



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Muhammad Ahmad

Aufbau eines Low-Cost-Hydrophon-Arrays

Muhammad Ahmad
Aufbau eines Low-Cost-Hydrophon-Arrays

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüferin: Prof. Dr. Sarah Hallerberg
Zweitprüfer: Prof. Dr. Ivo Nowak

Betreuerin: Prof. Dr. Sarah Hallerberg

Abgabedatum: 15.07.2025

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich während meiner Bachelorarbeit und meines gesamten Studiums unterstützt, motiviert und begleitet haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr. Sarah Hallerberg, die mich während dieser Arbeit als Betreuerin fachlich begleitet hat. Durch ihre strukturierte Herangehensweise, ihre klaren Rückmeldungen und ihre geduldige Unterstützung hat sie maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ihr Engagement und ihre Verlässlichkeit haben mir stets Sicherheit und Orientierung gegeben. Zudem möchte ich mich bei allen weiteren Professorinnen und Professoren bedanken, die mich während meines Studiums begleitet und mir wertvolles Wissen vermittelt haben.

Ein tief empfundener Dank geht an meine Eltern, insbesondere an meinen Vater, sowie an meine Geschwister und meine Frau. Ihre bedingungslose Unterstützung – sei es durch aufmunternde Worte, Geduld in intensiven Phasen oder das Verständnis für lange Arbeitszeiten – war für mich von unschätzbarem Wert. Ohne ihre Rücksichtnahme und ihren Rückhalt hätte ich diese herausfordernde Zeit nicht mit der nötigen Ruhe und Konzentration meistern können. Besonders mein Vater hat mir in jeder Phase des Studiums mit seiner Erfahrung, seinem Rat und seiner stillen Stärke Kraft gegeben. Sein unermüdlicher Einsatz und seine harte Arbeit sind der Grund dafür, dass ich heute hier stehe.

Ebenso danke ich meinen Freunden und Mitstudierenden, die mich während des gesamten Studiums begleitet haben – durch fachlichen Austausch, gemeinsame Projektarbeit, motivierende Gespräche und persönliche Freundschaft. Ihr Beitrag war nicht nur akademisch, sondern auch menschlich eine große Bereicherung.

Abschließend möchte ich sagen: Diese Arbeit ist das Ergebnis vieler kleiner und großer Unterstützungen – und ich bin für jede einzelne davon dankbar.

Kurzreferat

Muhammad Ahmad

Thema der Arbeit

Aufbau eines Low-Cost-Hydrophon-Arrays

Stichworte

Unterwasserakustik, Hydrophon-Array, Time difference of arrival, Schallquellenlokalisierung, 3D-Ortung

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein kostengünstiges dreidimensionales Hydrophon Array für die passive akustische Schallquellenlokalisierung entwickelt, konstruiert und experimentell getestet. Das Array basiert auf einer tetraedrischen Geometrie mit vier Hydrophonen, wobei handelsübliche Aluminiumprofile und selbst entwickelte Halterungen verwendet wurden. Die Lokalisierung der Schallquellen erfolgt mittels Zeitlaufdifferenz und der nichtlineares Least-Squares-Verfahren zur Berechnung der Quellposition. Die Messungen wurden in einem mit Wasser gefüllten Planschbecken durchgeführt, wobei sowohl Sinustöne als auch Musiksignale aus verschiedenen Richtungen eingespielt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die horizontale Richtung (Azimut) bei geeigneter Signalqualität auch mit nur drei Kanälen zuverlässig bestimmt werden kann, während für eine präzise dreidimensionale Ortung ein vollständig funktionierendes und eingetauchtes Vierkanalsystem erforderlich ist.

Muhammad Ahmad

Title of Thesis

Development of a Low-Cost Hydrophone-Array

Keywords

Underwater acoustics, hydrophone-Array, Time difference of arrival, source localization, 3D positioning

Abstract

This bachelor's thesis presents the development, construction, and experimental evaluation of a cost-effective three-dimensional hydrophone-Array for passive acoustic source localization. The system is based on a tetrahedral configuration using four hydrophones, aluminum T-slot profiles, and custom-designed holders. Source localization is performed using the Time Difference of Arrival (TDOA) method and the nonlinear least squares method for position estimation. Measurements were conducted in a water-filled pool, using both sinusoidal tones and music signals played from various directions. The results demonstrate that horizontal direction (azimuth) can be reliably estimated even with only three active channels under good signal conditions. However, accurate 3D positioning requires all four hydrophones to be properly submerged and functional.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungen	V
Nomenklatur	V
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	1
1.3 Aufbau der Arbeit	2
2 Theoretische Grundlagen	3
2.1 Allgemeine Welleneigenschaften	3
2.2 Schall als Druckwelle	3
2.3 Schallgeschwindigkeit in Wasser	4
2.4 Funktionsweise von Hydrophonen	4
2.5 Hydrophon-Arrays	4
2.6 Vertikales Hydrophon-Array	5
2.7 Geschlepptes Hydrophon-Array	6
2.8 Tetraedrischen Hydrophon-Array	7
2.9 Designprinzipien	7
2.10 Zeitlaufdifferenz bei einem tetraedrischen Hydrophon-Array	8
2.11 TDOA-basierte 3D-Lokalisierung mit einem tetraedrischen Hydrophon-Array	10
3 Konstruktion in der CAD-Umgebung	12
3.1 Wahl des Trägerprofils: Aluminium 4040	12
3.2 CAD-Entwurf: Struktur und Verbindung	12
3.3 Konstruktion der Hydrophon-Halter	13
3.4 Position der Hydrophone im 3D-Raum	14
4 Mechanischer Aufbau des tetraedrischen Hydrophon-Arrays	16
4.1 Materialauswahl	16
4.2 Montageschritte im realen Aufbau	16
4.3 Besondere Herausforderungen und Lösungen im praktischen Aufbau	17
5 Verwendete Messtechnik	19
5.1 Hydrophon AS-1	19
5.2 Zoom F6 Field Recorder	20
6 Messung und Ergebnisse	21
6.1 Durchführung der Messungen	21
6.2 Auswertung und Analyse der ersten Messreihe: Frequenzanalyse und Systemverhalten	22
6.3 Auswertung und Analyse der zweiten Messreihe: Richtungsbestimmung bei Position 90°	26

6.4	Auswertung und Analyse der dritten Messreihe: Richtungsbestimmung bei Position 135° und 270°	31
6.5	Auswertung und Analyse der vierten Messreihe: Richtungsbestimmung mit Musiksignalen	33
6.6	Zusammenfassende Bewertung der Messergebnisse	35
7	Zusammenfassung	36
	Literaturverzeichnis	37
	Anhang	40

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vertikales Hydrophon-Array. Bildquelle: [14]	5
2.2	Ein hinter dem Schiff geschleppter Hydrophon-Array. Bildquelle: [17]	6
2.3	Tetraedrischen Hydrophon-Array. Bildquelle: [19]	7
2.4	Tetraedrischen Hydrophon-Array. Bildquelle: [20]	7
2.5	Die Laufzeitdifferenz bestimmt den Peilwinkel α zur Schallquelle. Bildquelle: [12]	9
2.6	Ein tetraedrisches Array ermöglicht 3D-Ortung. Durch Kombination der Signale aller vier Hydrophone (H1-H4) lassen sich sowohl Azimut als auch Elevation bestimmen, wodurch die Position der Quelle im dreidimensionalen Raum trianguliert werden kann (vorausgesetzt, die Array-Position am Meeresboden und die Schallgeschwindigkeit sind bekannt). Bildquelle: [12]	10
2.7	TDOA-Lokalisierung mit vier Hydrophone. Bildquelle: [26]	11
3.1	CAD Entwurf	13
3.2	Halter Entwurf	14
3.3	Tetraeder Geometrie der Hydrophone	15
5.1	Hydrophon. Bildquelle: [28]	19
5.2	Hydrophon mit 9m Kabel, beweglichem Gewicht und BNC-Stecker. Bildquelle: [28]	19
5.3	Zoom F6 Field Recorder. Bildquelle: [29]	20
6.1	Hydrophon-Array in Planschbecken befestigt mit Deckenkran	21
6.2	Hydrophon-Array mit Lautsprecher	22
6.3	Spektrogramme alle 4 Kanäle	25
6.4	Lokalisierung von Hyperboloid-Schnittpunkten bei 500 Hz mit allen vier Kanälen	31
A.1	Hydrophon-Array Zeichnung	41
B.1	Halter Zeichnung	42
C.1	Einzelteilübersicht Zeichnung	43
D.1	Hydrophon-AS1. Bildquelle: [28]	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien	3
3.1	Koordinaten der Hydrophone im Tetraeder-Aufbau	14
6.1	Vergleich der gemessenen dominanten Frequenzen mit den Sollfrequenzen . .	24
6.2	Ergebnisse der Richtungsbestimmung mit allen vier Kanälen	29
6.3	Ergebnisse der Richtungsbestimmung ohne Kanal 4	30
6.4	Ergebnisse der Richtungsbestimmung mit allen vier Kanälen	32
6.5	Ergebnisse der Richtungsbestimmung ohne Kanal 4	32
6.6	Richtungsbestimmung bei verschiedenen Winkelstellungen des Lautsprechers mit allen vier Kanälen	33
6.7	Richtungsbestimmung bei verschiedenen Winkelstellungen des Lautsprechers ohne Kanal 4	34

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
BWF	Broadcast Wave Format
CAD	Computer-Aided Design
PLA	Polylactid (Kunststoff für 3D-Druck)
SD	Secure Digital (Speicherkarte)
TDOA	Time Difference of Arrival (Zeitlaufdifferenz)
TOA	Time of Arrival (Zeitpunkt der Ankunft)
XLR	Standard-Audioanschluss

Nomenklatur

Formelzeichen		
Symbol	Einheit	Bedeutung
α	[–]	Einfallswinkel
λ	[m]	Wellenlänge
τ	[s]	Zeitverschiebung / Zeitvariable
τ_{ij}	[s]	Zeitunterschied zwischen Sensor i und j
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
d	[m]	Abstand zwischen zwei Hydrophonen
d_{ij}	[m]	Abstand zwischen Hydrophon i und j
f	[s ⁻¹]	Frequenz
$f_{\max}$	[Hz]	Maximale Frequenz ohne Aliasing
$\mathbf{r}_i$	[m]	Position des Sensors i
r_{xy}	[–]	Kreuzkorrelationsfunktion
$\mathbf{s} = [x, y, z]^T$	[m]	Position der Quelle (Ortsvektor)
T	[s]	Periodendauer

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Unterwasserakustik stellt ein zentrales Werkzeug in zahlreichen maritimen Anwendungsfeldern dar, darunter die Ozeanographie, die maritime Sicherheit und die biologische Meeresforschung [1]. Sie ermöglicht die Erfassung und Analyse akustischer Signale unter Wasser – ein essenzieller Zugang zu Informationen in einem Medium, in dem visuelle Beobachtungen stark eingeschränkt sind.

Ein grundlegendes Instrument in der Unterwasserakustik ist das Hydrophon – ein speziell entwickeltes Mikrofon, das unter Wasser Schall aufnehmen oder wiedergeben kann. In der Regel verfügen Hydrophone über einen piezoelektrischen Sensor, der auf Druckschwankungen – etwa verursacht durch Schallwellen – mit der Erzeugung elektrischer Spannung reagiert [2].

Zur präzisen Bestimmung der Richtung und Herkunft von Schallquellen reicht ein einzelnes Hydrophon jedoch nicht aus. Stattdessen werden sogenannte Hydrophon-Arrays eingesetzt – strukturierte Anordnungen mehrerer Sensoren, die es erlauben, neben der Schallaufnahme auch die Laufzeitdifferenzen des Signals zwischen den einzelnen Mikrofonen auszuwerten. So lässt sich die räumliche Position der Schallquelle bestimmen.

Diese Methode der akustischen Lokalisierung spielt in vielen Bereichen eine bedeutende Rolle. Im militärischen Kontext dienen Hydrophon-Arrays etwa der Detektion von U-Booten oder anderen Unterwasserfahrzeugen [3]. Aber auch in der zivilen Nutzung kommen sie zur Anwendung, beispielsweise bei der Überwachung geologischer Aktivitäten wie untermeerischen Erdbeben oder Vulkanausbrüchen [4]. Besonders hervorzuheben ist ihre Relevanz in der ökologischen und bioakustischen Forschung: Zahlreiche Meerestiere – darunter Wale, Robben und Fische – orientieren sich mithilfe akustischer Signale oder nutzen diese zur Kommunikation. In den oftmals trüben Gewässern ist die akustische Erfassung daher eine unverzichtbare Methode zur Verhaltensbeobachtung mariner Lebensformen [5]. Indem man die Richtung von Schallereignissen analysiert, lässt sich zudem erkennen, ob ein einzelnes Individuum oder mehrere Tiere gleichzeitig in der Nähe eines Arrays aktiv sind. Diese Daten liefern wichtige Hinweise auf Populationsgrößen und deren räumliche Verteilung.

Allerdings sind professionelle Hydrophon-Arrays in der Regel kostenintensiv und für viele wissenschaftliche Einrichtungen mit begrenztem Budget schwer zugänglich. Aus diesem Grund wächst das Interesse an erschwinglichen, aber dennoch zuverlässigen Alternativen, die mit vorhandener oder leicht verfügbarer Hardware realisiert werden können.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Bachelorarbeit ist die Entwicklung, der Aufbau und die Validierung eines kostengünstigen dreidimensionalen Hydrophon-Arrays zur passiven akustischen Lokalisierung von Schallquellen im Wasser. Im Mittelpunkt steht die mechanische Konstruktion eines tetraedrischen Hydrophon-Arrays, das aus handelsüblichen Aluminiumprofilen, 3D-gedruckten Halterungen sowie vier Hydrophone besteht. Durch den symmetrischen Aufbau sollen möglichst gleichmäßige Abstände zwischen den Sensoren realisiert werden, um eine präzise Richtungs- und Positionsbestimmung der Schallquelle auf Basis der Laufzeitdifferenzen (Time Difference of Arrival-TDOA) zu ermöglichen. Die Aufnahme der Signale erfolgt dabei über einen Zoom F6 Field Recorder, der eine zeitsynchrone Mehrkanalerfassung ermöglicht. Ziel ist es, ein praktikables und reproduzierbares System zu entwickeln, das mit begrenzten finanziellen Mitteln umsetzbar ist, aber dennoch eine zuverlässige räumliche Ortung von akustischen Ereignissen

im Unterwasserbereich erlaubt. Die Arbeit soll damit einen Beitrag zu offenen, flexiblen Messsystemen leisten, die insbesondere für den Einsatz in Forschung und ökologischer Überwachung relevant sind.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert und folgt einem praxisnahen, logischen Aufbau:

Kapitel 2 – Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die physikalischen Grundlagen der Schallausbreitung im Wasser sowie die Funktionsweise von Hydrophonen dargestellt. Zentrale Konzepte wie Time Difference of Arrival (TDOA) und deren Bedeutung für die Richtungsbestimmung werden erläutert. Darüber hinaus werden verschiedene Geometrien für Hydrophon-Arrays vorgestellt, wobei das tetraedrische Design und seine Vorteile für die 3D-Schallquellenlokalisierung im Detail behandelt werden.

Kapitel 3 – Konstruktion in der CAD-Umgebung

Die virtuelle Planung des Arrays erfolgt mit der Software *PTC Creo 7* [6]. Es werden die Auswahl der Aluminiumprofile (Typ 4040), der Aufbau der tragenden Struktur und die konstruktive Gestaltung der Hydrophonhalter beschrieben. Zusätzlich werden die exakten räumlichen Koordinaten der Hydrophonpositionen festgelegt, um eine präzise Signalverarbeitung zu ermöglichen.

Kapitel 4 – Mechanischer Aufbau des Arrays

Dieses Kapitel beschreibt die praktische Umsetzung des zuvor erstellten CAD-Entwurfs. Dazu zählen die Auswahl und Vorbereitung der Bauteile, die Montage des Rahmens, die Integration der Halterungen, die geschützte Kabelführung in den Profilen sowie Maßnahmen zur Tarierung für einen stabilen Einsatz unter Wasser.

Kapitel 5 – Verwendete Messtechnik

Hier werden die im Messaufbau eingesetzten Komponenten vorgestellt. Im Fokus stehen die Hydrophon des Typs AS-1 sowie der Zoom F6 Field Recorder. Deren technische Eigenschaften, Empfindlichkeiten und praktische Anwendung in Kombination mit dem Array werden ausführlich beschrieben.

Kapitel 6 – Messung und Ergebnisse

Es werden geplante und durchgeführte Tests dokumentiert. Neben der Beschreibung der Testumgebung liegt der Fokus auf der Analyse der Laufzeitdifferenzen (TDOA) zwischen den Hydrophonen und der daraus abgeleiteten dreidimensionalen Lokalisierung von Schallquellen. Die Messergebnisse werden ausgewertet und diskutiert.

