

Automated Acoustic Hit Detection and Score Calculation on a Steel Dartboard

Automatisierte akustische Treffererkennung auf einer Steel-Dartscheibe

Stefan Hensel*, Marin B. Marinov**, Florian Sprich*

* University of Applied Sciences Offenburg, Department for Electrical Engineering, Badstraße 24, D-77652 Offenburg, Germany, stefan.hensel@hs-offenburg.de

** Technical University of Sofia, Faculty of Electronic Engineering and Technologies, Department of Electronics, 8, Kliment Ohridski Blvd., BG-1756 Sofia, Bulgaria, mbm@tu-sofia.bg

Abstract — In the presented approach, the impact point of the arrow is to be determined by the cross-correlation of audio signals. The impact of the arrow generates a characteristic noise, which is converted into electrical signals by several microphones in a certain arrangement around the dartboard. With the help of the speed of sound and the time differences, which the sound wave requires to the individual microphones, the impact point is then to be calculated.

Zusammenfassung — Bei dem vorgestellten Ansatz soll der Auftreffpunkt des Pfeils durch die Kreuzkorrelation von Audio-Signalen bestimmt werden. Das Auftreffen des Pfeils erzeugt ein charakteristisches Geräusch, welches von mehreren Mikrofonen in bestimmter Anordnung um die Dartscheibe herum in elektrische Signale umgewandelt wird. Mithilfe der Schallgeschwindigkeit und den Zeitdifferenzen, welche die Schallwelle zu den einzelnen Mikrofonen benötigt soll dann der Auftreffpunkt berechnet werden.

I. EINFÜHRUNG

Das Dartspiel ist eines der beliebtesten Spiele der Welt. Nach einigen Quellen wurde es im 16. Jahrhundert erfunden, aber die Klassifizierung der Dartscheiben und die Methode zur Berechnung der Punktzahl gehört Brian Gamlin (1896). Seitdem wurden viele Varianten entwickelt, aber die beliebteste ist die, bei der die Spieler versuchen, den anfänglichen Wert von 301 auf 0 Punkte zu reduzieren [1]. Dartscheibe Design bezieht sich auf die Platzierung der Zahlen in Sektoren einer kreisförmigen Tafel [2, 3].

Klassische Dartscheiben aus Sisal oder Kork (Stahldartscheiben) werden mit Pfeilen anvisiert, deren Spitzen aus Edelstahl bestehen. Im professionellen Dartbereich sowie im höherklassigen Amateurbereich kommen nur diese klassischen Dartscheiben zum Einsatz, da sie ein wesentlich besseres Handling beim Werfen und Schlagen des Pfeils bieten. Ein wesentlicher Nachteil dieser Dartscheiben ist die fehlende elektronische Treffererkennung. Wenn keine zusätzliche Maßnahme ergriffen wird, wie zum Beispiel eine dritte Person, die die Punkte berechnet, oder zusätzliche Software, wird eine manuelle Berechnung der Punktzahl durch die Spieler selbst durchgeführt.

Dadurch werden Konzentration und Spielfluss gestört, weshalb häufig elektronische Dartscheiben (e-Dart) zum Einsatz kommen. Diese ermöglichen zwar die automatische Erkennung und Berechnung von Treffern, bieten dem Spieler jedoch ein völlig anderes Spielgefühl als klassische Darts. Aufgrund dieser Konfliktsituation besteht ein Bedarf an Stahldartscheiben mit elektronischer Treffererkennung und Auswertung sowohl für professionelle als auch für Amateuranwendungen.

In den letzten Jahren wurden verschiedene Ansätze getestet [4, 5]. In dieser Arbeit wird ein System entwickelt, das automatisch die Punktzahl eines Pfeils auf einer Stahldartscheibe berechnet und anzeigt.

