

Projektarbeit

Entwicklung eines FreeRTOS-basierten Systems zur akustischen Entfernungsmessung im hörbaren Frequenzbereich

An der Fachhochschule Dortmund

im Fachbereich Informatik

Studiengang Technische Informatik

Autor/in

seifeddine Makhlouf

geboren am 20.01.2001

Matrikelnummer: 999999

Betreuung durch: Prof. Dr. Frank Künemund
Dipl.-Ing. Dieter Zumkehr

Version vom: Dortmund, 17. September 2025

Kurzfassung

Diese Arbeit entwickelt und evaluiert ein FreeRTOS-basiertes System zur akustischen Entfernungsmessung zwischen zwei ESP32-S3-Knoten für den *Außenbereich*. Ziel ist eine zuverlässige und kostengünstige Kurzstreckenmessung trotz Wind, Umgebungsgeräuschen und Mehrwegeeffekten. Zwei identische Knoten mit I²S-MEMS-Mikrofon und Lautsprecher tauschen hörbare Chirps im Ping-Pong-Verfahren aus; ein Funklink synchronisiert Startzeitpunkte und Zeitstempel. Zur Genauigkeitssteigerung kommen eine geeignete Chirp-Charakteristik im oberen Hörbereich, eine temperaturgestützte Schallgeschwindigkeitskorrektur, ein korrelationsbasiertes ToF-Verfahren mit Sub-Sample-Peak-Schätzung sowie eine einmalige Verzögerungskalibrierung zum Einsatz. Jitter wird durch ISR-Zeitstempel, I²S-DMA und kerngebundene, priorisierte FreeRTOS-Tasks reduziert. Feldtests im Freien bestätigen die Eignung hörfrequenzbasierter Audio-ToF-Messungen und bilden die Grundlage für robustere Mehrknotensysteme.

Abstract

This work develops and evaluates a FreeRTOS-based system for acoustic ranging between two ESP32-S3 nodes for *outdoor* use. The goal is reliable, low-cost short-range measurements despite wind, ambient noise, and multipath. Two identical nodes equipped with an I²S MEMS microphone and a loudspeaker exchange audible chirps in a ping-pong scheme; a radio link synchronizes start times and timestamps. To improve accuracy, the design employs a suitable chirp in the upper audible band, temperature-based speed-of-sound correction (on-board sensor), cross-correlation with sub-sample peak estimation, and a one-time delay calibration. Jitter is reduced through ISR-level timestamping, I²S DMA, and core-pinned, prioritized FreeRTOS tasks. Outdoor field tests confirm the suitability of audible-band audio ToF and provide a basis for more robust multi-node systems.

Erweitertes Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Abstract	III
Einleitung	1
3.1 Motivation	1
3.2 Zielsetzung	2
3.3 Aufbau der Arbeit	3
Grundlagen	4
4.1 Schallausbreitung im Außenraum	4
4.2 Signalgestaltung für akustische ToF-Verfahren	6
4.3 Korrelationsmethoden	8
4.4 Eigenschaften von ESP32-S3 und FreeRTOS	10
Anforderungen	12
5.1 Anwendungsszenarien	12
5.2 Funktionale Anforderungen	14
5.3 Nicht-funktionale Anforderungen	16
Hardware	18
6.1 Prototypenaufbau (Steckbrett)	18
6.2 Lautsprecher- und Mikrofonwahl	20
6.3 Funkmodulauswahl	22

6.6 Schaltplan (Schematik)	28
6.7 PCB-Layout	30
Software	28
7.1 FreeRTOS-Architektur	28
7.2 I ² S-DMA	29
7.3 Funkbasierte Synchronisation	30
7.4 Maßnahmen zur Jitterreduktion	31
Signaldesign	32
8.1 Chirp-Charakteristik, Fensterung und Bandbegrenzung	32
8.2 Vorverarbeitung	33
8.3 Korrelationsbasierte Laufzeitschätzung mit Sub-Sample-Peak-Refinement	34
8.4 Temperaturkompensation	35
8.5 Verzögerungskalibrierung	36
Methodik	37
Ergebnisse	52
Zusammenfassung und Ausblick	64
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Quellcodeverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
Literaturverzeichnis	I
Anhang	VI