Kapitel 7 – Zusammenfassung und Ausblick

Abschließend fasst dieses Kapitel die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammen. Es werden zudem Optimierungspotenziale identifiziert und mögliche Weiterentwicklungen sowie Anwendungen des entwickelten Systems in zukünftigen Projekten aufgezeigt.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Allgemeine Welleneigenschaften

Wellen stellen kurzzeitige Auslenkungen eines Mediums dar, die sich durch die Übertragung von Energie und Informationen auszeichnen. Wenn sie auf ein Objekt treffen, beeinflussen sie dessen Zustand nur vorübergehend, so dass nach dem Abklingen der Welle größtenteils wieder ursprünglichen Zustand vorhanden ist [7]. Für die Charakterisierung von Wellen sind folgende Größen entscheidend:

- Die Frequenz (f) beschreibt, wie viele Schwingungszyklen innerhalb einer Sekunde auftreten und wird in der Einheit Hertz ($\text{Hz} = 1/\text{s}$) angegeben [7].
- Die Periode (T) ist die Zeitdauer, die für einen vollständigen Schwingungszyklus benötigt wird [7].

$$T = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

- Die Wellenlänge (λ) ist der Abstand im Raum zwischen zwei benachbarten Wellenbergen [7]

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.2)$$

2.2 Schall als Druckwelle

Schall breitet sich als longitudinale Druckwelle in einem Medium wie beispielsweise Wasser aus. Dabei wechseln sich Verdichtungen (Kompressionen) und Ausdehnungen (Expansionen) der Materie ab. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Schallwelle fortpflanzt – also die Schallgeschwindigkeit c – hängt vom jeweiligen Material ab [7]. Sie steht außerdem in direktem Zusammenhang mit der Frequenz f des Signals und dessen Wellenlänge λ , wie durch folgende Gleichung beschrieben wird:

$$c = f \cdot \lambda \quad (2.3)$$

Tabelle 2.1: Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien

Medium	c (m/s)
Luft (20°C)	343
Süßwasser (20°C)	1482
Meerwasser (10°C, 35 ppt)	1490

Die deutlich höhere Geschwindigkeit in Wasser gegenüber Luft resultiert primär aus der größeren Dichte und Kompressibilität des Wassers [7].

2.3 Schallgeschwindigkeit in Wasser

In natürlichen Gewässern variiert c mit Temperatur (T), Salzgehalt (S) und Tiefe (z). Die präzise Berechnung erfolgt nach der McKenzie Gleichung [8]:

$$c(T, S, z) = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + 1.34(S - 35) + 0.016z \quad (2.4)$$

mit:

- T : Temperatur in °C
- S : Salzgehalt in ppt
- z : Tiefe in Metern

Beispiel: Für Meerwasser bei $T = 10^\circ\text{C}$, $S = 35$ ppt, $z = 100$ m:

$$c = 1449.2 + 46 - 5.5 + 0.29 + 0 + 1.6 = 1491.6 \text{ m/s}$$

2.4 Funktionsweise von Hydrophonen

Hydrophone gehören zu den wichtigsten Messinstrumenten in der Unterwasserakustik und finden insbesondere in Sonarsystemen breite Anwendung. Ihre Hauptfunktion besteht darin, akustische Wellen im Wasser aufzuzeichnen und in ein auswertbares Format zu überführen. Dabei wandeln sie eintreffende Schallsignale in elektrische Spannungen um, die anschließend analysiert werden können [9].

Diese Umwandlung basiert typischerweise entweder auf dem piezoelektrischen Prinzip – bei dem mechanischer Druck elektrische Ladung erzeugt – oder auf magnetischer Induktion. Die resultierenden Signale werden anschließend über Kabelverbindungen oder drahtlos an eine zentrale Verarbeitungseinheit übermittelt, wo sie interpretiert und weiterverarbeitet werden.

Ein zentrales Qualitätsmerkmal eines Hydrophons ist dessen Empfindlichkeit, also die Fähigkeit, auch sehr schwache Schallwellen zuverlässig zu detektieren. Diese wird standardmäßig in Dezibel bezogen auf 1V/Pa angegeben. Gängige kommerzielle Geräte erreichen in der Praxis Empfindlichkeitswerte im Bereich von -180 bis -160dB [10].

2.5 Hydrophon-Arrays

Der Einsatz eines einzelnen Hydrophons ist dann sinnvoll, wenn lediglich die Erfassung von Schallsignalen erforderlich ist, ohne dass deren Richtung oder Ursprungsort von Bedeutung ist. In solchen Fällen genügt eine einfache Installation, da keine richtungsbezogenen Informationen ausgewertet werden müssen.

Sobald jedoch die Herkunft des Schalls – sei es die Richtung oder der genaue Ort der Quelle – von Interesse ist, bietet sich der Einsatz mehrerer Hydrophonen in Form eines sogenannten Hydrophon-Arrays an. Ein solches Array besteht aus einer festgelegten Anordnung von zwei bis mehreren Hydrophone, die gemeinsam arbeiten, um umfassendere akustische Informationen aus dem Unterwasserbereich zu liefern [11].

Bereits eine einfache, stationäre Konfiguration mit zwei Hydrophonen ermöglicht die Richtungsbestimmung einer Schallquelle durch Analyse der Ankunftszeiten der Signale (Time of

Arrival, TOA) an den jeweiligen Sensoren. Da die Signale die Sensoren zeitlich versetzt erreichen, lässt sich anhand der bekannten Distanz zwischen den Hydrophonen sowohl die Ausbreitungsrichtung des Schalls als auch dessen Geschwindigkeit berechnen [12]. Wird ein drittes Hydrophon in einer dreiecksförmigen Anordnung ergänzt, kann die sogenannte Links-Rechts-Mehrdeutigkeit deutlich reduziert werden, was zu einer präziseren Lokalisierung der Quelle führt.

Diese Form der Installation eignet sich besonders zur Überwachung maritimen Verkehrs, zur Erfassung der Geschwindigkeit von Schiffen sowie zur Ortung und Beobachtung von Meeres-säugetern in ihrem natürlichen Lebensraum [3][5].

2.6 Vertikales Hydrophon-Array

Ein vertikales Hydrophon-Array besteht aus mehreren Hydrophonen, die entlang einer senkrechten Linie im Wasser angeordnet sind. Diese spezielle Konfiguration ermöglicht die akustische Überwachung in unterschiedlichen Tiefen der Wassersäule und bietet somit detaillierte Informationen über den vertikalen Verlauf von Schallsignalen. Stationäre vertikale Arrays werden häufig für das sogenannte Beamforming eingesetzt – eine Technik, die gezieltes Hören in bestimmte Richtungen erlaubt.

Durch die vertikale Anordnung mehrerer Hydrophone lassen sich exakte akustische Messungen entlang der gesamten Schallausbreitung in der Wassersäule durchführen. Eine besonders einfache Möglichkeit zur Umsetzung bietet ein driftendes vertikales Array, bei dem mehrere Hydrophonen an einer frei treibenden Boje befestigt werden. Diese mobile und omnidirektionale Variante erlaubt es, Schall aus allen Richtungen auf unterschiedlichen Tiefenebenen zu erfassen [13].

Ein Beispiel für eine moderne Lösung stellt die WiFi-Boje von Ocean Sonics dar, die es ermöglicht, Daten in Echtzeit von mehreren Hydrophone gleichzeitig zu erfassen, zu analysieren und darzustellen. Solche Systeme werden insbesondere für nicht-invasive Beobachtungen des Verhaltens mariner Säugetiere in verschiedenen Tiefen eingesetzt. Da weder Motoren noch menschliche Taucher das System begleiten, bleibt der natürliche Lebensraum ungestört, und die Datenübertragung erfolgt geräuschlos über eine drahtlose Verbindung [11].



Abbildung 2.1: Vertikales Hydrophon-Array. Bildquelle: [14]

Herausforderungen bei der akustischen Ortung mit Vertikale Arrays

Vertikale Hydrophon-Arrays stoßen bei der akustischen Lokalisierung an gewisse technische Grenzen, insbesondere wenn eine präzise Richtungszuordnung erforderlich ist. Aufgrund der charakteristischen Anordnung entlang einer Linie entstehen Einschränkungen bei der räumlichen Auflösung, insbesondere bei der Unterscheidung zwischen symmetrisch zur Array-Achse liegenden Schallquellen. Dies führt zu sogenannten konischen Peilwinkeln, wodurch es schwierig wird, Signale eindeutig einer Richtung zuzuordnen – insbesondere bei der Links-Rechts- oder Oben-Unten-Unterscheidung [15].

Bei Arten wie Delfinen, die häufig in oberflächennahen Bereichen vokalisieren, stellt die vertikale Richtungsmehrdeutigkeit meist kein großes Problem dar, da ihre Signale typischerweise von oben eintreffen. Kritischer hingegen ist die laterale Mehrdeutigkeit: Hier kann es zu Unsicherheiten in der Richtungsbestimmung kommen, die eine exakte Lokalisierung erschweren. In solchen Fällen sind oftmals zusätzliche Beobachtungsmaßnahmen erforderlich, wie etwa längere oder gezielte Fahrtrouten, um die genaue Position der Tiere einzugrenzen.

Noch komplexer gestaltet sich die Ortung bei Tiefseespezies wie den Schnabelwalen. Bei diesen kann insbesondere der vertikale Peilwinkel – auch Deklinationswinkel genannt – zu erheblichen Fehlern führen, wenn die tatsächliche Tiefe der Tiere nicht exakt bekannt ist. Dies wirkt sich negativ auf die Berechnung der Entfernung zur Beobachtungslinie aus und kann die Genauigkeit der Datenerfassung stark beeinträchtigen.

Ein verfeinertes Ortungsverfahren mit verbesserter räumlicher Auflösung könnte hier wesentlich genauere Ergebnisse ermöglichen. Dadurch ließe sich die akustische Detektion und Lokalisierung verschiedener Zahnwalarten – einschließlich Delfinen und Walen – deutlich effizienter und zuverlässiger gestalten [15].

2.7 Geschlepptes Hydrophon-Array

Eine mobile Methode zur Erfassung von Unterwasserschall besteht im Einsatz sogenannter geschleppter Arrays. Dabei handelt es sich um Systeme, bei denen mehrere Hydrophone an einer flexiblen Leitung befestigt sind und hinter einem fahrenden Schiff oder Unterwasserfahrzeug gezogen werden. Um sicherzustellen, dass die Hydrophone stabil in einer festgelegten Tiefe verbleiben und keine störenden Schwankungen auftreten, wird häufig ein Beschwerungsgewicht (Depressor) angebracht. Dieses Gewicht hält das Array während der Bewegung auf konstanter Tiefe, wodurch eine gleichbleibende Signalqualität gewährleistet wird [11] [16].

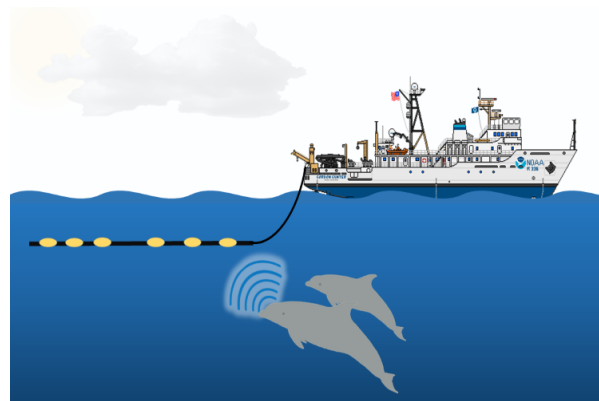


Abbildung 2.2: Ein hinter dem Schiff geschleppter Hydrophon-Array. Bildquelle: [17]

2.8 Tetraedrischen Hydrophon-Array

Eine besonders präzise Möglichkeit zur dreidimensionalen Ortung von Schallquellen bietet das sogenannte Tetraedrischen Hydrophon-Array. In dieser Konfiguration sind vier Hydrophone in einer geometrischen Anordnung befestigt, die der Form eines Tetraeders entspricht – also mit gleichmäßigem Abstand in drei Dimensionen verteilt [Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4]. Diese Bauweise ermöglicht eine besonders genaue Bestimmung der Position einer akustischen Quelle im Raum und löst dabei typische Richtungsmehrdeutigkeiten sowohl auf horizontaler als auch auf vertikaler Ebene effektiv auf [15].

Aufgrund ihrer geringen Größe und einfachen Handhabung sind Tetraedrischen Hydrophon-Arrays besonders geeignet für Einsätze in engen oder mobilen maritimen Umgebungen, ohne dass dabei auf präzise Ortungsfunktionen verzichtet werden muss [18].



Abbildung 2.3: Tetraedrischen Hydrophon-Array. Bildquelle: [19]

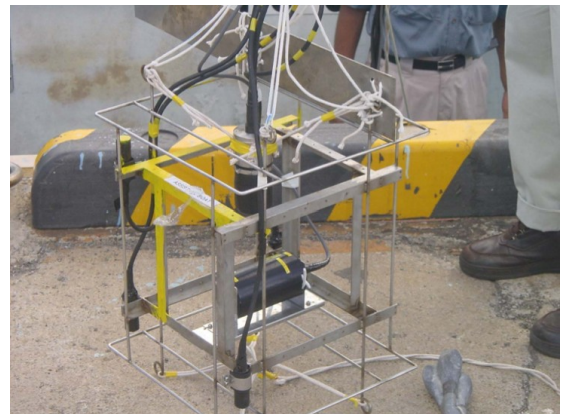


Abbildung 2.4: Tetraedrischen Hydrophon-Array. Bildquelle: [20]

2.9 Designprinzipien

Abstandsoptimierung der Hydrophone

Die Wahl des Abstands zwischen den einzelnen Hydrophonen ist ein zentraler Aspekt bei der Konstruktion eines Tetraedrischen Hydrophon-Array. Der Abstand beeinflusst maßgeblich die maximale nutzbare Frequenz ohne das Auftreten von spatial Aliasing und bestimmt gleichzeitig die Auflösung bei tiefen Frequenzen.

Räumliches Aliasing

In der Unterwasserakustik beschreibt räumliches Aliasing ein Phänomen, bei dem aufgrund zu großer Abstände zwischen Hydrophonen Signale falsch interpretiert werden. Dies tritt auf, wenn der Abstand d zwischen zwei benachbarten Hydrophonen größer als die halbe Wellenlänge $\lambda/2$ des erfassten Signals ist [21].

Die maximale Frequenz $f_{\max}$, bei der noch ohne Aliasing gearbeitet werden kann, ergibt sich aus folgender Formel:

$$f_{\max} = \frac{c}{2d} \quad , \quad (2.5)$$

mit:

- c = Schallgeschwindigkeit im Wasser (ca. 1500 m/s),
- d = Abstand zwischen zwei benachbarten Hydrophone.

Einfluss der Frequenz auf die Abstandswahl

Da die Wellenlänge λ eines Schallsignals direkt von seiner Frequenz abhängig ist ($\lambda = \frac{c}{f}$), müssen bei höheren Frequenzen die Abstände zwischen den Hydrophone entsprechend kleiner gewählt werden, um Aliasing zu vermeiden [22] [23].

$$d < \frac{\lambda}{2} \quad (2.6)$$

Beispiel:

Bei einer Ziel-Frequenz von 1 kHz ergibt sich eine Wellenlänge von:

$$\lambda = \frac{1500 \text{ m/s}}{1000 \text{ Hz}} = 1,5 \text{ m} \quad (2.7)$$

→ Der maximale Abstand darf in diesem Fall nur 75 cm betragen.

2.10 Zeitlaufdifferenz bei einem tetraedrischen Hydrophon-Array

In der Unterwasserakustik stellt die Zeitdifferenz der Signalankunft (TDOA) eine zentrale Methode zur Lokalisierung von Schallquellen dar. Insbesondere bei der Verwendung eines tetraedrischen Hydrophon-Arrays – einer räumlichen Anordnung von vier Hydrophonen in Form eines regulären Tetraeders – lässt sich die Einfallsrichtung eines Schallsignals mit hoher Genauigkeit bestimmen.

Prinzip der Zeitlaufdifferenz

Sobald eine Schallwelle von einer externen Quelle im Wasser erzeugt wird, breitet sie sich mit einer bekannten Geschwindigkeit (z.B. etwa 1500 m/s in Süßwasser) gleichmäßig aus. Die Hydrophone Array empfangen dieses Signal zu unterschiedlichen Zeitpunkten, abhängig von ihrer Entfernung zur Schallquelle. Diese Unterschiede in den Ankunftszeiten werden als Zeitlaufdifferenzen bezeichnet.

Wenn beispielsweise ein Signal zuerst bei Hydrophon H1 eintrifft und einige Mikrosekunden später bei H2, dann bedeutet dies, dass sich die Schallquelle näher an H1 befindet. Durch die präzise Messung dieser Zeitunterschiede zwischen allen möglichen Hydrophonpaaren (z.B. H1-H2, H1-H3, H1-H4 usw.) kann die Richtung der eintreffenden Schallwelle berechnet werden [12].