II. TECHNISCHER ANSATZ

Die Treffererkennung soll in diesem Ansatz mithilfe der entstehenden Schallwelle, welche beim Auftreffen des Pfeils auf dem Dartboard entsteht, realisiert werden. Eine Punktschallquelle erzeugt laut der Theorie unter idealen Bedingungen ein Kugelwellenfeld um die Quelle herum. Die Schallwelle breitet sich also in alle Raumrichtungen gleichmäßig und mit gleicher Geschwindigkeit aus [6]. Um die Dartscheibe herum soll nun mit mehreren Mikrofonen eine Fläche aufgespannt werden in welcher eine Schalllokalisierung durchgeführt wird. Die Schallquelle kann dadurch lokalisiert werden, da die Welle zu unterschiedlichen Zeitpunkten an den Mikrofonen eintrifft. Mithilfe der bekannten Schallgeschwindigkeit und den gemessenen Zeitdifferenzen der Mikrofonensignale kann anschließend der Ort der Schallquelle innerhalb der Fläche berechnet werden.

Zur Bestimmung des Auftreffpunktes des Pfeils auf der Scheibe, wird eine Schalllokalisierung innerhalb einer Ebene durchgeführt. Eine definierte Anordnung mehrerer Mikrofone spannen eine Fläche auf, die diese Ebene definiert. Im entwickelten System wird das Verfahren der Multilateration angewandt. Da die Multilateration ein Spezialfall der Trilateration ist, wird die Trilateration zunächst erläutert, bevor die Multilateration vorgestellt wird.

A. Trilateration

Beim Trilaterationsverfahren spielt die Entfernung eines gesuchten Punktes innerhalb einer Ebene zu definierten Bezugspunkten eine wichtige Rolle. Für eine Ortung innerhalb einer Ebene müssen zu mindestens drei dieser Bezugspunkte die Entfernungen bekannt sein. Es gilt dennoch: Je mehr Entfernungen zu den Bezugspunkten bekannt sind, desto genauer wird die Bestimmung des unbekanntes Punktes. Im mathematischen Sinne wird ein Gleichungssystem gelöst [7]. Betrachtet man Grafische Darstellung der Trilateration mit vier Bezugspunkten, ergeben sich für diesen Fall folgende Kreisgleichungen:

$$|\vec{r}_1| = \sqrt{(x_1 - x_p)^2 - (y_1 - y_p)^2} \quad (1)$$

$$|\vec{r}_2| = \sqrt{(x_2 - x_p)^2 - (y_2 - y_p)^2} \quad (2)$$

$$|\vec{r}_3| = \sqrt{(x_3 - x_p)^2 - (y_3 - y_p)^2} \quad (3)$$

$$|\vec{r}_4| = \sqrt{(x_4 - x_p)^2 - (y_4 - y_p)^2} \quad (4)$$

Um den Punkt P zu bestimmen, müssen folgende Größen bekannt sein:

- Koordinaten (x, y) der Bezugspunkte A1, A2, A3 und A4, gegeben durch eine definierte Konstellation der Mikrofone.
- Abstände $|\vec{r}_1|$, $|\vec{r}_2|$, $|\vec{r}_3|$ und $|\vec{r}_4|$ durch Messungen.

Abb. 1 zeigt den idealen Fall, bei welchem sich alle Kreise in exakt einem Punkt schneiden. In realen Systemen ergibt sich jedoch kein exakter Schnittpunkt der Kreise. In diesem Fall bestimmt sich der Punkt P zu dem Punkt, der zu allen Schnittpunkten der Kreise den kleinsten quadratischen Abstand hat (Least-Squares-Verfahren) [7].