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung von Kreuzkorrelationsverläufen zur Verdeutlichung der Peak-Struktur.	5
---	---	---

Tabellenverzeichnis

Quellcodeverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

API Application Programming Interface

CPU Central Processing Unit

ToF Time-of-Flight

SNR Signal-Rausch-Abstand

GCC Generalized Cross-Correlation

DSP Digital Signal Processing

I2S Inter-IC Sound

ADC Analog-to-Digital Converter

DAC Digital-to-Analog Converter

MEMS Micro-Electro-Mechanical Systems

FFT Fast Fourier Transform

WLAN Wireless Local Area Network

Bluetooth Bluetooth Low Energy

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers

1 Einleitung

1.1 Motivation

Viele Außenanwendungen erfordern verlässliche *mittlere* Messdistanzen bis etwa 25 m, etwa bei Rendezvous- und Abstandshalteaufgaben mobiler Systeme, temporären Sensornetzen oder der schnellen Vermessung kurzer Basislinien. Verbreitete Technologien adressieren diesen Bereich nur unvollständig: GNSS liefert im Nahbereich keine robuste Relativdistanz und ist unter Bewuchs oder Randbebauung eingeschränkt; UWB und LiDAR bieten hohe Leistung, gehen jedoch mit erhöhten Kosten, Energiebedarf und teils regulatorischen bzw. Sichtlinienanforderungen einher. Daraus resultiert der Bedarf an einer kostengünstigen, energieeffizienten und einfach integrierbaren Lösung, die unter realen Außenbedingungen hinreichende Reichweite und Robustheit bereitstellt.

Akustische Time-of-Flight-Verfahren im hörbaren Frequenzbereich schließen hier eine Lücke: Sie basieren auf handelsüblichen Lautsprechern und MEMS-Mikrofonen, benötigen keine lizenzpflichtigen Frequenzbänder und lassen sich auf verbreiteten Mikrocontroller-Plattformen implementieren. Für Distanzen bis 25 m verschiebt sich der Entwurfschwerpunkt weg von maximaler Zentimeterpräzision hin zu Reichweite, Detektionssicherheit und Energieeffizienz. Zu bewältigen sind insbesondere Wind- und Umgebungsgeräusche, Mehrwegeeffekte sowie systemische Jitterquellen. Zudem stellen sich zentrale Gestaltungsfragen zur Signalform (Zeit-Bandbreite-Produkt, Fensterung), zur Korrelation und Synchronisation zwischen Knoten sowie zur mechanischen Kopplung und Energieversorgung im Feld.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Konzeption, prototypische Umsetzung und experimentelle Bewertung eines FreeRTOS-basierten Audio-ToF-Systems für Outdoor-Distanzen bis 25 m. Untersucht werden (i) geeignete Chirp-Parameter im oberen Hörbereich, (ii) korrelationsbasierte Auswerteverfahren mit Sub-Sample-Schätzung, (iii) Funk-basierte Synchronisation und RTOS-Strategien zur Jitterreduktion sowie (iv) der Einfluss von Temperatur, Wind und Mehrwege auf Reichweite und Detektionssicherheit. Die Leistungsfähigkeit wird in Feldtests quantifiziert (Erkennungsrate, Ausreißerquote, mittlerer Fehler/Repeatability) und hinsichtlich Energie-/Reichweiten-Trade-offs beurteilt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 (Grundlagen) stellt die theoretischen und technischen Grundlagen vor: Schallausbreitung im Außenraum, Signalgestaltung für akustische ToF-Verfahren, Korrelationsmethoden sowie relevante Eigenschaften von ESP32-S3 und FreeRTOS.

Kapitel 3 (Anforderungen) leitet aus Anwendungsszenarien funktionale und nicht-funktionale Anforderungen ab: Reichweite, Detektionssicherheit, Energiebudget und Kostenrahmen.

Kapitel 4 (Hardware) beschreibt den Hardwareentwurf vom Steckbrettprototyp bis zur PCB-Implementierung: Lautsprecher- und Mikrofonwahl, Verstärker- und Versorgungsdesign, mechanische Entkopplung sowie EMV- und Layoutaspekte.