Kreuzkorrelation zur Berechnung der TDOA

Um die Laufzeitdifferenz (TDOA) zwischen zwei Hydrophonen präzise zu bestimmen, wird in der Signalverarbeitung die Methode der *Kreuzkorrelation* eingesetzt [24]. Dabei handelt es sich um ein Verfahren zur Messung der Ähnlichkeit zweier zeitlich versetzter Signale. Ein empfangenes Signal wird systematisch über verschiedene Zeitverschiebungen τ mit einem Referenzsignal verglichen. Der Zeitpunkt der besten Übereinstimmung – das Maximum der Kreuzkorrelation – entspricht der Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Signalen.

Für kontinuierliche Signale über ein endliches Zeitintervall T ist die Kreuzkorrelation definiert als [25]:

$$r_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot x(t + \tau) dt \quad (2.8)$$

Dabei ist τ eine kontinuierliche Zeitvariable, die die zeitliche Verschiebung von $x(t)$ relativ zu $y(t)$ angibt. Der Wert von τ , bei dem $r_{xy}(\tau)$ maximal wird, entspricht der geschätzten Laufzeitdifferenz ΔT . Diese Zeitdifferenz kann anschließend zur Bestimmung der Richtung der eintreffenden Schallwelle verwendet werden.

Durch Kombination der Informationen aus allen Hydrophon-Paaren lässt sich der genaue Richtungsvektor der Quelle triangulieren.

Wenn die Wellenfront der Schallwelle zum Zeitpunkt des Eintreffens annähernd eine Gerade bildet (wie eine flache Ebene), kann der Winkel α , den die Welle mit der Verbindungslinie zwischen A und B bildet, durch eine einfache Beziehung bestimmt werden [12].

$$\cos(\alpha) = \frac{c \cdot \Delta T}{d} \quad (2.9)$$

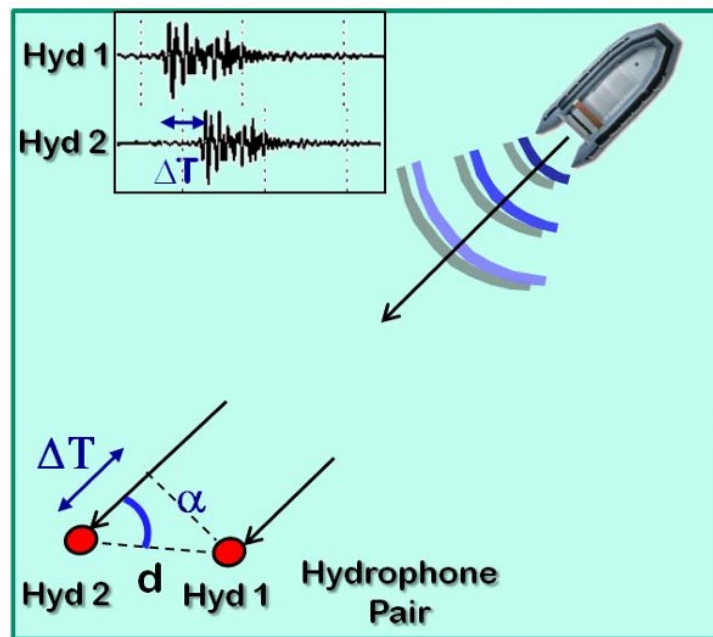


Abbildung 2.5: Die Laufzeitdifferenz bestimmt den Peilwinkel α zur Schallquelle. Bildquelle: [12]

Tetraedrische Anordnung und ihre Vorteile

Ein Tetraeder bietet eine ideale Geometrie zur dreidimensionalen Ortung, da alle vier Hydrophone nicht in einer Ebene liegen. Im Gegensatz zu linearen oder planen Arrays ermöglicht dies die Erfassung sowohl der Azimut als auch der Elevationsrichtung des Signals. Außerdem ist der Abstand zwischen den Hydrophonen im Tetraeder gleich, was die Berechnungen vereinfacht und die Richtungsbestimmung stabiler macht [12].

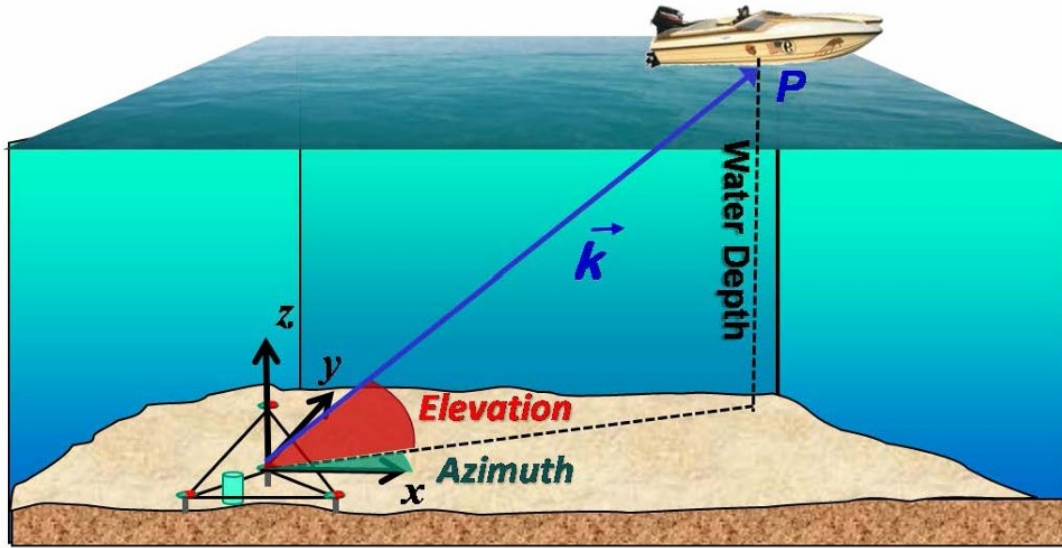


Abbildung 2.6: Ein tetraedrisches Array ermöglicht 3D-Ortung. Durch Kombination der Signale aller vier Hydrophone (H1-H4) lassen sich sowohl Azimut als auch Elevation bestimmen, wodurch die Position der Quelle im dreidimensionalen Raum trianguliert werden kann (vorausgesetzt, die Array-Position am Meeresboden und die Schallgeschwindigkeit sind bekannt). Bildquelle: [12]

2.11 TDOA-basierte 3D-Lokalisierung mit einem tetraedrischen Hydrophon-Array

Die geometrische Konfiguration des Tetraedrischen Hydrophon-Arrays ermöglicht eine gleichmäßige Erfassung aus allen Richtungen im Raum und stellt die Minimalanforderung für eine vollständige 3D-Lokalisierung einer Schallquelle dar.

Nachdem die Zeitdifferenzen zwischen den empfangenen Signalen eines tetraedrischen Hydrophon-Arrays mithilfe der Kreuzkorrelation ermittelt wurden, lassen sich diese Daten zur räumlichen Bestimmung der Schallquelle weiterverarbeiten. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass sich das akustische Signal mit konstanter Geschwindigkeit c im Medium ausbreitet und von einer punktförmigen Quelle $\mathbf{s} = [x, y, z]^T$ stammt [26].

Die Zeit, die ein Signal benötigt, um von der Quelle zum Sensor i zu gelangen, ergibt sich aus dem Verhältnis der euklidischen Distanz zur Schallgeschwindigkeit:

$$\tau_i = \frac{\|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\|}{c} \quad (2.10)$$

Die Differenz der Ankunftszeiten zweier Sensoren i und j , also die gemessene TDOA τ_{ij} , ist damit [26]:

$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j = \frac{\|\mathbf{s} - \mathbf{r}_i\| - \|\mathbf{s} - \mathbf{r}_j\|}{c} \quad (2.11)$$

Jedes Paar von Hydrophone liefert eine TDOA-Messung, die geometrisch eine Hyperbelfläche im dreidimensionalen Raum definiert. Diese Fläche beschreibt alle möglichen Punkte, von denen aus das Signal genau mit dieser Zeitdifferenz an den beiden Sensoren eingetroffen wäre. Die tatsächliche Position der Quelle liegt am Schnittpunkt mehrerer solcher Hyperboloide, weshalb für eine eindeutige Lokalisierung mindestens drei unabhängige TDOA-Messungen notwendig sind – was mit vier Hydrophone (6 TDOA-Paare) gewährleistet ist [26].

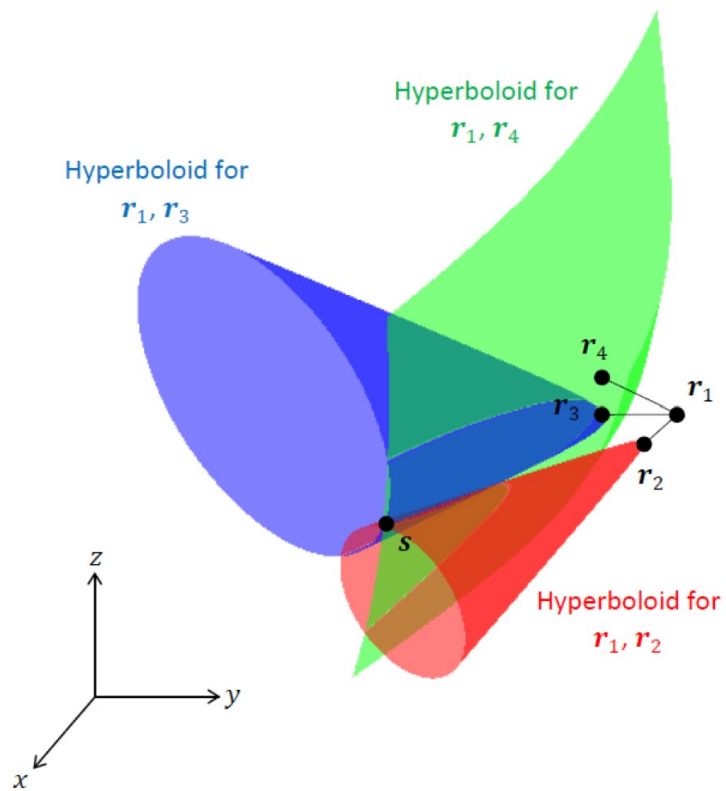


Abbildung 2.7: TDOA-Lokalisierung mit vier Hydrophone. Bildquelle: [26]

3 Konstruktion in der CAD-Umgebung

Die Grundidee für die dreidimensionale Anordnung der Hydrophone orientierte sich an dem in [7] beschriebenen Forschungsansatz. Vor der physischen Realisierung des tetraedrischen Hydrophon-Arrays wurde der vollständige mechanische Aufbau mithilfe der CAD-Software PTC Creo 7 [6] entworfen. Ziel war es, eine realitätsnahe und montagefreundliche Struktur zu modellieren, die unter Wasser stabil bleibt, die Hydrophone in definierten Positionen trägt und gleichzeitig eine einfache Kabelverlegung ermöglicht.

Die Konstruktion wurde so ausgelegt, dass sie alle Anforderungen an ein modulares, transportables und unterwassertaugliches Array erfüllt – inklusive zentrierter Schallquelle, präziser Hydrophonabstände und symmetrischer Geometrie zur 3D-Lokalisierung.

3.1 Wahl des Trägerprofils: Aluminium 4040

Verwendet wurden Aluminiumprofile der Serie 4040, also mit einem quadratischen Querschnitt von 40×40 und durchgängigen T-Nuten auf allen vier Seiten. Dieses Profilsystem wurde gezielt ausgewählt aufgrund folgender Vorteile:

- **Integrierter Kabelkanal:** Die mittige Nut erlaubt eine einfache und geschützte Verlegung von Hydrofonkabeln innerhalb der Profile.
- **Stabilität bei geringem Gewicht:** 4040-Profile sind extrem biegesteif und dennoch leicht genug für mobilen Einsatz.
- **Modularität:** Durch das T-Nut-System können Halter, Muttern, Schrauben und Zubehör flexibel an beliebiger Stelle befestigt werden.
- **Korrosionsverhalten:** Für Süßwassereinsatz gut geeignet.

3.2 CAD-Entwurf: Struktur und Verbindung

Die Basisstruktur besteht aus drei gleich langen Aluminiumprofilen (Typ 4040, Länge 1000 mm) in einer T-Anordnung. Dabei liegen zwei Profile horizontal senkrecht zueinander, während das dritte Profil im rechten Winkel dazwischen montiert ist – so entsteht die charakteristische T-Form. Am oberen Ende des vertikal nach oben zeigenden Profils befinden sich ein 200 mm lange Querprofil.

Dieses Querprofil dient als Träger für Ringmuttern, an denen ein Seil oder eine Schnur befestigt werden kann. Somit kann das gesamte Array sicher ins Wasser abgelassen oder aus dem Wasser gehoben werden. Die Montage der Querprofile erfolgt über Corner Brackets (40×40 mm), welche eine stabile rechtwinklige Verbindung garantieren.

Oben an der Spitze des vertikalen Profils sind ein Ringmutter M8 am 200mm Querprofil montiert. Es dient als Aufhängepunkte für ein Polypropylenseil. Das Seil ermöglicht ein kontrolliertes Absenken und Bergen des Arrays. Diese Montage erlaubt nicht nur vertikale Stabilität, sondern auch die Möglichkeit zur schwimmenden Justierung, z.B. durch Bojen oder Gegengewichte.



Abbildung 3.1: CAD Entwurf

3.3 Konstruktion der Hydrophon-Halter

Jedes Hydrophon wird mit einem speziell entworfenen Halter befestigt, der ebenfalls in Creo konstruiert wurde (siehe Abbildung 3.2). Der Halter wurde so ausgelegt, dass er sowohl stabil als auch vibrationsarm montiert werden kann.

Beim Design wurde außerdem berücksichtigt, dass sich das eigentliche Sensorelement des Hydrophons an der Oberseite befindet und nicht abgedeckt werden darf. Daher wurde der Halter so konstruiert, dass der obere Bereich des Hydrophons frei bleibt und ungehindert akustische Signale erfassen kann.

Technische Details der Halterung

- **Zentrale Bohrung:** Zur Durchführung eines Standard-M8-Schraubengewindes (DIN ISO 4762, zylindrischer Kopf).
- **Seitliche Aussparung:** Ermöglicht die geschützte Verlegung des Hydrophonkabels.
- **Vertiefung für Kabelbinder:** Dient der zusätzlichen Fixierung des Hydrophonkörpers.
- **Passform zur 40 × 40 mm Profilstruktur:** Die Unterseite ist so gestaltet, dass sie sich exakt an das Profil anschmiegt und dort kraftschlüssig befestigt werden kann.

Diese Halterungen werden direkt an den Enden der drei 1000m langen Hauptprofile sowie am oberen Ende des vertikalen Profils angebracht – jeweils genau an den vier Ecken des Tetraeders.

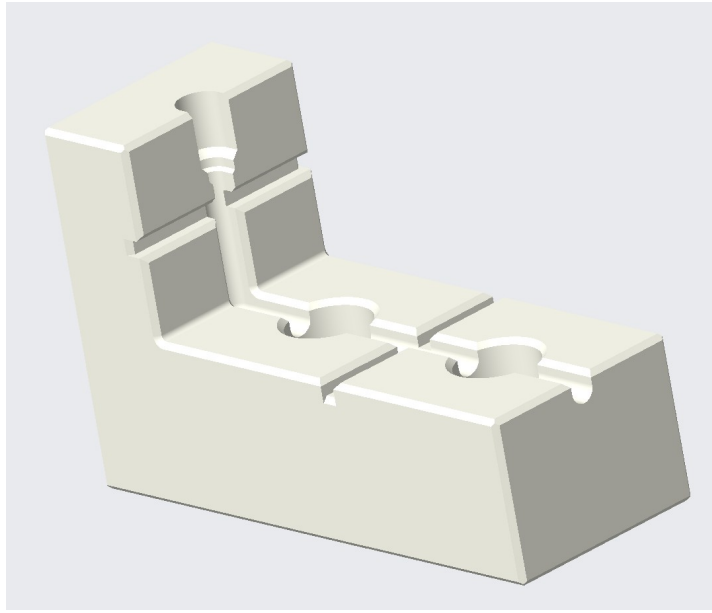


Abbildung 3.2: Halter Entwurf

3.4 Position der Hydrophone im 3D-Raum

Die Positionen der Halter der Hydrophone sind maßgeblich für die präzise Schallortung und die genaue Berechnung der Laufzeitdifferenzen (TDOA). Bei der Festlegung der Abstände zwischen den Hydrophone wurde gezielt der Einfluss von Spatial Aliasing berücksichtigt. Um Aliasing-Effekte bei der Schallortung zu vermeiden, wurde der Abstand zwischen den Hydrophonen auf 1m festgelegt. Dieser Abstand stellt sicher, dass das System im für die Anwendung relevanten Frequenzbereich zuverlässig arbeiten kann.