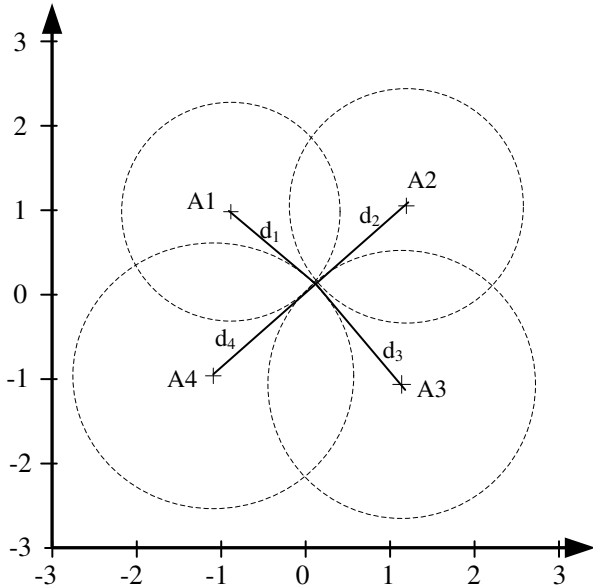


Abb. 1 Grafische Darstellung der Trilateration mit vier Bezugspunkten

Zur Bestimmung der Distanzen zwischen Dartpfeil und den Mikrofonen müsste der Auftreffzeitpunkt des Pfeils und damit der Zeitpunkt der Entstehung der Schallwelle sehr genau bestimmt werden. Anschließend können mit den gemessenen Mikrofonensignalen und der Schallgeschwindigkeit die Distanzen berechnet werden.

$$d = c_s \cdot \Delta t = (t_{\text{Mikro}} - t_{\text{Auftreff}}) \quad (5)$$

Da die Bestimmung des exakten Auftreffzeitpunktes zusätzlichen Mehraufwand bedeutet, wird das im folgenden Kapitel aufgeführte Multilaterationsverfahren, bei welchem der Auftreffzeitpunkt nicht bestimmt werden muss, für die Schalllokalisierung verwendet.

B. Multilateration

Werden nicht die Distanzen zwischen Pfeil und Mikrofonen verwendet, sondern die Differenzen der jeweiligen Pfeil-zu-Mikrofon-Distanzen, so spricht man von Multilateration.

Betrachtet man diesen Fall grafisch (siehe Abb. 2), so ergeben sich Hyperbelbahnen, auf welcher sich der Pfeil anhand der Distanzen zu den Mikrofonen befinden muss.

Wie folgende Formel zeigt, muss der genaue Zeitpunkt des Auftreffens nicht bekannt sein:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = c_s \cdot (\Delta t_1 - \Delta t_2) \quad (6)$$

$$\Delta d = c_s \cdot (t_{\text{Mikro1}} - t_{\text{Auftreff}} - t_{\text{Mikro2}} + t_{\text{Auftreff}}) \quad (7)$$

$$\Delta d = c_s \cdot (t_{\text{Mikro1}} - t_{\text{Mikro2}}) \quad (8)$$

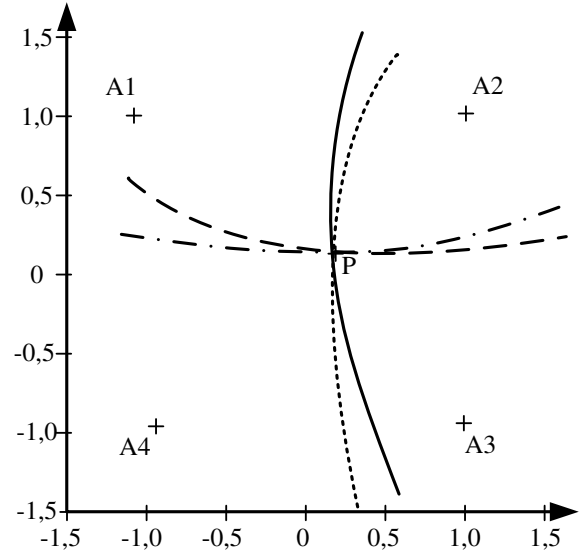


Abb. 2 Grafische Darstellung der Multilateration mit vier Bezugspunkten

Ähnlich wie bei der Trilateration ergibt sich auch hier ein mathematisches Gleichungssystem, welches nach x_p und y_p aufgelöst werden muss. In den Gleichungen muss bekannt sein:

- Koordinaten (x, y) der Bezugspunkte A1, A2, A3 und A4, gegeben durch die definierte Konstellation der Mikrofone.
- Abstandsdifferenzen $|d_{12}|$, $|d_{23}|$, $|d_{34}|$ und $|d_{41}|$ durch Messungen.

$$d_{12} = \frac{\sqrt{(x_1 - x_p)^2 - (y_1 - y_p)^2} - \sqrt{(x_2 - x_p)^2 - (y_2 - y_p)^2}}{\quad} \quad (9)$$

$$d_{23} = \frac{\sqrt{(x_2 - x_p)^2 - (y_2 - y_p)^2} - \sqrt{(x_3 - x_p)^2 - (y_3 - y_p)^2}}{\quad} \quad (10)$$

$$d_{34} = \frac{\sqrt{(x_3 - x_p)^2 - (y_3 - y_p)^2} - \sqrt{(x_4 - x_p)^2 - (y_4 - y_p)^2}}{\quad} \quad (11)$$

$$d_{41} = \frac{\sqrt{(x_4 - x_p)^2 - (y_4 - y_p)^2} - \sqrt{(x_1 - x_p)^2 - (y_1 - y_p)^2}}{\quad} \quad (12)$$

III. EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE

A. Systemübersicht

Das Gesamtsystem zur akustischen Treffererkennung besteht aus den folgenden Komponenten mit ihren jeweiligen Aufgaben:

TABELLE I. AKUSTISCHE TREFFERERKENNUNG: ÜBERSICHT DER SYSTEMKOMPONENTEN

Komponente	Aufgabe
Mikrofone	Umwandlung der Schallsignale in elektrische Signale
Piezo-Elemente	Triggerung des Auftreffens eines Objekts
Analogschaltung	Auslegung des Spannungsbereichs von 0-3 V für die ADC-Eingänge
FPGA	Speichern der Abtastwerte in FIFOs und Interaktion mit dem FT232H
FT232H	Übertragung der gespeicherten Abtastwerte in den FIFOs an ein Python-Skript auf dem PC
PC	Datenverarbeitung der empfangenen Abtastwerte (Kreuzkorrelation, Multilateration)

Abb. 3 zeigt ein Blockschaltbild, welches alle verwendeten Komponenten beinhaltet.

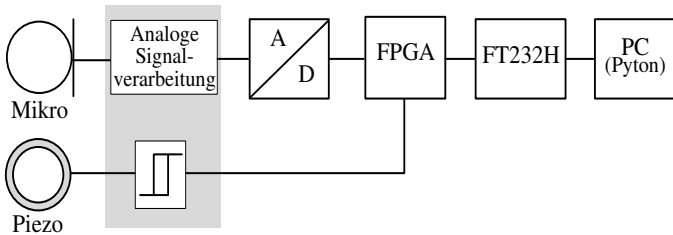


Abb. 3 Grafische Darstellung der Multilateration mit vier Bezugspunkten

B. Kreuzkorrelation eines Rauschsignals

Als nächsten Evaluationsschritt dient die Schallortung einer Rauschquelle. Eine Rauschsignal (AWGN) besitzt im optimalen Fall keinerlei Periodizität und eignet sich daher sehr gut zur Messung von Zeitverschiebungen eines Signals mittels Kreuzkorrelation. Als Ergebnis der Kreuzkorrelationsfunktion eines Rauschsignals $n(t)$ und dessen zeitlich verschobene Kopie $n(t + \tau)$ kann ein Signalverlauf erwartet werden, welcher nur bei $\Delta t = \tau$ ein Maximum aufweist, da sich die über die Mikrofone empfangenen Rauschsignale bei dieser Verschiebung vollständig decken. Die Berechnung der Autokorrelationsfunktion geschieht nach [8] wie folgt:

$$r_{xy}[m] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N x[n] \cdot y[n+m] \quad (13)$$

