

AIS Praktikum
Verfolgung einer akustischen Quelle

Aaron Troll - 4758601

19.05.22 und 17.06.22

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung der Aufgabenstellung	3
2	Versuchsvorbereitung	3
2.1	Auf welchen akustischen Größen basiert das Richtungshören beim Menschen?	3
2.2	Welche Genauigkeit wird dabei in der Azimut- und Medianebene erreicht?	3
2.3	Wie könnte ein geeigneter Messaufbau zur Simulation des Rich- tungshörens aussehen?	3
2.4	Welche Signale sollte die zu lokalisierende akustische Quelle für die Messung abstrahlen?	4
2.5	Welchen Einfluss haben die Parameter des akustischen Quellsig- nals auf die Genauigkeit der Lokalisation?	4
2.6	Welche vereinfachenden Annahmen bzgl. der Ausbreitung der akustischen Quellsignale zur Messeinrichtung sind zweckmäßigerweise zu treffen?	4
2.7	Wie kann die Zuverlässigkeit der Messung erhöht werden?	4
2.8	Welche Verfahren sind zur Auswertung der Messsignale sinnvoll?	5
3	Beschreibung des Versuchsplatzes	5
4	Realisierung des Programms	6
5	Beschreibung der Realisierung	8
6	Darstellung der Messreihen	10
7	Ergebnisdiskussion	10
8	Anhang	11
8.1	Herleitung Laufzeitdifferenz	11
8.2	Fehler der Punktquellennäherung	11
8.3	Fehlereinfluss	13

1 Zusammenfassung der Aufgabenstellung

Das Lokalisieren von Signalquellen ist in vielen Anwendungsfällen äußerst wichtig. Dies kann dafür benutzt werden, herauszufinden wo eine Störung im System vorliegt, um dieses zu behandeln. Eine weitere Anwendung ist die Lokalisation der eigenen Position bei bekannten Geräuschquellen bzw. Rekonstruktion der Bewegung einer Geräuschquelle. Außerdem ist es dadurch möglich Umgebungsgeräusche herauszufiltern.

Ziel des Versuches ist es, sich mit den mathematischen Zusammenhängen der Quellenortung auseinanderzusetzen und diese softwaretechnisch anzuwenden. Danach können Einflussfaktoren experimentell überprüft werden. Dazu muss zuerst die Theorie des Hörens beim Menschen verstanden werden.

Zur Umsetzung soll ein Lautsprecher und zwei (mittels Servomotor drehbare) Mikrofone von einem Raspberry Pi3 angesteuert/abgefragt werden.

2 Versuchsvorbereitung

2.1 Auf welchen akustischen Größen basiert das Richtungshören beim Menschen?

Die Richtung in Horizontalebene wird bestimmt aus Schalldruckpegeldifferenzen und Laufzeitdifferenzen. Die Medianwinkelbestimmung wird mithilfe der Resonanzen (spezielle Frequenzanteile) des Außenohrs und aus Erfahrungen bestimmt. [BMS14]

Dies funktioniert nur in hörbaren Bereichen in einem bestimmten Frequenzband. Bei tiefen Frequenzen ab 80 Hz können Signale nicht mehr lokalisiert werden. Eine weitere Abhängigkeit sind andere Geräuschquellen. Wird ein Ton überlagert von anderen Quellen mit kleiner Zeitabweichung oder Druckabweichung, kann diese Lokalisation gestört werden.

2.2 Welche Genauigkeit wird dabei in der Azimut- und Medianebene erreicht?

Die kleinste unterscheidbare Laufzeitdifferenz sind $10\mu s$. Das entspricht einem kleinsten unterscheidbaren Winkel von $\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \arccos(\frac{3,435mm}{d}) \approx 1^\circ$.

Kohärente Signale können ab $40ms$ voneinander unterschieden werden. Die Ohren können einen Schalldruckpegel von $1dB$ auflösen. In der Medianebene lässt sich eine Winkelgenauigkeit von bis zu $\pm 9^\circ$ erreichen. [CPR17]

2.3 Wie könnte ein geeigneter Messaufbau zur Simulation des Richtungshörens aussehen?

Es können viele verschiedene Aspekte des Richtungshörens simuliert werden. Als Beispiel könnte man:

- Bei zweikanaligem Hören einen Messaufbau verwenden, bei dem die Mikrofone zur Schallquelle gerichtet sind, um so die Laufzeitdifferenz zu messen.
- Aus den verschiedenen Pegeln der beiden Messwerte die Entfernung bestimmen.
- Bei einkanaligem Hören das Mikrofon mit einem akustischen Filter (z.B. Richtmikrofon) beaufschlagen und somit aus der Übertragungsfunktion die Richtung (mehrdeutig) zu bestimmen.
- die Mikrofone drehen, um Uneindeutigkeiten zu umgehen (basiert auf Erfahrungswerten).