Die Abstände d_{ij} zwischen den Hydrophonen 1, 2, 3 und 4 wurden mithilfe des euklidischen Abstands im 3D-Raum berechnet [27]:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2} \quad (3.1)$$

Die Positionen der Halter bzw. der Hydrophone sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst:

Hydrophon	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	0	0	0
2	1000	0	0
3	500	866.03	0
4	500	288.68	816.5

Tabelle 3.1: Koordinaten der Hydrophone im Tetraeder-Aufbau

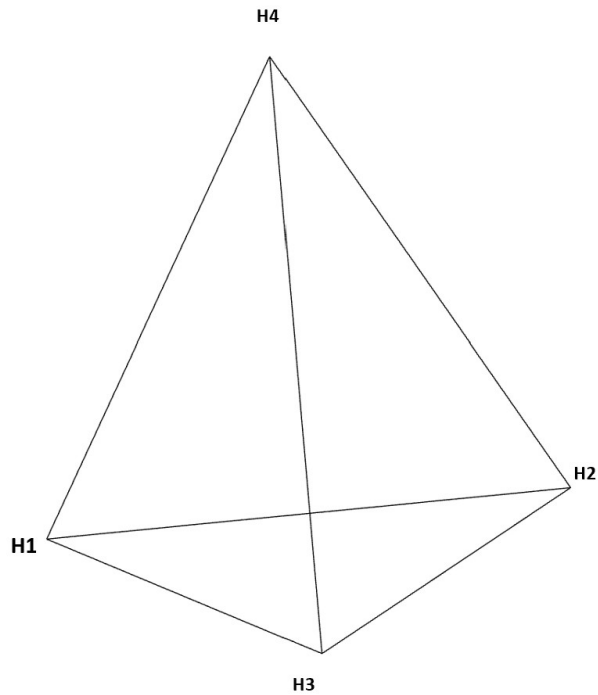


Abbildung 3.3: Tetraeder Geometrie der Hydrophone

Berechnung des Aliasing-Grenzwerts

Die maximale Frequenz $f_{\max}$, bei der das System ohne räumliches Aliasing arbeiten kann, berechnet sich nach folgender Formel [22] [23]:

$$f_{\max} = \frac{c}{2d} \quad (3.2)$$

mit:

- $c = 1500 \text{ m/s}$ (Schallgeschwindigkeit in Wasser),
- $d = 1 \text{ m}$ (Hydrophonabstand).

$$f_{\max} = \frac{1500}{2 \cdot 1} = 750 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Das bedeutet, dass das Array zuverlässig bis zu einer Frequenz von 750 Hz arbeiten kann, ohne dass Aliasing-Effekte auftreten.

4 Mechanischer Aufbau des tetraedrischen Hydrophon-Arrays

4.1 Materialauswahl

Für den Aufbau des Arrays wurde ausschließlich auf handelsübliche Bauteile zurückgegriffen, die für den Unterwassereinsatz geeignet sind. Konkret kamen zum Einsatz:

- **Aluminiumprofile 4040** (1000 mm Länge) als tragende Elemente – ausgewählt aufgrund der hohen Biegesteifigkeit und des integrierten T-Nut-Systems, das eine geschützte Kabelführung ermöglicht.
- **Aluminiumprofile 4040** (200 mm Länge) zur Montage quer oben, welche für die Befestigung der Abseilpunkte (Ringmuttern) verwendet wurden.
- **Corner Brackets** (40 mm × 40 mm) in Kombination mit T-Nutensteinen, Hammermuttern und M8-DIN-Schrauben, die eine sichere, wieder lösbare Verbindung zwischen den Profilen gewährleisten.
- **Spezialanfertigungen der Hydrophonhalter** aus 3D-gedrucktem PLA, welche präzise an die vorhandenen Profile angepasst wurden und über integrierte Bohrungen sowie Kanäle zur Kabelbefestigung verfügen.
- **Tauchgewichte** (je 1 kg Bleigewichte) und ein Bleigurt zur stabilen Tarierung, so dass die Struktur unter Wasser in die gewünschte Position sinkt.
- **Robustes Polypropylen-Seil** (10 mm Durchmesser), das über fest angebrachte Ringmuttern an den 200 mm Querprofil zum sicheren Absenken bzw. Bergen der Einheit dient.

4.2 Montageschritte im realen Aufbau

1. Zusammenbau der Basisstruktur:

Die physische Montage des tetraedrischen Hydrophon- Arrays erfolgte am 07.05.2025 auf Grundlage der in PTC Creo erstellten CAD-Daten. Zunächst wurden drei Aluminiumprofile mit einer Länge von jeweils 1000 mm auf einer ebenen Werkbank zu einer T-förmigen Grundstruktur ausgerichtet. Die beiden unteren Profile wurden horizontal nebeneinander montiert, während das dritte senkrecht in vertikaler Richtung angesetzt wurde. Die Verbindung der Profile erfolgte kraftschlüssig über 40 × 40 mm Eckwinkel (Corner Brackets), M8-T-Nutensteine, Zylinderschrauben nach ISO 4762 (M8 × 16 mm) sowie passende Unterlegscheiben (ISO 7089 – 8,4 × 1,6 mm). Der Sitz aller Verbindungen wurde sorgfältig kontrolliert, um eine stabile, geometrisch exakte Struktur zu gewährleisten.

2. Integration der Aufhängeeinheit:

An der oberen Spitze des vertikalen Profils wurde ein weiteres Aluminiumprofil mit einer Länge von 200 mm horizontal angebracht. Die Montage erfolgte mithilfe von Eckwinkeln und Schrauben entsprechend der Basisverbindung. In der Mitte dieses Querprofils wurde eine Ringmutter M8 mit einer Zylinderschraube ISO 4762 (M8 × 16 mm) befestigt. Diese dient als zentraler Befestigungspunkt für das Absenkseil. Durch die mittige Ausrichtung konnte eine gleichmäßige Lastverteilung

gewährleistet werden, sodass das Array beim späteren Absenken in aufrechter Position bleibt.

3. Montage der Hydrophonhalter:

Die vier vormontierten Hydrophonhalter wurden an den in der CAD-Planung definierten Positionen entlang der T-förmigen Aluminiumstruktur befestigt. Zwei Halter wurden an den äußeren Ecken der horizontalen Basis angebracht, einer auf halber Höhe des vertikalen Profils und ein weiterer mittig an der horizontalen Querverbindung. Die Befestigung erfolgte mit M8-T-Nutensteinen und Zylinderschrauben ($M8 \times 25$ mm) über die integrierten Befestigungskanäle der Aluminiumprofile. Die genaue Ausrichtung der Halter wurde mittels digitaler Messschieber und Maßband justiert, um eine exakte, gleichmäßige Verteilung der Hydrophonpositionen zu realisieren. Zusätzlich wurden Aussparungen zur Aufnahme von Kabelbindern berücksichtigt.

4. Kabelführung und Sicherung:

Die Anschlusskabel der Hydrophone wurden entlang der T-Nuten der Aluminiumprofile geführt und regelmäßig mit Kabelbindern gesichert. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Kabel weder gespannt noch geknickt sind, um Signalverzögerungen oder Störungen durch mechanische Belastung zu vermeiden. Die Verlegung erfolgte sauber innerhalb der Profilstruktur, sodass die Kabel vor äußerer Beanspruchung geschützt sind. An der oberen Spitze des Arrays wurden die Kabel zusammengeführt und für den Anschluss an den Zoom F6 Recorder vorbereitet.

5. Tarierung und Endmontage:

Zum Ausgleich des Auftriebs und zur Sicherstellung einer senkrechten, stabilen Ausrichtung unter Wasser wurden zwei Bleigewichte mit je 1 kg Masse mithilfe eines Bleigewichtsgürtels am unteren Abschnitt des vertikalen Profils befestigt. Diese Positionierung sorgt dafür, dass der Schwerpunkt der Struktur tief liegt und das Array beim Absenken nicht kippt. Abschließend wurden alle offenen Profilenenden mit Endkappen verschlossen, um Verletzungen zu vermeiden und das Eindringen von Schmutz zu verhindern. Die fertige Konstruktion wurde anschließend einer visuellen Endkontrolle unterzogen und für den Einsatz vorbereitet.

4.3 Besondere Herausforderungen und Lösungen im praktischen Aufbau

– Exakte Maßhaltigkeit:

Durch den Einsatz von digitalen Messschieber und Maßband konnte sichergestellt werden, dass die physische Struktur nahezu identisch mit dem CAD-Modell realisiert wurde. Kleinere Abweichungen wurden durch nachträgliche Feineinstellungen der Schraubenverbindungen korrigiert.

– Kabelintegration in den T-Nuten:

Im Gegensatz zur digitalen Planung musste beim realen Aufbau darauf geachtet werden, dass die Kabel ohne übermäßige Spannung verlegt wurden. Dies wurde durch den Einsatz von speziellen Kabelschellen und flexibel einsetzbaren Kabelbindern gelöst.

– Tarierung für den Einsatz im Wasser:

Da die Zoom F6-Aufzeichnungseinheit über Wasser montiert wird, wurde die sta-

bile Positionierung der Unterwasserstruktur besonders wichtig. Hier halfen zusätzliche Bleigewichte und der präzise angebrachte Bleigurt, um trotz Strömungen und Wellen ein Verrutschen zu vermeiden.

5 Verwendete Messtechnik

Für die Durchführung der Messungen und die Aufnahme von Unterwasserschallsignalen wurde ein technisches Setup verwendet, das aus vier identischen Hydrophonen vom Typ AS-1 sowie einem Zoom F6 Field Recorder bestand. Beide Komponenten wurden gezielt ausgewählt, da sie sich hinsichtlich Frequenzbereich, Signalqualität und Handling ideal für die Anwendung in einem tetraedrischen Hydrophon- Array eignen.

5.1 Hydrophon AS-1

Das Hydrophon AS-1 ist ein hochoempfindliches und omnidirektionales Unterwassermikrofon [28]. Es ist für wissenschaftliche Anwendungen konzipiert und erlaubt die Detektion von akustischen Signalen im Frequenzbereich von ca. 17 Hz bis 40 kHz, wobei der nutzbare und lineare Bereich für präzise Auswertungen typischerweise bis etwa 15 kHz reicht. Die gemessene Empfindlichkeit liegt bei $-193,5 \text{ dB re } 1 \text{ V/Pa}$, was bedeutet, dass auch sehr schwache Schallsignale zuverlässig aufgezeichnet werden können. Das AS-1 basiert auf piezoelektrischen Keramikelementen, die Schalldruck in elektrische Spannung umwandeln [28]. Die Bauform ist wasserdicht vergossen und sehr kompakt, wodurch sich das Modell ideal für die Integration in kleine, räumlich definierte Arrays wie ein Tetraeder eignet.



Abbildung 5.1: Hydrophon. Bildquelle: [28]



Abbildung 5.2: Hydrophon mit 9m Kabel, beweglichem Gewicht und BNC-Stecker. Bildquelle: [28]

Jeder Hydrophon ist mit einem 9 Meter langen, abgeschirmten Koaxialkabel ausgestattet, das werkseitig mit einem BNC-Stecker versehen ist. Zusätzlich verfügt das Kabel über ein verschiebbares Targengewicht mit einer Masse von 150 g, das für eine stabile vertikale Ausrichtung des Sensors im Wasser sorgt [28].

Die vier Hydrophone wurden fest in die dafür konstruierten Halterungen an den Ecken des tetraedrischen Hydrophon-Arrays eingebaut. Die Signalkabel der Hydrophone wurden jeweils über eigens verlegte Leitungen in den T-Nuten der Aluminiumprofile geführt, um mechanischen Stress zu vermeiden und eine geschützte Kabelführung unter Wasser zu gewährleisten.

5.2 Zoom F6 Field Recorder

Zur Aufzeichnung der Signale diente der Zoom F6 Field Recorder, ein tragbares, professionelles Audiogerät mit sechs symmetrischen XLR-Eingängen, das insbesondere für den mobilen Einsatz mit Mehrkanalsystemen entwickelt wurde. Der Zoom F6 unterstützt hochauflösende Aufnahmen mit 32 Bit Worttiefe und Abtastraten bis 192 kHz. In dieser Arbeit wurde eine Samplingrate von 48 kHz gewählt, um eine feine zeitliche Auflösung der Signalkünfte zu gewährleisten [29] – insbesondere für die spätere Berechnung von Laufzeitdifferenzen.



Abbildung 5.3: Zoom F6 Field Recorder. Bildquelle: [29]

Der Zoom F6 zeichnet die eingehenden Signale kanalgetrennt und synchronisiert auf, wodurch er sich optimal für die gleichzeitige Erfassung von mehreren Hydrophonen eignet. Die Geräte-internen A/D-Wandler ermöglichen auch bei geringem Eingangssignal ein sehr gutes Rauschverhalten. Zudem bietet der Zoom F6 die Möglichkeit, die Signale lokal auf einer SD-Karte im BWF-Format (Broadcast WAV) abzuspeichern, was eine einfache Weiterverarbeitung der Daten in Softwareumgebungen wie Audacity, MATLAB oder Python erlaubt.

Während der Versuchsdurchführung blieb der Zoom F6 außerhalb des Wassers, beispielsweise am Beckenrand oder auf einer erhöhten Plattform. Die Verbindung zwischen den unter Wasser befindlichen Hydrophonen und dem Recorder erfolgte über abgeschirmte Signalkabel, die über eine wasserdichte Durchführung aus dem Wasser herausgeführt wurden. Die Stromversorgung des Geräts erfolgte über Akkubetrieb, wodurch eine netz-unabhängige Nutzung möglich war [29].

Die Kombination aus AS-1 Hydrophonen und Zoom F6 Recorder stellt eine kosteneffiziente und gleichzeitig leistungsstarke Lösung für mehrkanalige Unterwasseraufzeichnungen dar. Insbesondere im Kontext dieser Bachelorarbeit – bei der das Ziel in der Entwicklung eines Low-Cost-3D-Hydrophon-Arrays lag – ermöglicht diese Messtechnik eine hohe zeitliche Auflösung, stabile Signalqualität und einfache Handhabung, ohne auf professionelle Funktionen verzichten zu müssen.

6 Messung und Ergebnisse

6.1 Durchführung der Messungen

Am 22. Mai 2025 wurde die erste Messreihe im Rahmen dieses Projekts in einem runden Planschbecken durchgeführt. Die Vorbereitungen begannen bereits am Vortag, um die Versuchsdurchführung systematisch und reproduzierbar zu gestalten. Zur Orientierung wurden Markierungen am Beckenrand im Abstand von jeweils 45° angebracht (0° bis 360°), um die exakte Positionierung der Schallquelle zu gewährleisten (vgl. Abbildung 6.1).

Für die Erzeugung des Schallsignals wurde ein Lautsprecher in einem Zipper Mehrzweckbeutel luftdicht versiegelt, um diesen wasserfest zu machen. Anschließend wurde der Beutel am unteren Ende einer vertikalen Stange mithilfe von Klebeband fixiert, so dass der Lautsprecher bei jeder Messung sicher und stabil im Wasser positioniert werden konnte.

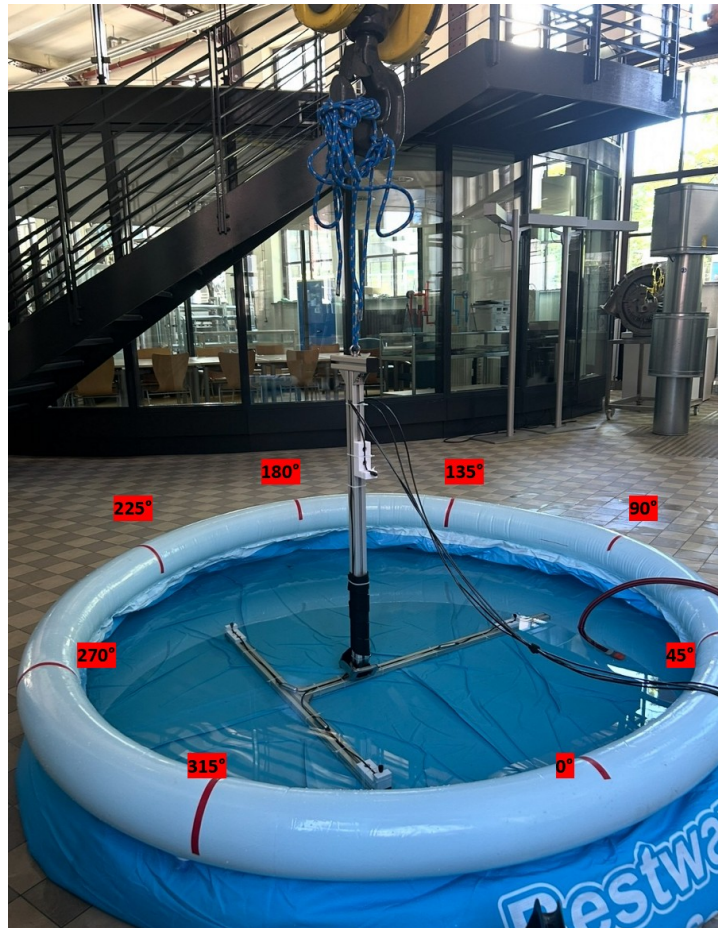


Abbildung 6.1: Hydrophon-Array in Planschbecken befestigt mit Deckenkran

Am Tag der Messung wurde das Becken vollständig mit Wasser befüllt. Das zuvor montierte tetraedrische Hydrophon-Array wurde mit einem Polypropylenseil an einem Deckenkran befestigt. Mittels Fernbedienung wurde die Konstruktion kontrolliert abgesenkt, bis sich das Array in einer Tiefe von etwa 100 mm über dem Beckenboden befand. Eine stabile Positionierung wurde durch die vorherige Tarierung mit Bleigewichten sichergestellt.