Im realen Fall liegt keine unendliche Anzahl von Abtastwerten vor. Die Korrelationsfunktion kann nur über alle N Abtastwerte berechnet werden. Nach [9] ergibt sich die Rechenvorschrift der verwendeten Kreuzkorrelationsfunktion der Python-Numpy Bibliothek zu:

$$c_{xy}[k] = \sum_N x[n+k] \cdot y^*[n]. \quad (14)$$

Zur Ortung der Schallquelle müssen die Differenzen der Distanzen zur Schallquelle bestimmt werden. Mithilfe derer kann wie bereits erwähnt über die Multilateration der Ort der Schallquelle bestimmt werden. Die Differenzen ergeben sich jeweils durch die Messung der Zeitverschiebung der Signale eines Mikrofonpaares und durch anschließende Verrechnung mit der Schallgeschwindigkeit.

Im Folgenden wird die Messung zur Bestimmung einer „Abstandsdifferenz“ zweier Mikrofone aufgezeigt. Das Setup zu den Messungen mithilfe der Rauschquelle zeigt Abb. 4. Das

Mikrofonpaar bilden das Mikrofon in der linken und der Rechten unteren Ecke des Rahmens. Als Rauschquelle dient ein Lautsprecher, welcher durch Rauschgenerator angesteuert wird.



Abb. 4 Grafische Darstellung der Multilateration mit vier Bezugspunkten

Während das generierte Rauschsignal über den Lautsprecher abgegeben wird, muss Druck auf die Scheibe ausgeübt werden, um dem System das Auftreffen eines Objekts zu simulieren (siehe III.B). Die Übertragung der Abtastwerte, wird damit gestartet. Die grafische Darstellung der mittelwertfreien Mikrofonensignale zeigt Abb. 5.

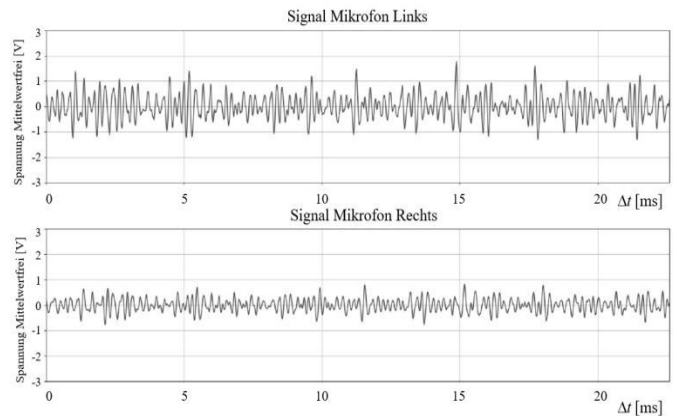


Abb. 5 Mittelwertfreie Abtastwerte der beiden Mikrofonensignale

Berechnet man mit den Datensätzen der beiden Mikrofonensignalen die Kreuzkorrelationsfunktion mithilfe der Python-Numpy Bibliothek [9], so resultiert daraus das in Abb. 6 dargestellte Ergebnis.

In Abb. 6 kann ein eindeutiges Maximum in der Kreuzkorrelationsfunktion erkannt werden, welches bei genauerer Betrachtung eine Verschiebung um $\Delta N = -16$ Abtastwerte aufweist. Mithilfe der Abtastfrequenz kann daraus die Zeitverschiebung berechnet werden:

$$\Delta t = \Delta N \cdot \frac{1}{f_s} = -16 \cdot \frac{1}{57470} = -278,406 \mu s. \quad (15)$$

Aus der Zeitverschiebung kann dann die Differenz des Abstandes bestimmt werden:

$$\Delta d = c_s \cdot \Delta t = (343 \text{ m/s}) \cdot (-278,406 \mu s) = -95,493 \text{ mm} \quad (16)$$