2.4 Welche Signale sollte die zu lokalisierende akustische Quelle für die Messung abstrahlen?

Die Signale sollten in der Messzeit die Strecke d mindestens zurücklegen können. Außerdem sollte bei periodischen Signalen die Dauer des Messsignals kleiner als die Messzeit sein. Die Frequenz muss nach Nyquist kleiner sein als die doppelte Abtastfrequenz und die Wellenlänge klein gegenüber den Dimensionen des Messaufbaus sein. Signale mit Signatur eignen sich besonders gut für die Korrelation.

2.5 Welchen Einfluss haben die Parameter des akustischen Quellsignals auf die Genauigkeit der Lokalisation?

Sehr tiefe Frequenzen (unter 80 Hz) können nicht mehr lokalisiert werden. Die Pegelunterschiede müssen groß genug sein (1dB). Je lauter das Signal, desto größer der SNR.

2.6 Welche vereinfachenden Annahmen bzgl. der Ausbreitung der akustischen Quellsignale zur Messeinrichtung sind zweckmäßigerweise zu treffen?

Die Quelle ist weit weg im Vergleich zu den Dimensionen des Messaufbaus, damit die Kugelförmige Wellenfront gut approximiert werden kann (siehe Anhang).

2.7 Wie kann die Zuverlässigkeit der Messung erhöht werden?

Ein Bandpassfilter würde Störgeräusche unterdrücken und hat dabei eine lineare Phasenverschiebung (für Signaturen sinnvoll). Diese hat eine konstante Gruppenlaufzeit. Zusätzlich könnte über mehrere Messungen gemittelt werden.

2.8 Welche Verfahren sind zur Auswertung der Messsignale sinnvoll?

- Es kann das Maximum der Korrelationsfunktion genutzt werden, das der Verzögerungszeit entspricht.
- Es können Verzögerungsglieder an beiden Eingängen eingestellt werden, um die Laufzeitunterschiede herauszufinden. Die Summe der Signale wird maximal bei richtig eingestellter Verzögerung.

3 Beschreibung des Versuchsplatzes

Der Versuch wird mittels eines Raspberry Pi3 durchgeführt, welcher mit einer Maus und einer Tastatur an einen Bildschirm angeschlossen ist. Der Raspberry gibt/empfängt das Audiosignal über das Audiointerface Terratec Au-reon XFIRe8.0HD. Dieses ist an den Lautsprecher und die beiden Mikrophone angeschlossen. Der Pi3 kann außerdem einen Servomotor ansteuern. Die Software besteht aus einem Rahmenprogramm, welches Funktionen aus "acloc.h" benutzt. Dieses Rahmenprogramm soll die Abläufe steuern und die Schnittstelle zwischen den Funktionen und der Hardware regeln.

