true)
    {
        Entfernungsmessung();
        AbsDelay(50);
        Meldung();
    }
}

void Entfernungsmessung (void)
{
    int i,x;
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,1);    // Ausgang einschalten
    for (i=0;i<20;i++);              // Pulsbreite 1ms
    // Pulsmessung initialisieren und starten
    Timer_T3PM(0,PS_1);
    Port_WriteBit(PORT_TRIGGER,0);    // Ausgang ausschalten

    //auf fallende Flanke warten
    while (PM_Wert==0)
    {
        for(x=0;x<20000;x=x+1);
    };
}

void Meldung(void)
{
    float Laufzeit,PS;
    PS=67.8e-6;

    Laufzeit=PM_Wert*PS;
    AbsDelay(500);
    Port_DataDirBit(39,PORT_OUT);
    Port_DataDirBit(21,PORT_IN);

    LCD_Init();
    LCD_CursorOff();

    LCD_CursorPos(0x00);
    AbsDelay(50);

    LCD_WriteFloat(Laufzeit,5);
    Port_DataDirBit(39,PORT_IN);
    AbsDelay(1000);
}

```

11. Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

....., den

Ort

Datum

.....

Unterschrift des Kollegiaten