Der Zoom F6 Field Recorder wurde außerhalb des Beckens platziert und diente zur simultanen Erfassung der vier Hydrophoneingänge. Dabei wurde streng auf die korrekte Kanalzuordnung geachtet – das erste Hydrophon war mit dem ersten Eingang (Kanal 1) des Zoom F6 verbunden, das zweite mit dem zweiten usw. – um spätere Signalverarbeitungen nicht zu verfälschen. Die Stromversorgung erfolgte netzunabhängig über eine Powerbank.

Die Messungen wurden an insgesamt acht definierten Positionen der Schallquelle durchgeführt: 0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° und 315° . Dabei wurde der Lautsprecher jeweils in das Wasser getaucht und an der entsprechenden Position fixiert. Die zu übertragenden Testsignale – bestehend aus sinusförmigen Tönen verschiedener Frequenzen – waren im Vorfeld auf einer SD-Karte gespeichert und wurden automatisch vom Lautsprecher abgespielt.

Der gesamte Ablauf – Positionierung, Signalausgabe und Aufzeichnung – wurde pro Position fünfmal wiederholt: dreimal mit unterschiedlichen Sinustonfrequenzen (für spätere Frequenzanalyse) und zweimal mit zufällig ausgewählter Musik zur Simulation realer akustischer Szenarien. Nach jeder vollständigen Aufzeichnung wurde die SD-Karte aus dem Zoom F6 entnommen und die Datei in Audacity überprüft, um sicherzustellen, dass die Aufnahme erfolgreich war.

Abschließend wurde das Wasser aus dem Planschbecken mithilfe einer Tauchpumpe entfernt und das Hydrophon-Array wurde vorsichtig aus dem Planschbecken gehoben und getrocknet.



Abbildung 6.2: Hydrophon-Array mit Lautsprecher

6.2 Auswertung und Analyse der ersten Messreihe: Frequenzanalyse und Systemverhalten

Im Rahmen der ersten Auswertung wurde überprüft, ob die über das Lautsprechersystem eingespeisten sinusförmigen Testsignale korrekt von allen vier Hydrophonen aufge-

zeichnet wurden. Ziel war es, die dominante Frequenz in jedem Kanal in fest definierten Zeitfenstern zu identifizieren und mit den jeweiligen Sollfrequenzen zu vergleichen.

Methodik

Für die Analyse wurde eine WAV-Datei verwendet, die simultane Aufnahmen aller vier Hydrophone enthält. Die Datei wurde mit einer Abtastrate von 48kHz aufgenommen. Mithilfe eines MATLAB-Skripts wurde das Signal in zeitlich gleichlange Intervalle von jeweils 5 Sekunden unterteilt.

Für jedes Intervall und jeden der vier Kanäle wurde die dominante Frequenz mithilfe der Fast-Fourier-Transformation (FFT) bestimmt. Dabei wurde pro Zeitfenster jeweils das Frequenzmaximum aus dem Spektrum extrahiert, um die stärkste Frequenzkomponente zu identifizieren. Zusätzlich wurde ein Spektrogramm berechnet, um die zeitliche Entwicklung des Frequenzspektrums sichtbar zu machen und die Zuverlässigkeit der berechneten Dominantfrequenzen zu überprüfen.

Der zugehörige MATLAB-Code lautet:

```

1 % Load the WAV file with 4 channels
2 [data, fs] = audioread('250522_009.WAV');
3 max_time = 50;
4 max_samples = fs * max_time;      data = data(1:max_samples, :);
5 window_duration = 5;
6 samples_per_window = fs * window_duration;
7 num_windows = floor(size(data, 1) / samples_per_window);
8
9 % Loop over all 4 channels
10 for ch = 1:4
11     fprintf('\nChannel %d analysis:\n', ch);
12
13     signal = data(:, ch);
14     dominant_freqs = zeros(1, num_windows);
15
16     for i = 1:num_windows
17         segment = signal((i-1)*samples_per_window + 1 : i*
18             samples_per_window);
19
20         % FFT
21         N = length(segment);
22         fft_result = fft(segment);
23         mag = abs(fft_result(1:floor(N/2)));
24         f = (0:floor(N/2)-1) * fs / N;
25
26         [~, max_index] = max(mag);
27         dominant_freqs(i) = f(max_index);
28
29         fprintf(' Time %2d - %2d s: Dominant frequency    %.1f
30             Hz\n', ...
31                 (i-1)*window_duration, i*window_duration,
32                 dominant_freqs(i));
33     end
34 % Subplot f r Kanal ch
35 subplot(2, 2, ch);
36 time_axis = (0:num_windows-1) * window_duration;
37 stem(time_axis, dominant_freqs, 'filled');
```

```

35     title(sprintf('Channel %d', ch));
36     xlabel('Zeit (s)');
37     ylabel('Dominant Freq (Hz)');
38     grid on;
39 end
40
41 sgtitle('Dominante Frequenzen im Zeitverlauf fuer alle Kanale ');
42
43 % Spektrogramm plotten
44 figure;
45
46 for ch = 1:4
47     subplot(2,2,ch);
48     spectrogram(data(:,ch), hamming(1024), 512, 1024, fs, 'yaxis')
49     ;
50     title(sprintf('Kanal %d', ch));
51     xlabel('Zeit (s)');
52     ylabel('Frequenz (kHz)');
53
54     % Farbleiste speichern und korrekt beschriften
55     cb = colorbar;
56     ylabel(cb, 'Leistungsdichte (dB/Hz)');
57 end
58 sgtitle('Spektrogramme aller Kanale');

```

Ergebnisse der Frequenzanalyse

Die folgende Tabelle zeigt die gemessenen dominanten Frequenzen pro Kanal im Vergleich zur Sollfrequenz:

Tabelle 6.1: Vergleich der gemessenen dominanten Frequenzen mit den Sollfrequenzen

Zeit (s)	Sollfrequenz (Hz)	Kanal 1 (Hz)	Kanal 2 (Hz)	Kanal 3 (Hz)	Kanal 4 (Hz)
0–5	0	13541,4	3,4	3,4	3,4
5–10	0	14135,4	5,4	4,4	4,4
10–15	10	150	50	150	150
15–20	50	100	100	100	100
20–25	100	500,2	500,2	500,2	500,2
25–30	500	500,2	500,2	500,2	500,2
30–35	1000	1000,4	1000,4	1000,4	1000,4
35–40	5000	10003,8	10004	10004	4,4
40–45	10000	15005,8	3,4	3,4	4,4
45–50	15000	15005,8	3,4	3,4	3,4

Bewertung der Messergebnisse

Die Frequenzanalyse ergab ein differenziertes Bild über die Qualität der Signalaufzeichnung des Hydrophon-Arrays. Die folgende Bewertung bezieht sich auf die gemessenen dominanten Frequenzen in den vier Kanälen im Vergleich zu den eingespeisten Sollfrequenzen (siehe Tabelle 6.1).

In den ersten beiden Zeitfenstern (0–5s und 5–10s), in denen keine Frequenz eingespeist wurde (Sollfrequenz = 0Hz), zeigte das FFT-Maximum in Kanal1 auffällig hohe Werte von über 13kHz bzw. 14kHz. Diese wurden zunächst fälschlich als dominante Frequenzen interpretiert. Die ergänzende Analyse der Spektrogramme zeigte jedoch, dass in diesem Bereich keine stabilen oder kontinuierlichen Signalkomponenten vorhanden waren (siehe Abbildung 6.3). Es deuten vielmehr auf Umgebungsgeräusche, digitale Störungen oder Reflexionen (z.B. vom Beckenrand) hin. Die übrigen drei Kanäle zeigten im gleichen Zeitraum lediglich vernachlässigbare Störwerte im Bereich weniger Hertz – typisch für normales Hintergrundrauschen, wie auch im Spektrogramm sichtbar.

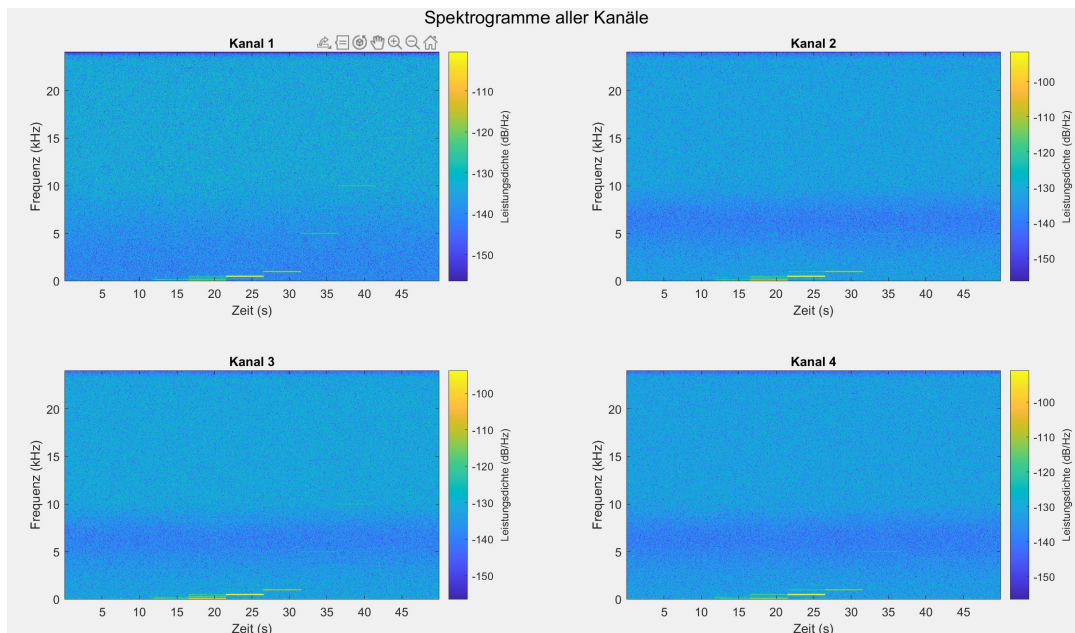


Abbildung 6.3: Spektrogramme alle 4 Kanäle

Im Frequenzbereich zwischen 10Hz und 100Hz traten ebenfalls deutliche Abweichungen von den Sollwerten auf. Das FFT-Maximum zeigte hier ungenaue oder inkonsistent verteilte Frequenzen. Auch die Spektrogramme wiesen in diesem Abschnitt keine klaren oder stabilen Frequenzbänder auf. Erst im Bereich von 500Hz bis 1000Hz verbesserte sich das Verhalten deutlich: Alle vier Kanäle zeigten konsistente, stabile und korrekt platzierte Dominantfrequenzen. Diese Frequenzen waren sowohl im FFT-Maximum als auch im Spektrogramm als kontinuierliche Bänder sichtbar, was auf eine zuverlässige Signalverarbeitung im mittleren Frequenzbereich hinweist.

Bei einer Eingabefrequenz von 5000Hz traten erneut deutliche Abweichungen im FFT-Maximum auf. In allen vier Kanälen wurde irrtümlich ein Wert von etwa 10003,8Hz als dominierende Frequenz erkannt. Die Spektrogramme zeigten hingegen ein stabiles Frequenzband bei etwa 5000Hz im Zeitraum von ca. 32s bis 36s – genau entsprechend der Sollfrequenz. Dies unterstreicht die Bedeutung der Spektrogramm-Auswertung für

die realistische Bewertung der Signalqualität, da die reine Maximum-Erkennung aus der FFT in diesem Fall falsche Ergebnisse lieferte.

Für die Eingabefrequenzen 10000Hz und 15000Hz zeigte Kanal1 im FFT-Maximum einen Wert von 15005,8Hz. Im Spektrogramm war jedoch kein entsprechendes Frequenzband zu erkennen, was auf eine fehlerhafte Erkennung hindeutet. Die Kanäle 2, 3 und 4 zeigten in diesem Hochfrequenzbereich weder im FFT-Maximum noch im Spektrogramm nennenswerte Signale. Dies weist auf eine eingeschränkte Detektionsfähigkeit dieser Kanäle im oberen Frequenzspektrum hin.

Ein möglicher Grund für das auffällige Verhalten von Kanal4 ab etwa 5000Hz könnte in Aliasing-Effekten oder darin liegen, dass das zugehörige Hydrophon während der Messung nicht vollständig im Wasser eingetaucht war – obwohl es technisch korrekt mit dem Zoom F6 verbunden war. Die schwache Reaktion der Kanäle 2 und 3 bei höheren Frequenzen könnte auf Wellenreflexionen, Signalabsorption oder ebenfalls auf Aliasing zurückzuführen sein.

6.3 Auswertung und Analyse der zweiten Messreihe: Richtungsbestimmung bei Position 90°

Ziel dieser Auswertung war es, die Lokalisierungsgenauigkeit der entwickelten Anordnung bei einer fest definierten Schallquellenposition (90°) in Abhängigkeit von der Frequenz und der Anzahl aktiver Kanäle zu untersuchen. Insbesondere sollte überprüft werden, welchen Einfluss der Ausfall eines Kanals – konkret des vierten Hydrophons – auf die Richtungsbestimmung (Azimut und Elevation) und die geschätzte Quellposition hat.

Methodik

Die Auswertung wurde mithilfe eines Python-Skripts durchgeführt, das folgende Schritte umfasste:

- **Einlesen der WAV-Dateien:** Für jede Messung wurde eine separate Datei geladen, die ein 4-Kanal-Audiosignal enthält.
- **Vorverarbeitung durch Bandpassfilter:** Die Signale wurden durch einen Butterworth-Bandpassfilter 6. Ordnung gefiltert. Der Filter lässt nur Frequenzen im Bereich zwischen einem einstellbaren Lowcut- und Highcut-Wert passieren, um Störgeräusche und Gleichanteile zu unterdrücken.
- **Berechnung der Zeitdifferenzen (TDOA):** Für jedes Kanalpaar wurde die Zeitdifferenz der Signalankunft berechnet. Dies erfolgte durch Kreuzkorrelation zwischen den gefilterten Signalen.
- **Hyperboloid-Schnittpunktberechnung:** Die geschätzten TDOA-Werte wurden verwendet, um die Position der Schallquelle im Raum zu berechnen. Die Methode basiert auf einem nichtlinearen Least-Squares-Verfahren [26], bei dem die Differenz zwischen gemessenen und theoretischen TDOAs minimiert wird. Zusätzlich wurde eine Soft Constraint eingeführt, um unphysikalische Lösungen außerhalb eines 2m-Radius vom Array-Zentrum zu vermeiden.

- **Berechnung von Azimut und Elevation:** Aus der resultierenden 3D-Position der Quelle wurden anschließend der Azimut sowie der Elevation relativ zum Mittelpunkt des Hydrophon-Arrays bestimmt.