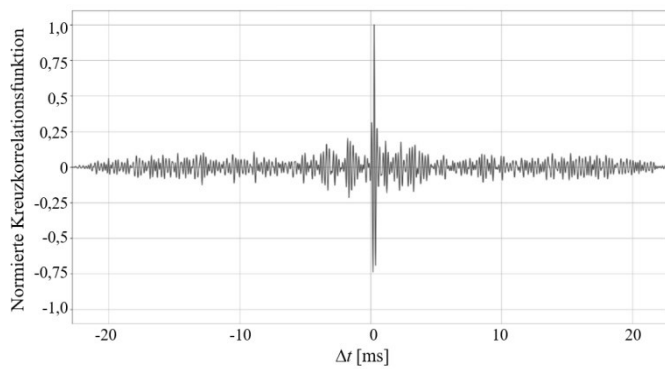


Abb. 6 Autokorrelationsfunktion der Mikrofonsignale der Mikrofone unten links und rechts

Mit einer Abstandsdifferenz von ca. 9,55 cm muss sich die Schallquelle also 9,55 cm näher am linken Mikrofon befinden, als am rechten. Zur Evaluation der Berechnung wurde der Abstand von Lautsprecher zu den Mikrofonen gemessen. Die Messungen ergaben einen Abstand von 26,5 cm zum Mikrofon links, sowie einen Abstand von 36 cm zum Mikrofon rechts unten (siehe Abb. 7). Daraus berechnet sich die vom System korrekt detektierte Differenz der Abstände von ca. 9,5 cm.

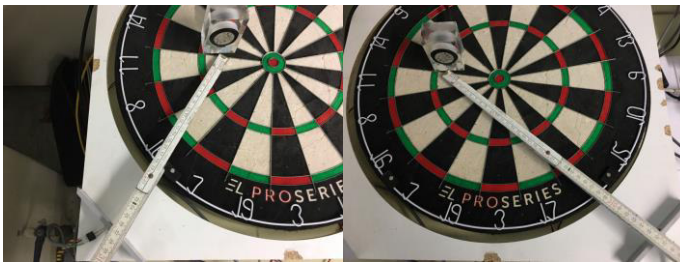


Abb. 7 Messung der Abstände zwischen Schallquelle und den Mikrofonen

C. Kreuzkorrelation eines Dartpfeil-Schallsignals

Im nächsten Schritt soll das ursprüngliche Ziel, nämlich die Schallortung eines Dartpfeils beim Auftreffen, erreicht werden. Zunächst soll wieder exemplarisch die Abstandsdifferenz zwischen einem Mikrofonpaar durch die Kreuzkorrelation bestimmt werden. Ist diese korrekt, kann aus allen Abstandsdifferenzen mithilfe der Multilateration die Position berechnet werden.

Trifft nun im betriebsbereiten System ein Dartpfeil auf der Scheibe auf, löst durch die Triggerung mit den Piezosensoren die Übertragung aus.

Um wie viel die Signale zueinander zeitlich verschoben sind, wird wiederum durch die Korrelationsfunktion bestimmt. Die Kreuzkorrelationsfunktion der beiden Mikrofonsignale ist in Abb. 8 dargestellt.

In der Kreuzkorrelationsfunktion kann nun das große Problem bei der Bestimmung der zeitlichen Verschiebung der Mikrofonsignale dargestellt werden. Abhängig vom Signal, das beim Auftreffen eines Pfeils entsteht, ergibt sich – auch nach etlichen Versuchen – kein eindeutiges, sondern mehrere ähnliche Maxima in der Kreuzkorrelationsfunktion. Dadurch kann keine zuverlässige Entscheidung getroffen werden, wie groß die Differenz der Abstände zu den Mikrofonen ist. Daraus folgt wiederum, dass mithilfe der Multilateration die Position des Pfeils nicht zuverlässig bestimmt werden kann.