Kapitel 5 (Software) erläutert die Softwarearchitektur unter FreeRTOS: Task-Zuschnitt, Prioritäten und Kernbindung, I²S-DMA, funkbasierte Synchronisation sowie Maßnahmen zur Jitterreduktion.

Kapitel 6 (Signaldesign) behandelt das Signaldesign: Chirp-Charakteristik mit Fensterung und Bandbegrenzung, Vorverarbeitung, korrelationsbasierte Laufzeitschätzung mit Sub-Sample-Peak-Refinement, Temperaturkompensation und Verzögerungskalibrierung.

Kapitel 7 (Methodik) definiert die Messmethodik: Testaufbau und -umgebung im Außenbereich, Versuchspläne für Distanzen von 5–25 m mit LoS/NLoS-Varianten, Metriken und Auswerteverfahren.

Kapitel 8 (Ergebnisse) präsentiert die Messergebnisse zu Reichweite, Erkennungsrate, Fehlerkennwerten, Jitter und Energie pro Messung und diskutiert diese im Kontext der definierten Anforderungen.

Kapitel 9 (Zusammenfassung und Ausblick) fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf Mehrknotensysteme und 2D/3D-Erweiterungen.

2 Grundlagen

Dieses Kapitel stellt die theoretischen und technischen Grundlagen vor, die zum Verständnis der akustischen Time-of-Flight-Messung im Außenbereich erforderlich sind.

2.1 Schallausbreitung im Außenraum

Die Ausbreitung von Schallwellen im Außenraum wird maßgeblich durch die physikalischen Eigenschaften der Luft sowie durch Umwelteinflüsse bestimmt. Die Schallgeschwindigkeit c in trockener Luft lässt sich näherungsweise in Abhängigkeit von der Lufttemperatur T in Grad Celsius durch die Beziehung

$$c \approx 331,3 \text{ m/s} + 0,6 \cdot T \text{ m/s}$$

beschreiben [Kut00]. Temperaturänderungen wirken sich somit direkt auf die Laufzeitmessungen aus und müssen bei präzisen Time-of-Flight-Verfahren berücksichtigt werden. Neben der Temperatur beeinflussen auch Luftfeuchtigkeit und Luftdruck die Schallgeschwindigkeit, wenngleich in geringerem Maße [BSZ⁺95].

Ein wesentlicher Aspekt der Schallausbreitung im Freien ist die Dämpfung mit zunehmender Entfernung. Diese setzt sich aus geometrischer Ausbreitung (Kugelausbreitung) und frequenzabhängiger atmosphärischer Absorption zusammen. Während die geometrische Dämpfung mit $1/r$ (bei Druckamplituden) bzw. $1/r^2$ (bei Intensitäten) beschrieben wird, nimmt die Absorption mit steigender Frequenz deutlich zu. Dies begrenzt die Reichweite insbesondere hochfrequenter akustischer Signale.

Darüber hinaus beeinflussen Umgebungsbedingungen die Ausbreitung erheblich. Wind kann durch Geschwindigkeitsgradienten zu einer Richtungsabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit führen, wodurch Laufzeiten verzerrt werden. Turbulenzen verursachen zusätzlich Pegelschwankungen und Phasenmodulationen [Sal01]. Auch Boden- und Gebäudereflexionen führen zu Mehrwegeeffekten, die bei Laufzeitmessungen als systematische Störgrößen in Erscheinung treten können. Diese Effekte sind im Kontext akustischer Entfernungsmessung besonders kritisch, da sie Fehlinterpretationen bei der Korrelation verursachen können.

Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere zwei Punkte relevant: Erstens die temperaturabhängige Variation der Schallgeschwindigkeit, die bei Messungen im Außenraum durch eine entsprechende Korrektur kompensiert werden muss. Zweitens die Beeinflussung durch Mehrwegeeffekte und atmosphärisches Rauschen, welche die Detektionswahrscheinlichkeit der gesendeten Signale reduzieren und die Erkennungsrate limitieren

können.

2.2 Signalgestaltung für akustische Time-of-Flight (ToF)-Verfahren

Die Wahl des Sendesignals ist ein entscheidender Faktor für die Genauigkeit und Robustheit akustischer ToF-Messungen. Grundsätzlich lassen sich zwei Kategorien unterscheiden: Impulssignale und kontinuierliche, modulierte Signale. Während kurze Impulse eine einfache Auswertung ermöglichen, sind sie gegenüber Störgeräuschen und Mehrwegeeffekten anfälliger und bieten eine geringere Reichweite. Demgegenüber weisen frequenzmodulierte Signale, insbesondere lineare Chirp-Signale, vorteilhafte Eigenschaften auf [CB60].