4 Realisierung des Programms

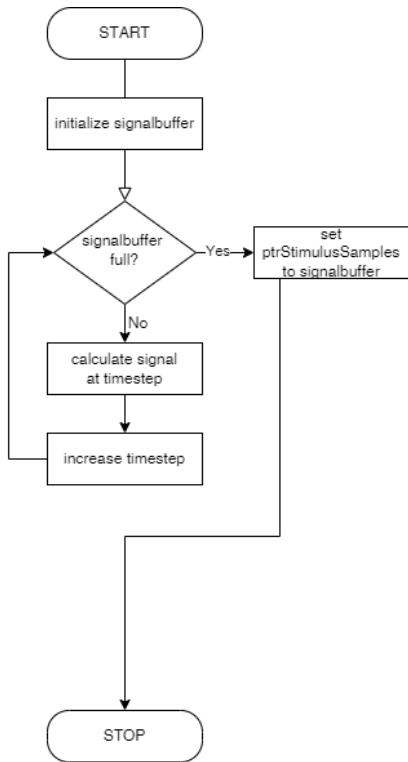


Figure 1: Flowchart der "generateStimulus" Funktion

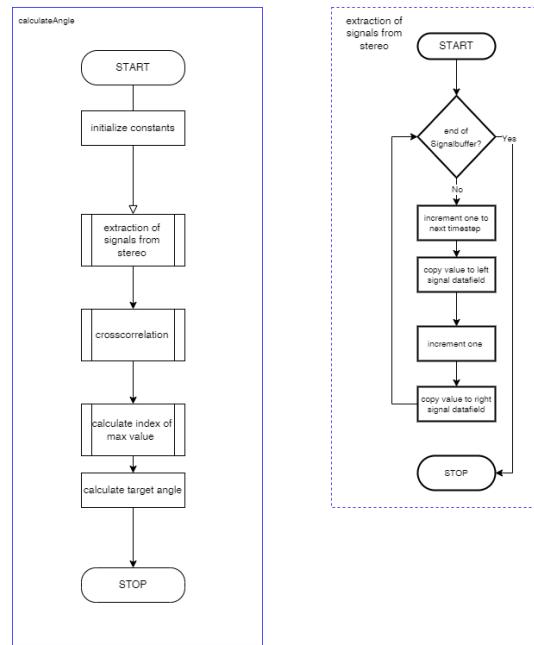


Figure 2: Flowchart der "calculateAngle" Funktion mit Hilfsfunktion

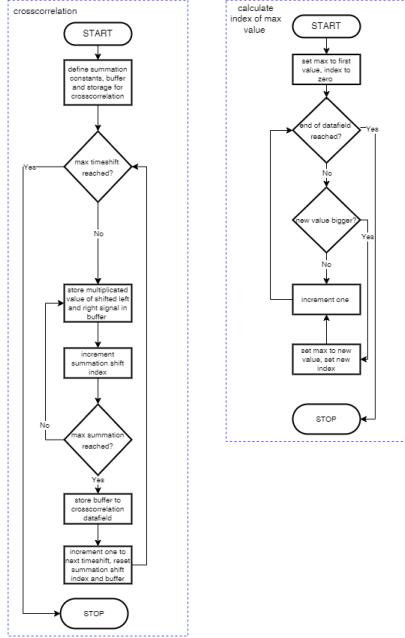


Figure 3: Hilfsfunktionen der "calculateAngle" Funktion

5 Beschreibung der Realisierung

Das Rahmenprogramm, welches den allgemeinen Ablauf regelt, findet sich in der Aufgabenstellung. Darüber hinaus soll hier die Generierung des Testsignales und die Berechnung des Drehwinkels erfolgen. In Sektion 4 sind die Flowcharts zu den beiden Funktionen zu finden. Zu beachten ist, dass der Signalbuffer hier außerhalb der Funktion selbst zu instanziieren ist. Andernfalls wird der Buffer nicht im statischen Speicher angelegt und würde nicht mehr richtig aufgerufen werden im Laufe des Programms. Das generierte Signal ist hier ein Sinus mit der Amplitude 1 und einer Frequenz von 2000 Hz. Dieses dauert eine halbe Sekunde an ($\cong 48000$ Samples). Diese Werte sind gewählt, damit es nicht zu Un-eindeutigkeiten in der Signalverarbeitung kommt. Die ganze Kreuzkorrelation würde die beiden Signale über die gesamte Länge verschieben und für jede Ver-schiebung die multiplizierten Werte der überlagerten Bereiche beider Funktionen addieren. Außerdem müsste auf die Anzahl der Summanden normiert werden. Die Konstanten dafür sind im Code auskommentiert. Die Praxis hat gezeigt, dass für eine Signallänge von einer Sekunde ($\cong 96000$ Samples) die Rechenzeit wesentlich zu hoch ist. Eine grobe Abschätzung über die Gaußsche Sum-

menformel zeigt, dass für eine Kreuzkorrelation und 96000^2 Multiplikationen durchgeführt werden müssen. Selbst mit einer Rechenleistung von 12 Gigaflops würde diese Berechnung über 4 Sekunden dauern. Die echte Rechenzeit wird vermutlich ein Vielfaches davon sein. Im Programm wird also folglich nur über einen kleinen Bereich verschoben. Dieser Bereich beginnt bei $t0_min$, die Zeit die das Signal erwartungsgemäß mindestens benötigt, um von der Signalquelle zu den Mikrofonen zu gelangen. τ_{max} ist die Zeit, die das Signal benötigt, um die Distanz zwischen den beiden Mikrofonen zurückzulegen. Damit die Summationskonstanten in der Schleife nicht geändert werden müssen, wird hier der Einfachheit halber ein Signal bereits zu Beginn der Verschiebung um die maximale Zeit versetzt. Da unbekannt ist, wie die Stellung der beiden Mikrophone beim Eintreffen des Signals ist, muss über den worst-case verschoben werden. Die Maximale Verschiebung ergibt sich somit zu $2 * \tau_{max}$. Die Summationslänge ist konstant und geht noch 10 Periodenlängen weiter als die maximale Verschiebung, damit im worst-case auch ein Maximum der Korrelationsfunktion bei der richtigen Verschiebung entsteht.