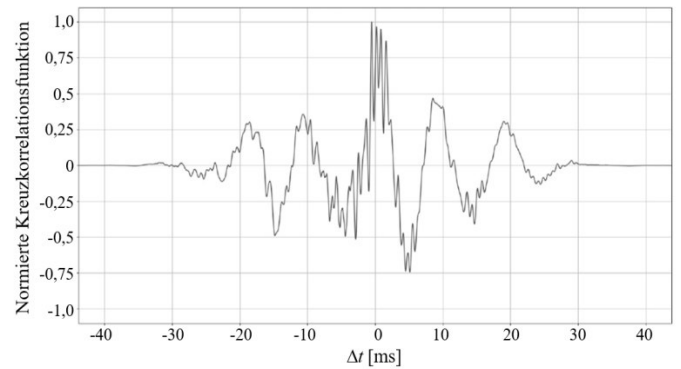


Abb. 8 Kreuzkorrelationsfunktion der Mikrofonsignale beim Auftreffen des Dartpfeils

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Nach der Feststellung, dass keine zuverlässige Schalllokalisierung mit dem vorhandenen Aufbau möglich ist, folgten weitere Versuche mit verschiedenen Tief- und Bandpassfilterung der Mikrofonsignale. Das Auftreffen des Pfeils stellt jedoch einen sehr variablen Prozess (Wo trifft der Pfeil auf? Wie sieht die Signalform aus? Wie groß ist die Amplitude?) dar. Aufgrund des Prozesses konnten durch statische Filterparameter keine Verbesserungen festgestellt werden. Weitere Versuche zeigten vielversprechende Messungen beim Ändern der Konstellation der Mikrofone. Die Mikrofone wurden dabei als eine Art Stereo-Mikrofon mit einem geringen Abstand nebeneinander positioniert. Durch diese Maßnahme ergeben sich wieder eindeutige Maxima in der Kreuzkorrelationsfunktion, da die Signale der Mikrofone mit abnehmendem Abstand zunehmend korrelieren. Nachteilig wird jedoch eine sehr viel höhere Abtastrate benötigt, da die zu messende Differenz der Signallaufzeiten bei nah aneinander platzierten Mikrofonen nur sehr gering ist. Dieser beschriebene weiterführende Ansatz wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch aus zeitlichen Gründen nicht weiter verfolgt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Encyclopedia Britannica, *Micropedia*, 15 Hrsg., Bd. 3, Chicago: Helen Hemingway Benton, 1983, p. 385.
- [2] K. Selkirk, „Re-designing the dartboard,“ *Math. Gazette*, Bd. 60, pp. 171-178, 1976.
- [3] D. Singmaster, „Arranging a dartboard,“ *IMA Bulletin*, Bd. 16, pp. 93-97, 1980.
- [4] „Innovation an der Scheibe. Informatiker entwickeln Kamera-basierte Punktwertung für professionelle Steeldartscheiben,“ Universität Jena, 31 März 2015. [Online]. Available: https://www4.uni-jena.de/Forschungsmeldungen/FM150331_Dart.html.
- [5] A. Patel und M. Ehrenberg, „The Design and Implementation of an Automated Dartboard -Final Project Report,“ MIT, 2005.
- [6] H. Henn, G. Rez Sinambari, M. Fallen, *Ingenieurakustik: Grundlagen Anwendungen Verfahren*, Braunschweig/Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1999.
- [7] A. Masiero, F. Fissore, R. Antonello, A. Cenedese und A. Vettore, „A Comparison of UWB and Motion Capture UAV Indoor Positioning,“ in *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W13, 1695-1699, 2019.
- [8] M. Meyer, *Signalverarbeitung. Analoge und digitale Systeme*, Springer-Verlag, 2009.
- [9] B. Klein, *Numerisches Python: Arbeiten mit NumPy, Matplotlib und Pandas*, München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2019.