Chirp-Signale zeichnen sich durch eine zeitlich lineare Änderung der Frequenz aus. Durch ihre große Zeit-Bandbreite-Produkte besitzen sie schmale Korrelationspeaks und ermöglichen somit eine präzise Laufzeitbestimmung. Gleichzeitig erlaubt ihre Energieverteilung über einen breiten Frequenzbereich eine hohe Robustheit gegenüber schmalbandigen Störungen [Win95]. In akustischen Anwendungen im hörbaren Frequenzbereich wird typischerweise ein Sweep von einigen Kilohertz gewählt, wobei die Auswahl durch die Übertragungscharakteristik von Lautsprecher und Mikrofon begrenzt ist.

Die Parameterwahl des Chirp-Signals stellt einen Kompromiss zwischen Reichweite und Auflösung dar. Eine größere Bandbreite erhöht die Zeitauflösung, erfordert jedoch geeignete Hardware zur Signalübertragung und -aufnahme. Eine längere Signaldauer steigert die Energie und damit die Reichweite, vergrößert jedoch auch die Anfälligkeit gegenüber Mehrwegeeffekten. Daher ist eine sorgfältige Abstimmung von Bandbreite, Dauer und Amplitude erforderlich, um unter den gegebenen Außenraumbedingungen zuverlässige Messergebnisse zu erzielen.

2.3 Korrelationsmethoden

Zur Bestimmung der Laufzeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal werden in akustischen Time-of-Flight-Systemen Korrelationsverfahren eingesetzt. Die Kreuzkorrelation erlaubt es, das empfangene Signal mit einer Referenzversion des ausgesendeten Signals zu vergleichen und den Zeitpunkt maximaler Ähnlichkeit zu bestimmen. Mathematisch wird die Kreuzkorrelation zweier diskreter Signale $x[n]$ und $y[n]$ durch

$$R_{xy}[k] = \sum_n x[n] y[n + k]$$

definiert [OSB99]. Das Maximum von $R_{xy}[k]$ markiert die geschätzte Verzögerung zwischen beiden Signalen.

Ein wesentliches Problem tritt bei periodischen oder quasi-periodischen Signalen wie reinen Sinusschwingungen auf. Da diese eine wiederkehrende Struktur besitzen, führt die Kreuzkorrelation zu mehreren gleichwertigen Maxima, wodurch keine eindeutige Laufzeitbestimmung möglich ist. Aus diesem Grund sind breitbandige Signale wie Chirps vorzuziehen, da sie in der Korrelation einen klaren, scharfen Peak erzeugen, der sich eindeutig vom Rauschhintergrund absetzt [Win95].

In verrauschten Umgebungen reduziert sich der Signal-Rausch-Abstand (SNR), was die Erkennung des Korrelationspeaks erschwert. Nebenmaxima können stärker hervortreten, sodass das globale Maximum nicht mehr der tatsächlichen Laufzeit entspricht. Verfahren wie die Normalisierung der Kreuzkorrelation oder die Verwendung der Generalized Cross-Correlation (GCC) mit spektralen Gewichtungen erhöhen in solchen Fällen die Robustheit [KC76].

Ein weiteres zentrales Thema ist die Sub-Sample-Schätzung: Da die Abtastfrequenz die Zeitauflösung begrenzt, erlaubt die Interpolation des Korrelationspeaks (z. B. parabolische Anpassung der Nachbarwerte) eine genauere Laufzeitabschätzung unterhalb der Abtastperiode [Lyo11].