Nachdem der Index für den maximalen Wert der Kreuzkorrelation gefunden wurde, muss dieser noch in die Laufzeitdifferenz überführt werden. Hier muss auf die Zeit dt_offset angepasst werden, da der Index 0 einen maximalen negativen Winkel beschreibt. Die Berechnung des Ausgabewinkels "targetangle" wird, so wie in der Herleitung beschrieben, durchgeführt.

6 Darstellung der Messreihen

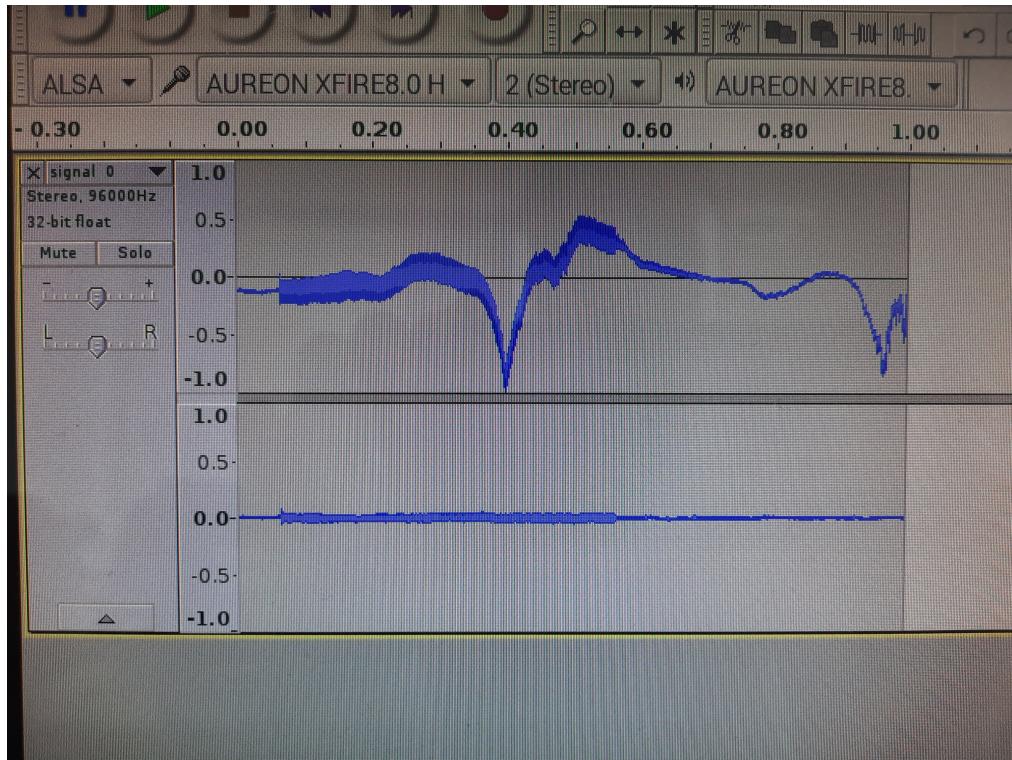


Figure 4: Darstellung der Zeitsignale (oben - linkes Mikrophon , unten rechtes Mikrophon)

7 Ergebnisdiskussion

Das Programm liefert hier keine guten Ergebnisse. Die berechneten Winkel sind, unabhängig von der Stellung der Mikrophone, zufällig verteilt. Außerdem können Winkel außerhalb von $|\pi/2|$ errechnet werden. Dies ist unter anderem der Signalqualität (siehe Sektion 6) geschuldet. Sinnvoll wäre es hier mögliche Störquellen, wie Luftzug und Fremdgeräusche, zu eliminieren. Außerdem sollte ein Bandpass verwendet werden, der das Singal möglichst gut herausfiltert.

8 Anhang

8.1 Herleitung Laufzeitdifferenz

$$\begin{aligned}\Delta s &= c\Delta t = d \cos \alpha \\ \alpha &= \frac{\pi}{2} - \phi + 2\pi n, n \in \mathbb{N} \\ \pm \alpha &= \arccos \frac{c\Delta t}{d}\end{aligned}$$

für einen Winkel von $-\frac{\pi}{2} < \phi < \frac{\pi}{2}$ gilt nur das negative Vorzeichen von α
für $n=0$:

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c\Delta t}{d}$$

8.2 Fehler der Punktquellennäherung

Der Approximationsfehler des näher an der Punktquelle liegenden Mikrofons:

$$a_1 = \frac{d}{2} \cos \phi \quad (1)$$

$$\tan \beta = \frac{a_1}{\hat{r}_1} \rightarrow \cos \beta = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{a_1}{\hat{r}_1})^2}} \quad (2)$$

$$(\hat{r}_1 + e_1) \cos \beta = \hat{r}_1 \quad (3)$$

aus (1), (2) und (3) folgt:

$$e_1 = \frac{d}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{4r}{d} \sin \phi + \frac{4r^2}{d^2}} + \sin \phi \right) - r \quad (4)$$

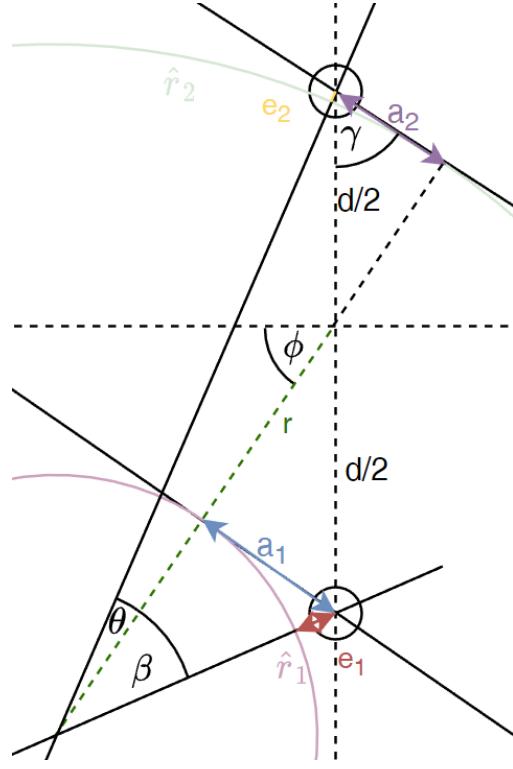


Figure 5: Ausbreitung der Schallwellen als Punktquelle und mit Ebener-Wellenfront Näherung

Der Fehler des weiter entfernten Mikrofons:

$$\hat{r}_2 - r = \frac{d}{2} \sin \phi \quad (5)$$

$$\tan \theta = \frac{a_2}{\hat{r}_2} \quad (6)$$

$$(\hat{r}_2 + e_2) \sin \theta = a_2 \quad (7)$$

$$\gamma = \phi \quad (8)$$

$$\tan \gamma = \frac{\hat{r}_2 - r}{a_2} \quad (9)$$

aus (5) - (9) folgt:

$$e_2 = \frac{d}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4r}{d} \sin \phi + \frac{4r^2}{d^2}} - \sin \phi \right) - r \quad (10)$$

Überprüfen der Grenzfälle:

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} e_1(\phi, r) = \lim_{\phi \rightarrow 0} e_2(\phi, r) = \sqrt{r^2 + \frac{d^2}{4}} - r$$

aus (3) mit $\lim_{r \rightarrow \infty} \beta = 0$ folgt $e_1 = 0$

aus (6) und (7) mit $\lim_{r \rightarrow \infty} \theta = 0$ folgt $(\hat{r}_2 + e_2) = \hat{r}_2 \frac{1}{\cos \theta}$ und somit $e_2 = 0$

Der Gesamtaufzeitfehler aufgrund der Quellennäherung ergibt sich zu:

$$\Delta t_k = \frac{e_1 - e_2}{c}$$

8.3 Fehlereinfluss

Die betrachteten Fehler sind Diskretisierungsfehler durch das zeitdiskrete Abtasten und der Laufzeitfehler aus 8.2.

Der Diskretisierungsfehler ist maximal $\Delta t_d = 1/f_a$.

Der in 8.1 hergeleitete Winkel wird durch diese beiden Fehler maximal um folgende Differenz abweichen:

$$\Delta\phi = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{c(\Delta t_d + \Delta t_k)}{d}$$

Der Quellenabstand r_f , ab dem der Diskretisierungsfehler größer als der Fehler aufgrund Punktquellennäherung wird, ergibt sich aus $\Delta t_d = \Delta t_k$.

Literaturverzeichnis

- [BMS14] Dennis Böck, Matthias Mändl, and Jürgen Schafberger. “Richtungshören in der Medianebene unter Modifizierung der Einflüsse von Schultern und Oberkörper”. In: *DAGA Oldenburg* (2014).
- [CPR17] Jenny Claudia, Majdak Piotr, and Christoph Reuter. “Richtungshören bei statischen und bewegten Schallquellen”. In: *Musik und Bewegung*. 2017.