Der relevante Python-Code lautet:

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy.optimize import least_squares
4 from scipy.io import wavfile
5 from scipy.signal import butter, filtfilt, correlate
6 from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
7
8 # === Parameters ===
9 WAV_FILE="C:/Users/ahmad/Desktop/python for BA/250522-015_45.wav"
10 LOWCUT = 100
11 HIGHCUT = 15000
12 C = 1500 # Speed of sound in water
13 # === Load WAV ===
14 fs, signal = wavfile.read(WAV_FILE)
15 signal = signal.astype(float)
16
17 # === Bandpass Filter ===
18 def butter_bandpass(lowcut, highcut, fs, order=6):
19     nyq = 0.5 * fs
20     return butter(order, [lowcut / nyq, highcut / nyq], btype='
    band')
21 def bandpass_filter(data, lowcut, highcut, fs):
22     b, a = butter_bandpass(lowcut, highcut, fs)
23     return filtfilt(b, a, data, axis=0)
24
25 signal_filtered = bandpass_filter(signal, LOWCUT, HIGHCUT, fs)
26
27 # === TDOA (Cross-correlation) ===
28 pairs = [(0,1), (0,2), (0,3), (1,2), (1,3), (2,3)]
29
30 tdoa_seconds = []
31 max_lag_samples = int(round(1 / 1500 * fs))
32
33 for (ch1, ch2) in pairs:
34     x = signal_filtered[:, ch2]
35     y = signal_filtered[:, ch1]
36     corr = correlate(x, y, mode='full')
37     lags = np.arange(-len(x) + 1, len(x))
38     center = len(corr) // 2
39     corr_window = corr[center - max_lag_samples : center +
        max_lag_samples + 1]
40     lags_window = lags[center - max_lag_samples : center +
        max_lag_samples + 1]
41     lag_peak = lags_window[np.argmax(np.abs(corr_window))]
42     tdoa_seconds.append(lag_peak / fs)
43
44 tdoa_seconds = np.array(tdoa_seconds)
45 # === Hydrophone Positions ===
46 H = np.array([
47     [1.000, 0.000, 0.000],
48     [0.000, 0.000, 0.000],
49     [0.500, 0.86603, 0.000],

```

```

50     [0.500, 0.28868, 0.8165]
51 ])
52
53 localization_pairs = [(1,0), (2,0), (3,0), (2,1), (3,1), (3,2)]
54
55
56 # === Hyperboloid Residuals with Soft Constraint ===
57 def residuals_soft_constrained(s, H, pairs, tdoa, c):
58     res = []
59     for i, (a, b) in enumerate(pairs):
60         d_a = np.linalg.norm(s - H[a])
61         d_b = np.linalg.norm(s - H[b])
62         res.append((d_a - d_b) - tdoa[i] * c)
63     # Soft constraint to keep source near array center
64     center = np.mean(H, axis=0)
65     dist = np.linalg.norm(s - center)
66     if dist > 2.0:
67         res.append((dist - 2.0) * 10)
68     return res
69
70 # === Solve with least_squares (Soft Constrained) ===
71 init_guess = np.mean(H, axis=0)
72 res = least_squares(residuals_soft_constrained, init_guess, args=(
73     H, localization_pairs, tdoa_seconds, C))
74 source_pos = res.x
75 print("\n=== Hyperboloid Method (Soft Constrained) ===")
76 print(f"Estimated source position: {source_pos}")
77
78 # === Azimuth and Elevation ===
79 center = np.mean(H, axis=0)
80 vec = source_pos - center
81
82 azimuth = np.degrees(np.arctan2(vec[1], vec[0]))
83 if azimuth < 0:
84     azimuth += 360
85
86 elevation = np.degrees(np.arctan2(vec[2], np.linalg.norm(vec[:2])))
87
88 print(f"Azimuth ( ): {azimuth:.2f} ")
89 print(f"Elevation ( ): {elevation:.2f} ")
90
91 # === Plot ===
92 fig = plt.figure(figsize=(10, 8))
93 ax = fig.add_subplot(111, projection='3d')
94 ax.scatter(H[:,0], H[:,1], H[:,2], c='blue', label='Hydrophones')
95 for i in range(H.shape[0]):
96     ax.text(*H[i], f'H{i+1}', color='blue')
97 ax.scatter(*source_pos, c='red', s=80, label='Estimated Source')
98 ax.text(*source_pos, 'Source', color='red')
99
100 # === Plot Hyperboloid Isosurfaces using scatter ===
101 def plot_hyperboloid_scatter(ax, H, a, b, tdoa, c, color):
102     x = np.linspace(-0.5, 1.2, 40)
103     y = np.linspace(-0.5, 1.2, 40)
104     z = np.linspace(-0.5, 1.2, 40)
105     X, Y, Z = np.meshgrid(x, y, z)
106     points = np.vstack((X.ravel(), Y.ravel(), Z.ravel())).T

```