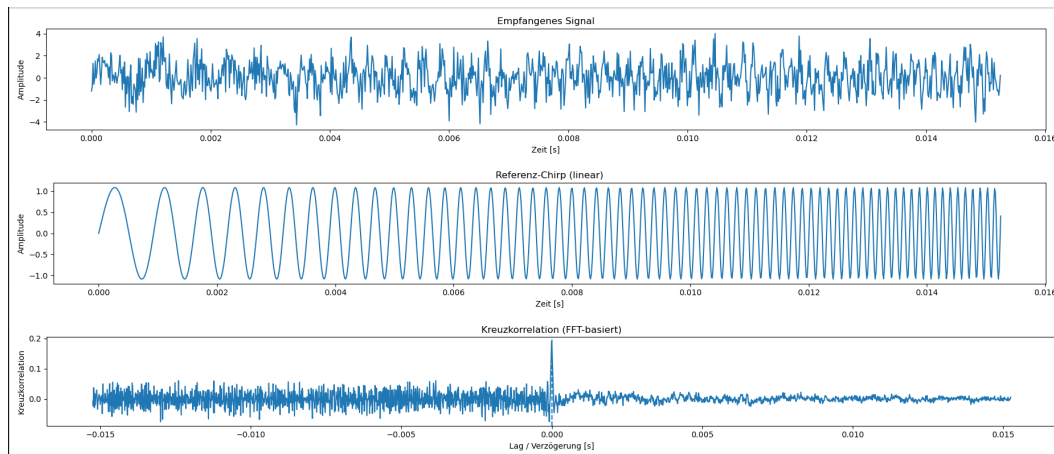


Abbildung 1: Schematische Darstellung von Kreuzkorrelationsverläufen zur Verdeutlichung der Peak-Struktur.

2.4 Eigenschaften von ESP32-S3 und FreeRTOS

Der ESP32-S3 ist ein Mikrocontroller der Firma Espressif, der speziell für Anwendungen im Bereich eingebetteter Systeme mit hohen Anforderungen an Rechenleistung, Konnektivität und Energieeffizienz entwickelt wurde. Er verfügt über einen Dual-Core Xtensa LX7-Prozessor mit einer Taktfrequenz von bis zu 240 MHz, integriertem

Wireless Local Area Network (WLAN) (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 802.11 b/g/n) sowie Bluetooth Low Energy (Bluetooth) 5.0. Für signalverarbeitende Aufgaben stehen Digital Signal Processing (DSP)-Erweiterungen, Vektoroperationen sowie Hardwareunterstützung für Gleitkommazahlen zur Verfügung [Sys23]. Darüber hinaus besitzt der ESP32-S3 dedizierte Peripherien für Audioanwendungen, wie Inter-IC Sound (I2S)-Schnittstellen, 12-Bit-Analog-to-Digital Converter (ADC)-Kanäle und integrierte Digital-to-Analog Converter (DAC)s. Dies ermöglicht die direkte Ansteuerung von Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)-Mikrofonen und Lautsprechern ohne zusätzliche Hardware.

Die Architektur des ESP32-S3 eignet sich für die in dieser Arbeit betrachteten akustischen ToF-Verfahren in zweierlei Hinsicht. Erstens erlaubt die Rechenleistung die Echtzeitberechnung von Korrelationen, auch für längere Chirp-Signale und Fast Fourier Transform (FFT)-basierte Verfahren. Zweitens unterstützt die umfangreiche Peripherie die präzise Aufnahme und Wiedergabe akustischer Signale bei Abtastraten bis 48 kHz, wie sie für Messungen im hörbaren Frequenzbereich erforderlich sind.

Als Betriebssystem wird FreeRTOS eingesetzt, ein weit verbreitetes Echtzeitbetriebssystem für Mikrocontroller. Es basiert auf einem präemptiven Task-Scheduler, der die Aufteilung der Rechenressourcen auf mehrere Tasks mit unterschiedlichen Prioritäten erlaubt [Bar22]. Wichtige Mechanismen wie Queues, Semaphore und Mutexes unterstützen die Synchronisation zwischen Tasks und Interrupts. Im Kontext der akustischen Laufzeitmessung ist insbesondere die Reduktion von Jitter relevant: Durch die Zuweisung hoher Prioritäten an zeitkritische Signalverarbeitungstasks, die Verwendung von Hardware-Timern zur exakten Zeitbasis sowie das Auslagern nicht zeitkritischer Aufgaben (z. B. Logging, Kommunikation) auf Hintergrund-Tasks lässt sich die zeitliche Genauigkeit verbessern.