```

106 Da = np.linalg.norm(points - H[a], axis=1)
107 Db = np.linalg.norm(points - H[b], axis=1)
108 diff = Da - Db
109 expected = tdoa * c
110 mask = np.abs(diff - expected) < 0.01 # Tolerance for level
    set
111 ax.scatter(points[mask, 0], points[mask, 1], points[mask, 2],
    s=3, alpha=1, color=color, label=f'H{a+1}-H{b+1}
    Hyperboloid')
112
113 plot_hyperboloid_scatter(ax, H, 1, 0, tdoa_seconds[0], C, 'green')
    # H2-H1
114 plot_hyperboloid_scatter(ax, H, 2, 0, tdoa_seconds[1], C, 'magenta
    ') # H3-H1
115 plot_hyperboloid_scatter(ax, H, 3, 0, tdoa_seconds[2], C, 'orange'
    ) # H4-H1
116
117 ax.set_xlabel('X [m]')
118 ax.set_ylabel('Y [m]')
119 ax.set_zlabel('Z [m]')
120 ax.set_title('Hyperboloid Intersection Localization (Soft
    Constrained)')
121 ax.legend()
122 plt.tight_layout()
123 plt.show()

```

Ergebnisse – Lokalisierung mit allen vier Kanälen

Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Werte für alle zehn Frequenzfenster (je 5 Sekunden lang). Verwendet wurden alle vier Kanäle:

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Richtungsbestimmung mit allen vier Kanälen

Zeit (s)	Soll-Frequenz (Hz)	Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
0–5	0	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,20)	1–15000
5–10	0	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,20)	1–15000
10–15	10	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,204)	1–153
15–20	50	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,204)	1–103
20–25	100	90°	-0,02°	(0,5 / 0,54 / -7,9e-5)	497–506
25–30	500	90°	0°	(0,5 / 0,87 / -2,5e-5)	496–503
30–35	1000	98,03°	60,65°	(0,48 / 0,49 / 0,44)	999–1020
35–40	5000	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,204)	2–10015
40–45	10000	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,204)	2–15015
45–50	15000	90°	41,87°	(0,5 / 0,29 / 0,204)	2–15015

Ergebnisse – Lokalisierung ohne Kanal 4

Bei dieser Analyse wurde der vierte Kanal ausgeschlossen, da bekannt war, dass das vierte Hydrophon während der Messung nicht im Wasser lag. Die Lokalisierung basierte somit nur auf den Kanälen 1, 2 und 3:

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Richtungsbestimmung ohne Kanal 4

Zeit (s)	Soll-Frequenz (Hz)	Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
0–5	0	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	1–15000
5–10	0	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	1–15000
10–15	10	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	1–153
15–20	50	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	1–103
20–25	100	90°	0°	(0,5 / 0,54 / 1,87e-09)	497–506
25–30	500	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	496–503
30–35	1000	97,47°	53,73°	(0,49 / 0,392 / 0,142)	999–1020
35–40	5000	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	2–10015
40–45	10000	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	2–15015
45–50	15000	90°	0°	(0,5 / 0,29 / -1,62e-15)	2–15015

Bewertung der Messergebnisse

Obwohl in den ersten beiden Zeitfenstern (0–5s und 5–10s) keine Schallfrequenz eingespeist wurde (Sollfrequenz = 0Hz), ermittelten die TDOA-Berechnungen in beiden Fällen einen konstanten Azimut von 90°. Diese Beobachtung ist insofern bemerkenswert, als die Auswertung trotz fehlenden Nutzsignals eine Richtung berechnete – was möglicherweise auf systematisches Hintergrundrauschen, digitale Artefakte oder Signalreste von Störquellen zurückzuführen ist. Dies zeigt, dass das Verfahren selbst unter schlechten Signalbedingungen eine stabile Richtungsschätzung liefert, wobei die physikalische Aussagekraft solcher Ergebnisse hinterfragt werden muss.

Über den gesamten Frequenzbereich hinweg konnte das System – unabhängig davon, ob der vierte Kanal verwendet wurde oder nicht – konstant einen Azimut von 90° rekonstruieren. Nur bei 1000Hz trat eine geringe Abweichung auf (98.03° mit vier Kanälen und 97.47° ohne Kanal 4). Dies deutet darauf hin, dass die Azimut robust auch mit nur drei Kanälen geschätzt werden kann.

Die Ergebnisse für die Elevation sowie die geschätzte Quellposition waren hingegen in beiden Analysen unzureichend genau. Sowohl bei der Auswertung mit allen vier Kanälen als auch ohne den vierten Kanal wurden in den meisten Fällen unrealistische Werte ermittelt – insbesondere bei sehr tiefen oder sehr hohen Frequenzen. Dies weist darauf hin, dass das TDOA-Verfahren in dieser Messkonfiguration durch ein ungenügendes Signal-Rausch-Verhältnis, fehlerhafte Eintauchung einzelner Sensoren und ungenaue Position der Hydrophon-Array beeinträchtigt war.

Auffällig ist, dass der Ausfall eines physikalisch wirksamen Kanals – nämlich des vierten Hydrophonkanals, der während der Messung nicht im Wasser war – keine relevante

Verschlechterung der Azimutberechnung verursachte. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass dieser Kanal zwar elektrisch angeschlossen war, aber keine gültigen akustischen Signale lieferte und daher als statisch wirkender Kanal behandelt wurde.

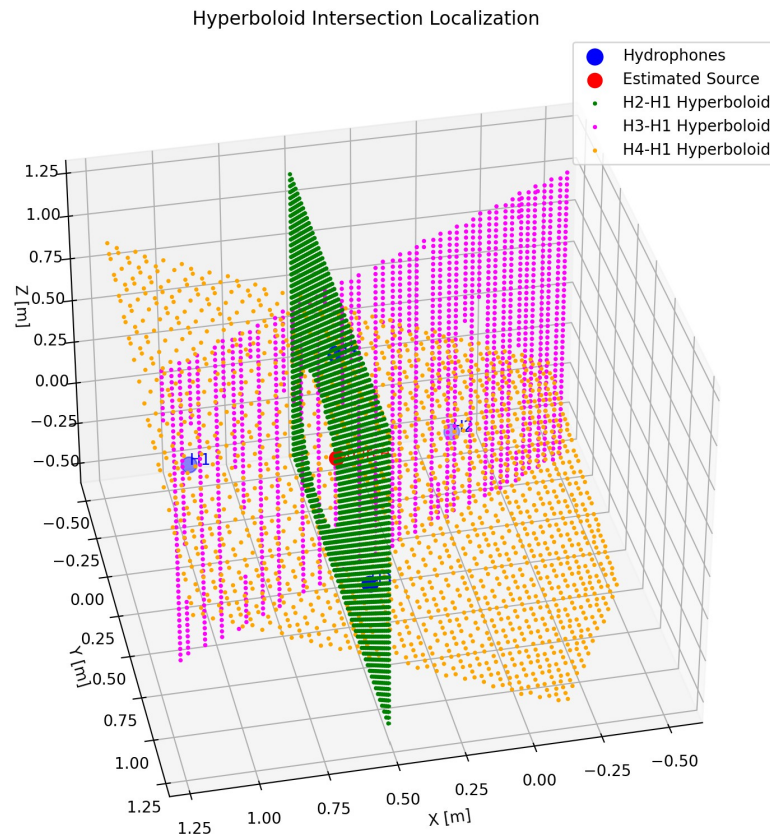


Abbildung 6.4: Lokalisierung von Hyperboloid-Schnittpunkten bei 500 Hz mit allen vier Kanälen

6.4 Auswertung und Analyse der dritten Messreihe: Richtungsbestimmung bei Position 135° und 270°

Ziel dieser Auswertung war es, die Richtungsbestimmung der entwickelten Anordnung bei zwei fest definierten Schallquellenpositionen – 270° und 135° – zu analysieren. Die Messung erfolgte erneut mithilfe von Sinuston-Testsignalen, welche an den entsprechenden Positionen im Becken abgespielt wurden. Zur Berechnung der Schallquellenposition wurde wie in den vorherigen Auswertungen der bekannte Python-Code mit der nichtlinearen Least-Squares-Verfahren verwendet. Die Wahl der Position 270° erfolgte bewusst, um zu überprüfen, ob ähnliche Lokalisierungsergebnisse wie bei der bereits getesteten Position 90° erzielt werden können – insbesondere da das Array entlang der X-Achse symmetrisch aufgebaut ist. Die Position 135° wurde zusätzlich als asymmetrischer, zufällig gewählter Testwinkel eingeführt, um das Verhalten des Systems bei weniger idealen Geometrien zu untersuchen.

Ergebnisse – Lokalisierung mit allen vier Kanälen

Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Werte für Azimuth bei der jeweilige Frequenz. Verwendet wurden alle vier Kanäle:

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Richtungsbestimmung mit allen vier Kanälen

Soll-Azimuth	Soll-Frequenz (Hz)	Ist-Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
270°	500	280,35°	14,30°	(0,56 / -0,061 / 0,29)	300–1850
270°	1000	297,5°	-8,32°	(0,66 / -0,02 / 0,15)	980–11500
135°	1000	155,52°	0°	(0,12 / 0,47 / 0,33)	950–1500

Ergebnisse – Lokalisierung ohne Kanal 4

Bei dieser Analyse wurde der vierte Kanal ausgeschlossen, da bekannt war, dass das vierte Hydrophon während der Messung nicht im Wasser lag. Die Lokalisierung basierte somit nur auf den Kanälen 1, 2 und 3:

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Richtungsbestimmung ohne Kanal 4

Soll-Azimuth	Soll-Frequenz (Hz)	Ist-Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
270°	500	267,87°	-12,18°	(0,49 / 0,14 / -0,031)	300–1850
270°	1000	290°	10,58°	(0,65 / -0,11 / 0,08)	980–11500
135°	1000	119,53°	0°	(0,24 / 0,75 / -0,02)	950–1500

Bewertung der Messergebnisse

Die Auswertung zeigt, dass die Azimut-Berechnung bei 500Hz insgesamt bessere Ergebnisse geliefert hat als bei 1000Hz. In beiden Testpositionen (270° und 135°) lag der berechnete Azimut bei näher am jeweiligen Sollwert und die Abweichung lag bei etwa $\pm 15^\circ$. Dies deutet darauf hin, dass sich im verwendeten Setup insbesondere diese Frequenz gut für eine robuste Richtungsbestimmung eignet.

Bemerkenswert ist zudem, dass die Analyse mit nur drei Kanälen (ohne Kanal 4) in dieser Messreihe genauere Ergebnisse erzielte als die Auswertung mit allen vier Kanälen. Das lässt sich dadurch erklären, dass das vierte Hydrophon während der Messung nicht im Wasser eingetaucht war. Obwohl es elektrisch angeschlossen war, konnte es keine gültigen Signale aufnehmen und führte in der Auswertung mit vier Kanälen zu Störeinflüssen. Ohne diesen Kanal war die Berechnung stabiler und näher am erwarteten Ergebnis.

Die Ergebnisse für Elevation sowie die geschätzte Quellposition waren hingegen in beiden Varianten unzureichend genau. In den meisten Fällen wurden unrealistische Höhenwinkel oder Positionen geschätzt – sowohl mit als auch ohne den vierten Kanal. Dies bestätigt erneut, dass eine vollständige und funktionierende Vierkanal-Erfassung für eine verlässliche 3D-Lokalisierung unerlässlich ist.

Ein weiterer wichtiger Hinweis ist, dass die hier gezeigten Azimut-Ergebnisse nur unter Verwendung eines spezifisch eingestellten Bandpassfilters erzielt werden konnten. Bei anderen Filtereinstellungen war die Azimuth nicht realisierbar oder lieferte stark abweichende Werte. Dies unterstreicht die Bedeutung einer gezielten Frequenzbandwahl für die erfolgreiche TDOA-Auswertung.

6.5 Auswertung und Analyse der vierten Messreihe: Richtungsbestimmung mit Musiksignalen

Für diese Analyse wurde erneut das Python-basierte TDOA-Analyseverfahren mit der nichtlinearen Least-Squares-Verfahren eingesetzt. Im Unterschied zur vorangegangenen Testreihe mit Sinussignalen wurden dieses Mal Musiksignale verwendet, die von einem Lautsprecher an acht verschiedenen Positionen abgespielt wurden. Die zugehörigen WAV-Dateien waren bereits in 5-Sekunden-Intervalle unterteilt, wodurch sichergestellt war, dass jede Aufnahme einer klar definierten Lautsprecherposition zugeordnet werden konnte.

Ergebnisse – Lokalisierung mit allen vier Kanälen

Die folgende Tabelle zeigt die ermittelten Werte bei verschiedenen Winkelstellungen des Lautsprechers mit allen vier Kanälen

Tabelle 6.6: Richtungsbestimmung bei verschiedenen Winkelstellungen des Lautsprechers mit allen vier Kanälen

Winkel auf Planschbecken	Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
45°	20,12°	-61,75°	(0,61 / 0,33 / -0,02)	100–15000
90°	91,43°	34,55°	(0,49 / 0,55 / 0,38)	1000–10000
135°	119,43°	51,38°	(-0,11 / 1,38 / 1,77)	10–15000
180°	181,82°	11,78°	(0,19 / 0,28 / 0,27)	215–10000
225°	235,02°	-31,59°	(0,38 / 0,12 / 0,078)	1500–9000
270°	272,09°	-37,86°	(0,51 / 0,07 / 0,04)	1000–7500
315°	260,22°	-77,01°	(0,47 / 0,12 / -0,54)	1000–7500
360°	241,77°	-59,67°	(0,43 / 0,15 / -0,06)	1000–8000

Ergebnisse – Lokalisierung ohne Kanal 4

Bei dieser Analyse wurde der vierte Kanal ausgeschlossen, da bekannt war, dass das vierte Hydrophon während der Messung nicht im Wasser lag. Die Lokalisierung basierte somit nur auf den Kanälen 1, 2 und 3:

Tabelle 6.7: Richtungsbestimmung bei verschiedenen Winkelstellungen des Lautsprechers ohne Kanal 4

Winkel auf Planschbecken	Azimuth	Elevation	Position (x/y/z) (m)	Bandpass Filter (Hz)
45°	22,63°	-2,82°	(0,58 / 0,32 / -0,01)	100–15000
90°	125,34°	43,67°	(0,31 / 0,55 / 0,31)	1000–10000
135°	120,74°	0,00°	(-0,52 / 2,01 / 1,1e-5)	10–15000
180°	177,50°	-25,66°	(0,06 / 0,31 / -0,21)	215–10000
225°	244,35°	-0,74°	(0,5 / 0,12 / -0,03)	1500–9000
270°	297,40°	13,02°	(0,61 / 0,083 / 0,06)	1000–7500
315°	120,89°	5,24°	(0,48 / 0,32 / 0,003)	1000–7500
360°	310,48°	-71,02°	(0,572 / 0,204 / -0,324)	1000–8000

Bewertung der Messergebnisse

Die Lokalisierung erfolgte sowohl mit allen vier Kanälen als auch ohne den vierten Kanal, dessen zugehöriges Hydrophon – wie bereits zuvor – nicht im Wasser eingetaucht war. Die Position des Hydrophon-Arrays war dabei nicht exakt zentriert im Planschbecken, und auch die Winkelmarkierungen am Beckenrand wiesen Ungenauigkeiten auf. Diese systematischen Fehlerquellen hatten einen spürbaren Einfluss auf die Genauigkeit der Lokalisierungsergebnisse.

Alle Auswertungen wurden mit spezifischen Bandpass-Filtern durchgeführt, um relevante Frequenzbereiche der Musik gezielt zu isolieren. Es zeigte sich, dass nur bei sorgfältig gewählten Filterbereichen realistische Ergebnisse erzielt wurden. In den anderen Fällen war die Azimuth deutlich schlechter oder unbrauchbar, was die Bedeutung einer frequenzabhängigen Vorverarbeitung unterstreicht.

Trotz dieser Einschränkungen konnte das System bei bestimmten Positionen – insbesondere 90° und 270° – in beiden Auswertungen korrekte oder nahezu korrekte Azimutwerte liefern. Dies war sowohl mit als auch ohne vierten Kanal der Fall. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Genauigkeit darauf zurückzuführen ist, dass das Array symmetrisch entlang der X-Achse aufgebaut war und die Lautsprecherplatzierung an diesen Punkten exakt erfolgt ist.

In allen anderen Fällen lag die Azimutabweichung bei etwa $\pm 20^\circ$. Besonders bei der Auswertung ohne Kanal 4 war diese Streuung noch ausgeprägter. Dies bestätigt, dass bei asymmetrischen oder ungünstigen Positionierungen der Schallquelle die vollständige Kanalanzahl für eine stabile Richtungsbestimmung erforderlich ist.

Die Elevation sowie die berechnete 3D-Quellposition waren – wie bereits bei der Sinusanalyse – auch hier in beiden Varianten (mit und ohne vierten Kanal) fehlerhaft bzw. inkonsistent. Es wurden zum Teil physikalisch nicht plausible Höhenwerte berechnet oder Positionen geschätzt, die außerhalb des zu erwartenden Volumens lagen. Diese Abweichungen lassen sich durch die unvollständige Sensorabdeckung (fehlender vierter Kanal) sowie durch Reflexionen und die nicht-zentrierte Arrayplatzierung erklären.

6.6 Zusammenfassende Bewertung der Messergebnisse

Im Rahmen der durchgeführten Messreihen – sowohl mit synthetischen Sinustönen als auch mit Musiksignalen – konnte gezeigt werden, dass die Azimutbestimmung in vielen Fällen erfolgreich war. Besonders bei Testfrequenzen um 500 Hz und bei symmetrischen Positionen wie 90° oder 270° konnten die erwarteten Richtungen mit relativ geringer Abweichung ($\pm 10^\circ$ – 20°) ermittelt werden. Dies gilt selbst für Konfigurationen mit nur drei aktiven Kanälen, was darauf hindeutet, dass die horizontale Richtungsbestimmung (Azimut) robust gegenüber dem Ausfall eines einzelnen Sensors ist.

Die Elevation sowie die berechnete 3D-Position der Quelle waren hingegen in allen Messreihen unzuverlässig. Es traten deutliche Abweichungen und teils physikalisch nicht plausible Werte auf – sowohl mit als auch ohne den vierten Kanal. Diese Ungenauigkeit lässt sich auf mehrere systematische Fehlerquellen im Versuchsaufbau zurückführen:

- Das Hydrophon-Array war nicht exakt im Zentrum des Planschbeckens positioniert, was zu asymmetrischer Schallausbreitung und Verzerrung der TDOA-Werte führte.
- Die am Beckenrand angebrachten Winkelmarkierungen waren teilweise ungenau, was eine präzise Quellenplatzierung erschwerte.
- Das vierte Hydrophon befand sich während sämtlicher Messungen nicht im Wasser. Obwohl es elektrisch verbunden war, lieferte es keine verwertbaren akustischen Signale, was zu Störungen in den Auswertungen mit vier Kanälen führte.
- Bei der Signalquelle gab es einen Samplingrate-Konflikt: Die Sinustöne wurden mit einer Abtastrate von 44.1 kHz generiert, während die Aufzeichnung durch den Zoom F6 mit 48 kHz erfolgte. Diese Diskrepanz kann Aliasing, Timing-Verschiebungen und Frequenzverfälschungen verursachen – insbesondere bei hochfrequenten Signalen.

Hinzu kommt, dass realistische Azimut-Ergebnisse nur bei gezielt gewählten Bandpassfiltern erzielt werden konnten. In allen Auswertungen zeigte sich, dass ohne Frequenzfilterung keine stabile Richtungsbestimmung möglich war – vor allem bei komplexeren Musiksignalen. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer spektralen Vorverarbeitung, um nutzbare TDOA-Informationen zu extrahieren.

Fazit

Die Messergebnisse belegen, dass die entwickelten Methoden zur Azimutlokalisierung unter idealen Bedingungen zuverlässig funktionieren. Für eine präzise 3D-Schallquellenortung mit realistischer Höheninformation und Positionsangabe ist jedoch eine korrekte Geometrie, einwandfreie Sensorplatzierung und saubere Signalverarbeitung unerlässlich.

7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein kostengünstiges tetraedrischen Hydrophon-Array zur Richtungsbestimmung von Schallquellen im Wasser entwickelt und getestet. Das mechanische Gerüst wurde vollständig aus handelsüblichen Aluminiumprofilen aufgebaut und kostete insgesamt unter 150 €, während vergleichbare Systeme im Handel meist über 1000 € liegen. Erste Tests mit Sinustönen und Musiksignalen zeigten, dass der Azimut grundsätzlich bestimmbar ist – die Elevation und Position blieben jedoch ungenau.

Für zukünftige Arbeiten ergeben sich mehrere klare Verbesserungspotenziale:

- **Bessere Messumgebung:** Die Tests sollten in einem größeren Becken, z. B. einem Schwimmbad oder offenen Kanal, stattfinden, um Wandreflexionen zu reduzieren und realistischere Bedingungen zu schaffen.
- **Boje oder schwimmende Halterung:** Das Array könnte frei im Wasser aufgehängt werden z. B. an einer stabilen Boje, um zentriert und gleichmäßig tief zu liegen.
- **Kabelmanagement mit Seilrolle:** Eine einfache Seil- oder Kabelrolle hilft, die Hydrophonleitungen sicher, ordentlich und schnell handhabbar zu machen – besonders bei häufigem Auf- und Abbau.
- **Messstrategie optimieren:** Statt durchgehender Aufnahme wäre es sinnvoll, für jede Winkelposition eine eigene kurze Messung zu machen. Das erleichtert die spätere Auswertung enorm.
- **Signaltechnik verbessern:** Die Samplingrate der Testsignale sollte an den Recorder angepasst werden, um Zeitversatz und Frequenzfehler zu vermeiden.
- **Alternative Algorithmen nutzen:** Es wäre spannend, neben TDOA auch andere Verfahren wie *Beamforming* zu testen, um die Richtungsgenauigkeit zu verbessern.

Diese Arbeit hat gezeigt, dass ein günstiges und modulares tetraedrischen Hydrophon-Array technisch umsetzbar ist. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern eine gute Basis für weiterführende Arbeiten mit höherem Genauigkeitsanspruch und erweiterten Auswertungsverfahren.

Literaturverzeichnis

- [1] S. AI. „The Role of Underwater Acoustics Monitoring in Marine Conservation and Operations.“ (2025), Adresse: <https://sinay.ai/en/the-role-of-underwater-acoustics-monitoring-in-marine-conservation-and-operations/>.
- [2] W. Contributors. „Hydrophone.“ (2025), Adresse: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrophone>.
- [3] R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3. Aufl. McGraw-Hill, 1983, Classic reference on underwater acoustics, ISBN: 9780070660874.
- [4] R. P. Dziak, H. Matsumoto, T. K. Lau, K. M. Stafford und D. R. Bohnenstiehl, „Using Hydrophone Arrays to Monitor Marine Mammal Populations Off the Northern Washington Coast,“ *Oceanography*, Jg. 24, Nr. 3, S. 144–147, 2011. DOI: 10.5670/oceanog.2011.75. Adresse: https://tos.org/oceanography/assets/docs/24-3_dziak.pdf.
- [5] D. K. Mellinger und J. Barlow, „Future Directions for Acoustic Marine Mammal Surveys: Stock Assessment and Habitat Use,“ *NOAA OAR Special Report*, 2003, NOAA Report on the role of acoustics in marine mammal stock assessment. Adresse: <https://www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/mell2906/mell2906.pdf>.
- [6] PTC Inc., *PTC Creo 7*, <https://www.ptc.com/de/products/creo>, Version 7, 2020.
- [7] P. Murphy, „Title of the Thesis (Find the exact title in the document),“ Diss., University of Washington, Year of Publication. Adresse: https://depts.washington.edu/pmec/docs/murphy_paul_thesis.pdf.
- [8] N. P. L. (NPL). „The Underlying Physics of Sound in Seawater.“ (2025), Adresse: <http://resource.npl.co.uk/acoustics/techguides/soundseawater/underlying-phys.html>.
- [9] Wikipedia contributors. „Hydrophon – Wikipedia.“ German-language article on the function and use of hydrophones in underwater acoustics. (2024), Adresse: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrophon>.
- [10] „Hydrophone Applications in Sonar Systems.“ (2024), Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1879239124000365>.
- [11] Ocean Sonics. „An array of possibility: An introduction to multi-hydrophone deployments.“ Zugegriffen am 21. Juni 2025. (2024), Adresse: <https://oceansonics.com/an-array-of-possibility-an-introduction-to-multi-hydrophone-deployments/>.
- [12] M. Siderius, J. H. L. Hansen und H. Schmidt, „Localization of Small Surface Vessels Through Acoustic Data Fusion of Two Tetrahedral Arrays of Hydrophones,“ in *Proceedings of Meetings on Acoustics*, Bd. 25, 2015, S. 070 005. DOI: 10.1121/2.0000132. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/290654890_Localization_of_small_surface_vessels_through_acoustic_data_fusion_of_two_tetrahedral_arrays_of_hydrophones.

- [13] J. Haxel, H. Matsumoto, R. Dziak u. a., „PMEL Passive Acoustics Research: Quantifying the Ocean Soundscape from Whales to Wave Energy,“ *Oceanography*, Jg. 26, Nr. 2, S. 90–91, 2013. DOI: 10.5670/oceanog.2013.39. Adresse: <https://tos.org/oceanography/article/pmel-passive-acoustics-research-quantifying-the-ocean-soundscape-from-whales-to-wave-energy>.
- [14] J. Abel und M. Wood, „Pile Driving Acoustic Monitoring Using an Array,“ in *Proceedings of the Western Pacific Acoustics Conference (WESPAC)*, Conference paper presented at WESPAC 2015, Singapore, 2015. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/307856292_PILE_DRIVING_ACOUSTIC_MONITORING_USING_AN_ARRAY.
- [15] Y. Barkley, „Acoustic Tracking of Cetaceans for Visual Survey Support,“ NOAA Southwest Fisheries Science Center, Administrative Report SWFSC Admin. Rep. LJ-16-01, 2016. Adresse: <https://swfsc-publications.fisheries.noaa.gov/publications/CR/2016/2016Barkley.pdf>.
- [16] I. F. Akyildiz, P. Wang und Z. Sun, „Underwater Acoustic Sensor Networks: Channel Models and Network Coding Based Lower Bound Delay Analysis,“ *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Jg. 2013, Nr. 35, S. 1–12, 2013. DOI: 10.1186/1687-1499-2013-35. Adresse: <https://jwcn-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2013-35>.
- [17] NOAA Southeast Fisheries Science Center. „Passive Acoustic Technologies Used by the Southeast Fisheries Science Center.“ (2023), Adresse: <https://www.fisheries.noaa.gov/southeast/science-data/passive-acoustic-technologies-used-southeast-fisheries-science-center>.
- [18] A. Renaud und L. Cooperstock, „Real-Time Underwater Spatial Audio: A Feasibility Study,“ *ResearchGate*, 2018. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/325540533_Real-Time_Underwater_Spatial_Audio_A_Feasibility_Study.
- [19] T. Jung, L. Ehrig und A. Schilling, „3D Audio Recording of Complex Underwater Sound Fields,“ *ResearchGate*, 2023. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/384687411_3D_Audio_Recording_of_Complex_Underwater_Sound_Fields.
- [20] R. Hirotsu, T. Akamatsu, H. Ando, K. Sugimatsu, D. Kojima und H. Kato, „Classification of Sperm Whale Clicks and Triangulation for Real-Time Localization with SBL Arrays,“ *Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 127, Nr. 1, S. 124–132, 2010. DOI: 10.1121/1.3257594. Adresse: https://www.researchgate.net/publication/251882887_Classification_of_sperm_whale_clicks_and_triangulation_for_real-time_localization_with_SBL_arrays.
- [21] Wikipedia contributors. „Nyquist–Shannon sampling theorem.“ Accessed via Wikipedia. (2025), Adresse: https://en.wikipedia.org/wiki/Nyquist%E2%80%93Shannon_sampling_theorem.
- [22] H. Medwin und C. S. Clay, *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, 1998, ISBN: 9780124875708. Adresse: <https://senawiratama.wordpress.com/wp-content/uploads/2010/08/medwin-and-clay-fundamentals-of-acoustical-oceanography.pdf>.

- [23] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), „Multibeam Sonar Theory of Operation – Chapter 3: Introduction to Multibeam Sonar: Projector and Hydrophone Systems,“ NOAA Office of Coast Survey, Hydrographic Survey Division, Techn. Ber., 2003, Accessed from NOAA Hydrographic Survey Division. Adresse: <https://lismap.uconn.edu/wp-content/uploads/sites/2333/2018/11/SeaBeamMultibeamTheoryOperation.pdf>.
- [24] A. Unknown, „Real-Time Passive Underwater Localization Using a Compact Acoustic Sensor Array,“ *Computer Networks*, Jg. 235, S. 110 621, 2024, Accessed via ScienceDirect. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110621. Adresse: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128624004535>.
- [25] ScienceDirect Topics. „Cross-Correlation - Engineering Topics.“ Overview of cross-correlation techniques and applications in signal processing. (2024), Adresse: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/crosscorrelation>.
- [26] K. Dogancay und H. Hmam, „3D TDOA Emitter Localization Using Conic Approximation,“ *Sensors*, Jg. 23, Nr. 14, S. 6254, 2023. DOI: 10.3390/s23146254. Adresse: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/14/6254>.
- [27] Unacademy. „Analytical Geometry Three Dimensions: Distance Between Two Points.“ Accessed from Unacademy NDA Mathematics Study Material. (2024), Adresse: <https://unacademy.com/content/nda/study-material/mathematics/analytical-geometry-three-dimensions-distance-between-two-points/>.
- [28] Aquarian Scientific (Aquarian Audio), *AS-1 Hydrophone*, <https://www.aquarianaudio.com/as-1-hydrophone.html>, 2025.
- [29] Zoom Corporation. „Zoom F6 Support Page.“ Official support resources, manuals, and firmware updates for the Zoom F6 field recorder. (2024), Adresse: <https://zoomcorp.com/en/jp/field-recorders/field-recorders/f6/f6-support/>.

Anhang

Anhangsverzeichnis

A	Anhang: Hydrophon Array Zusammenbau Zeichnung	41
B	Anhang: Halter Zeichnung	42
C	Anhang: Einzelteilübersicht Zeichnung	43
D	Anhang: Hydrophon-AS1	44
E	Anhang: Stückliste	45
F	Anhang: Hydrophontestsound code	46

A Anhang: Hydrophon Array Zusammenbau Zeichnung

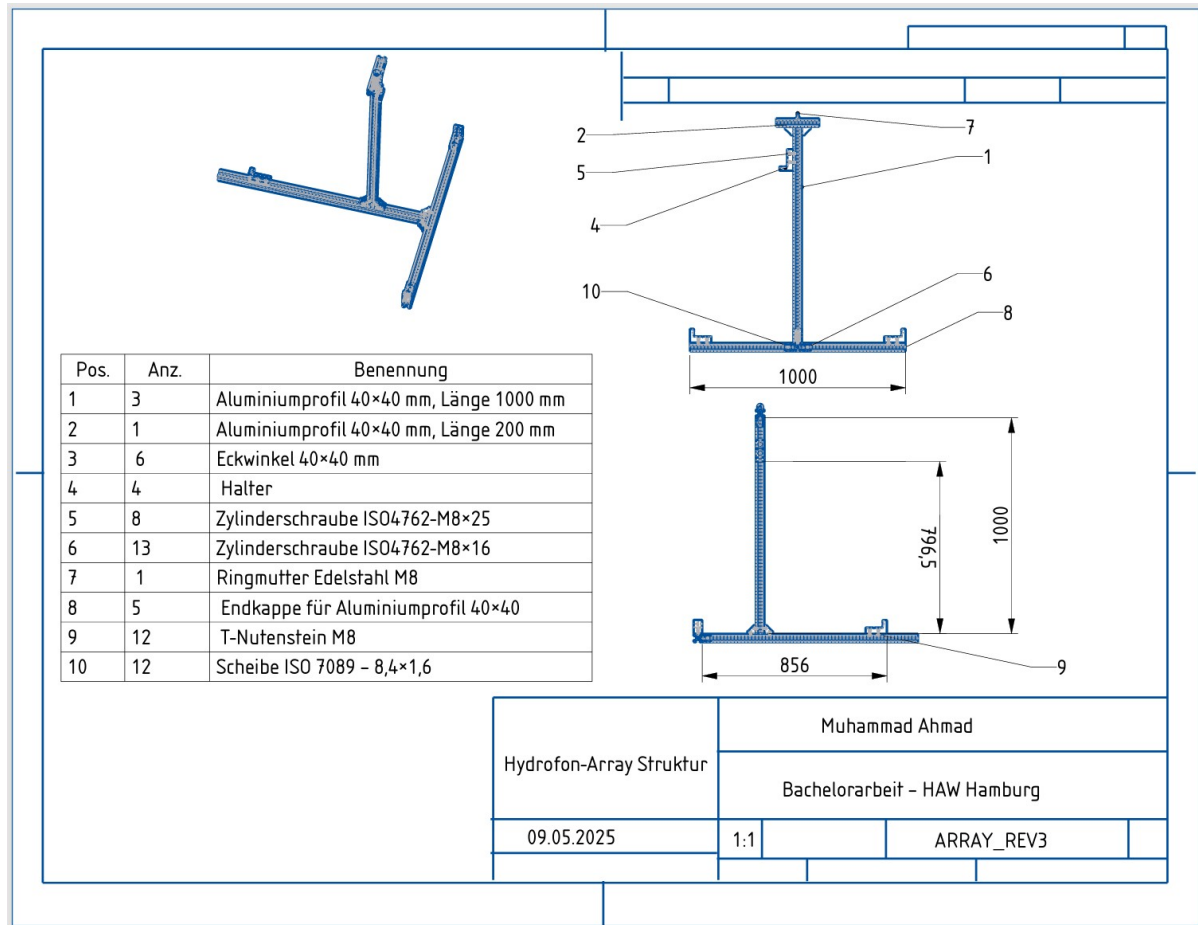


Abbildung A.1: Hydrophon-Array Zeichnung

B Anhang: Halter Zeichnung

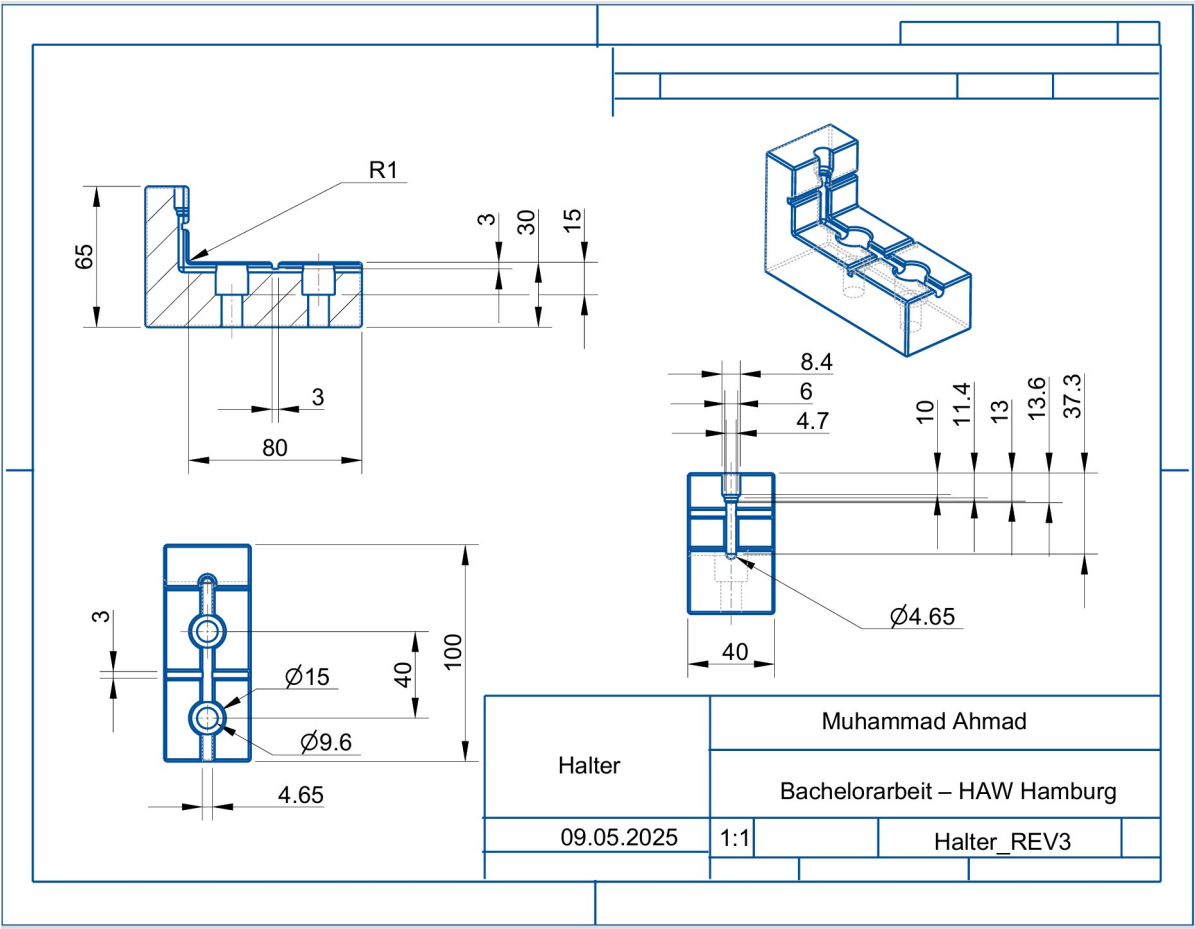


Abbildung B.1: Halter Zeichnung

C Anhang: Einzelteilübersicht Zeichnung

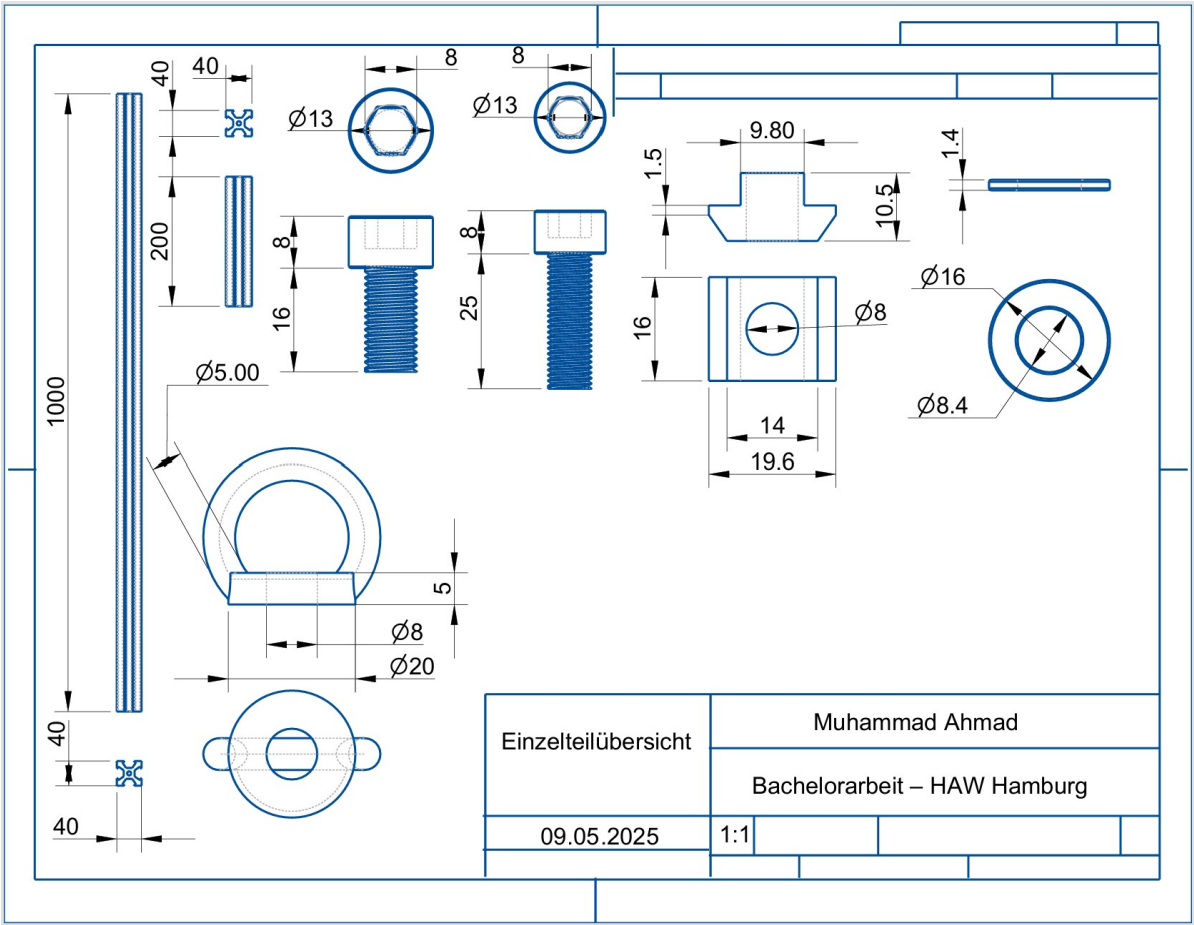


Abbildung C.1: Einzelteilübersicht Zeichnung

D Anhang: Hydrophon-AS1

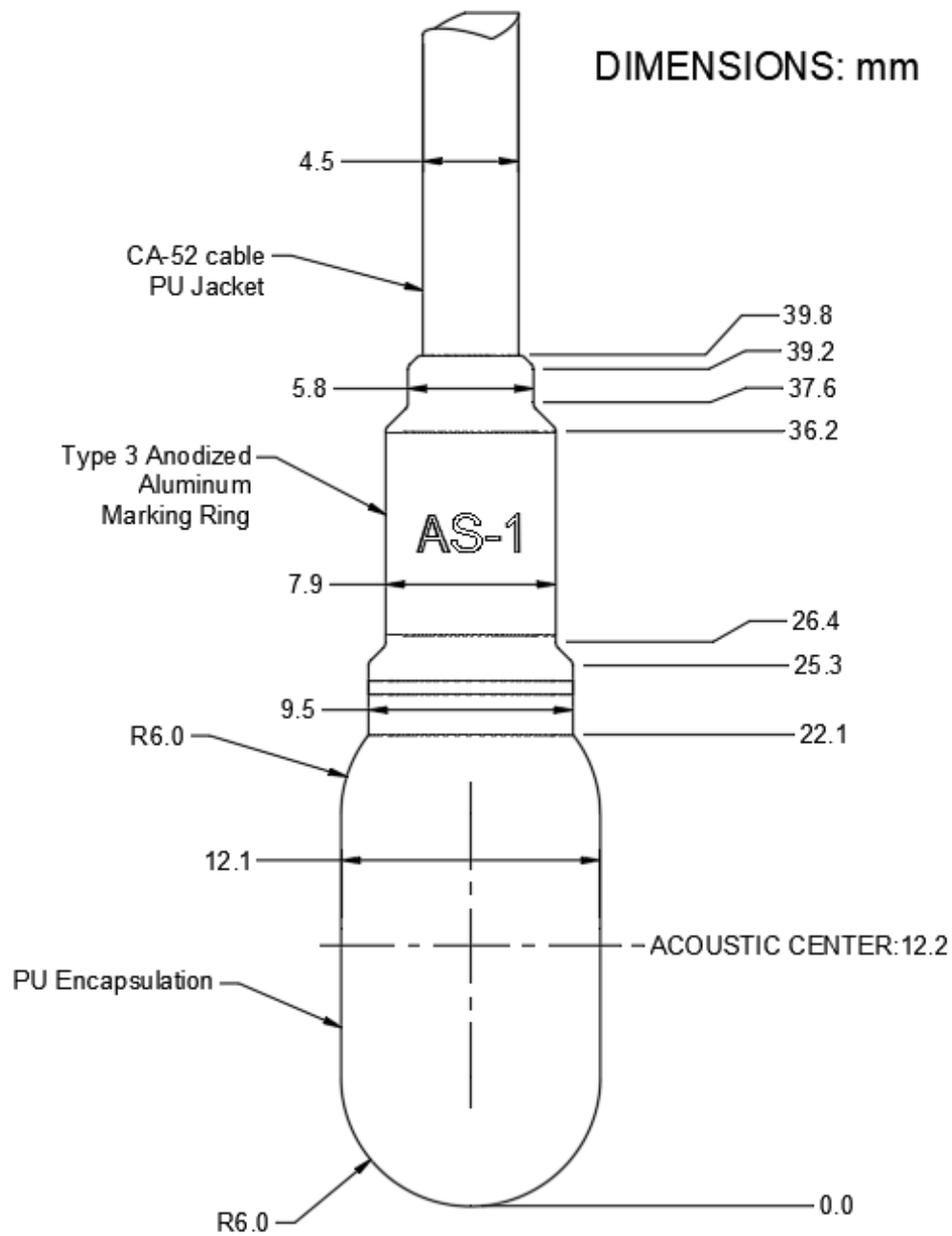


Abbildung D.1: Hydrophon-AS1. Bildquelle: [28]

E Anhang: Stückliste

Tabelle E.1: Materialliste für den Aufbau des Hydrofon-Arrays

Nr.	Material	Beschreibung	Anzahl	Bezugsquelle
1	Aluminiumprofil 40×40mm, 1000mm	Hauptträgerstruktur des Arrays	3	https://amzn.eu/ d/bJWucPF
2	Aluminiumprofil 40×40mm, 200mm	Obere Querstrebe zur Seilbefestigung	1	https://amzn.eu/ d/g1oGWca
3	Endkappe für Aluminiumprofil 40×40	Schutz der Profilenden	8	https://amzn.eu/ d/9PFHAFa
4	Eckverbinder 40×40mm	Inkl. Schrauben, Ham- mermuttern und T- Nutensteinen	6	https://amzn.eu/ d/94qMpgy
5	T-Nut Schraube M8×20mm + Mutter	Befestigung der Hydro- phonhalterungen	2	https://amzn.eu/ d/gVVNPzZ
6	Ringmuttern M8	Zur Befestigung des He- beseils	2	https://amzn.eu/ d/1yQGstg
7	Kabelbinder 3,6×250mm	Kabelführung entlang der Profile	20	https://amzn.eu/ d/gCEgrf1
8	Tauchbleigewicht roh, 1kg	Zur Tarierung des Arrays unter Wasser	2	https://bit.ly/ 4238F9T
9	Bleigewichtgürtel	Fixierung der Tauchge- wichte an der Unterseite	1	https://amzn.eu/ d/0IR0Ita
10	Polypropylenseil 10mm × 10m	Bootstau zur vertikalen Absenkung und Bergung	1	https://amzn.eu/ d/9TCs2BP

F Anhang: Hydrophontestsound code

```
1
2 function Hydrophontestsound()
3     % Zeitintervall von 0 bis 2 s
4     % t-Array mit S t tzpkt . im Abst. 1/10000 s
5     SR=44100;
6     t = [0 : 1/SR : 5];
7
8     f = [0,0,10,50,100,500,1000,5000,10000,15000]; % Frequenz 440 Hz
9     A = 1; % 1 als Maximalwert
10    phi = 0; % phi = 0 => sin-Funktion
11    y = [];
12    for i = 1:length(f)
13        % Array y mit Werten an den t- S t tzpkt .
14        ytemp = A * sin( 2 * pi * f(i) * t + phi );
15        y = [y,ytemp];
16    end
17
18    % Abspielen des Tons
19    % player=audioplayer(y, SR);
20    % player.playblocking();
21    % player.play()
22
23    % Schreiben einer wav-Datei
24    audiowrite( 'Hydrophontestsound.wav', y, SR);
25    audiowrite('Hydrophontestsound.ogg',y,SR)
26
27    % Ausgabe der Funktion als 2D-Plot
28    % plot( t, y );
29    % fester Ausgabebereich f r t und y
30    % axis( [0 1/100 -1.1 1.1] )
31
32 end
```

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „— bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] — ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: _____

Vorname: _____

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit – bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Aufbau eines Low-Cost-Hydrophon-Arrays

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Ort

Datum

Unterschrift im Original

Erklärung zur selbständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, Muhammad Ahmad, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Thema:

Aufbau eines Low-Cost-Hydrophon-Arrays

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original