Die Kombination aus leistungsfähiger Hardware (ESP32-S3) und deterministischer Softwaresteuerung (FreeRTOS) bietet somit eine geeignete Plattform für die prototypische Realisierung akustischer Entfernungsmessungen im Außenbereich.

3 Anforderungen

Dieses Kapitel leitet aus den Anwendungsszenarien die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen für das akustische ToF-System ab.

3.1 Anwendungsszenarien

3.2 Funktionale Anforderungen

3.3 Nicht-funktionale Anforderungen

4 Hardware

Dieses Kapitel beschreibt den Hardwareentwurf vom Steckbrettprototyp bis zur PCB-Implementierung, einschließlich der Komponentenauswahl und des Schaltungsdesigns.

4.1 Prototypenaufbau (Steckbrett)

4.2 Lautsprecher- und Mikrofonwahl

4.3 Funkmodulauswahl

4.4 Verstärker- und Versorgungsdesign

4.5 Schaltplan (Schematik)

4.6 PCB-Layout

5 Software

Dieses Kapitel erläutert die Softwarearchitektur unter FreeRTOS, einschließlich Task-Design, I²S-Verarbeitung und Synchronisationsstrategien.

5.1 FreeRTOS-Architektur

5.2 I²S-DMA

5.3 Maßnahmen zur Jitterreduktion

6 Signaldesign

Dieses Kapitel behandelt das Design der akustischen Signale, die Signalverarbeitung und die Laufzeitschätzung für die ToF-Messung.

6.1 Chirp-Charakteristik, Fensterung und Bandbegrenzung

6.2 Korrelationsbasierte Laufzeitschätzung mit Sub-Sample-Peak-Refinement

6.3 Temperaturkompensation

6.4 Verzögerungskalibrierung

7 Methodik

Dieses Kapitel definiert die Messmethodik für die experimentelle Bewertung des akustischen ToF-Systems, einschließlich Testaufbau, Versuchspläne und Auswerteverfahren.

7.1 Testaufbau und -umgebung (Außenbereich)

7.2 Metriken und Auswerteverfahren

8 Ergebnisse

Dieses Kapitel präsentiert die Messergebnisse der experimentellen Evaluierung des akustischen ToF-Systems und diskutiert diese im Kontext der definierten Anforderungen.

8.1 Reichweite

8.2 Erkennungsrate

8.3 Fehlerkennwerte

9 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hat die Entwicklung und Evaluierung eines FreeRTOS-basierten Systems zur akustischen Entfernungsmessung zwischen zwei ESP32-S3-Knoten für den Außenbereich erfolgreich durchgeführt.

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

9.2 Bewertung der Anforderungserfüllung

9.3 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Literaturverzeichnis

- [Bar22] BARRY, Richard: *Mastering the FreeRTOS Real Time Kernel*. 10th. Real Time Engineers Ltd., 2022
- [BSZ⁺95] BASS, Henry E. ; SUTHERLAND, Louis C. ; ZUCKERWAR, Allan J. ; BLACKSTOCK, David T. ; HESTER, Dennis M.: Atmospheric absorption of sound: Update. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 97 (1995), Nr. 1, S. 680–683
- [CB60] COOK, Charles E. ; BERNFELD, Martin: Pulse compression—key to more efficient radar transmission. In: *Proceedings of the IRE* 48 (1960), Nr. 3, S. 310–316
- [KC76] KNAPP, Charles H. ; CARTER, G. C.: The generalized correlation method for estimation of time delay. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 24 (1976), Nr. 4, S. 320–327
- [Kut00] KUTTRUFF, Heinrich: *Raumakustik*. S. Hirzel Verlag, 2000
- [Lyo11] LYONS, Richard G.: *Understanding Digital Signal Processing*. 3rd. Prentice Hall, 2011
- [OSB99] OPPENHEIM, Alan V. ; SCHAFER, Ronald W. ; BUCK, John R.: *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd. Prentice Hall, 1999
- [Sal01] SALOMONS, Erik M.: *Computational Atmospheric Acoustics*. Springer, 2001
- [Sys23] SYSTEMS, Espressif: *ESP32-S3 Technical Reference Manual*, 2023. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf. – Version 1.7
- [Win95] WINKLER, Thomas: Range estimation using chirp signals. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, IEEE, 1995, S. 365–368