

Hören mit dem Arduino

Ein „elektronisches Ohr“ zur Messung von Laufzeitunterschieden und Lautstärke akustischer Signale

NILS HAVERKAMP – ALEXANDER PUSCH

Wie wir bestimmen, woher ein Geräusch kommt, ist eine spannende Alltagsfrage, die im Physik- und Biologieunterricht aufgegriffen und beantwortet werden kann. Das Ermitteln der Richtung einer Geräuschquelle erfolgt beim Menschen durch die Kombination verschiedener Mechanismen. Mit Hilfe von preisgünstigen, einfachen Mikrocontrollern, wie z.B. dem Arduino (vgl. dazu z.B. PUSCH, 2019a) ist es möglich, ein einfaches Funktionsmodell (Abb. 1) zur Umsetzung eines dieser Mechanismen zu bauen und in Experimenten einzusetzen. Die hier vorgestellte Schaltung analysiert die Laufzeitunterschiede des Signals, gibt die ermittelten Werte aus und zeigt diese mit einem Zeiger an. Der Beitrag beschreibt die Funktionsweise der Schaltung sowie mögliche Experimente und Einsatzmöglichkeiten im Physik- und fächerübergreifenden Unterricht.



Abb. 1. Funktionsmodell für das Richtungshören anhand der Laufzeitdifferenz

1 Woher weiß der Mensch, von wo ein Geräusch kommt?

Richtungshören oder räumliches Hören bezeichnet die Fähigkeit zu bestimmen, aus welcher Richtung ein akustisches Signal stammt. Wie viele andere Lebewesen hat auch der Mensch diese Fähigkeit. Wir beschäftigen uns im Folgenden mit dem horizontalen Richtungshören mit zwei „funktionierenden“ Ohren. Dabei werden durch das menschliche Gehirn insbesondere zwei Eigenschaften der an beiden Ohren registrierten Audiosignale miteinander verglichen:

1. Zum einen werden die Zeiten verglichen, zu denen das akustische Signal die beiden Ohren erreicht. Dieser

Mechanismus dominiert bei Frequenzen unter 2.000 Hz (BEAR, CONNORS & PARADISO, 2018). Schall breitet sich in Luft bei Normaldruck und Raumtemperatur mit ca. 340 m/s aus. Je nach Ursprungsrichtung ergibt sich aufgrund des Abstands der Ohren (beim Menschen ca. 20 cm) eine Zeitdifferenz zwischen dem Auftreffen der Signale. Diese interaurale Laufzeitdifferenz liegt zwischen 0 μ s und 600 μ s (ebenda). Bei deutlich größeren Schallgeschwindigkeiten, wie es bspw. im Schwimmbad unter Wasser der Fall ist (ca. 1500 m/s), ist ein Richtungshören für den Menschen auch nur noch schwer oder kaum möglich.

2. Bei Frequenzen oberhalb von 2.000 Hz wird primär der Intensitätsunterschied zur Lokalisation herangezogen, der sich aus dem Abnehmen der Lautstärke mit zunehmendem Abstand zur Geräuschquelle und dem Schallschatten des Kopfes ergibt.

Der Vergleich von Zeitdifferenz und Lautstärke ist allerdings aufgrund der Anordnung der Ohren nicht geeignet, um zu entscheiden, ob ein Signal von vorne oder hinten bzw. von oben oder unten kommt. Für die Unterscheidung dieser Richtungen sind Reflexionen in den Ohrmuscheln und eine komplexe Analyse durch das Gehirn nötig (ebenda).

Mit einem vergleichsweise einfachen Microcontroller wie dem Arduino sind solche Analysen nicht möglich. Daher vergleichen wir mit der hier vorgestellten Schaltung nur die Laufzeitunterschiede (s. o.) von Signalen, welche „vor“ der Messschaltung erzeugt werden. Aus dem Laufzeitunterschied gibt die Schaltung die Ursprungsrichtung des Signals in Form des Winkels an.

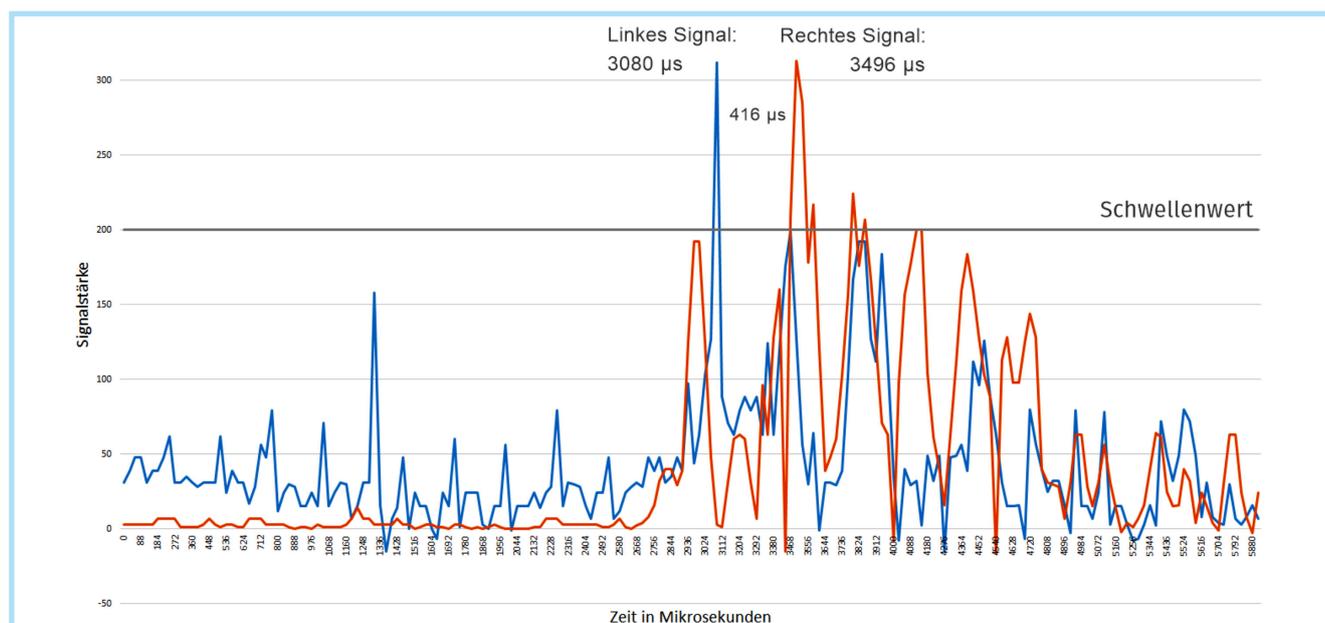


Abb. 2. Amplitudenverlauf beider Mikrofone über Messintervall bei versetzter Signalquelle, das Signal ist näher am linken Mikrofon als am rechten. Die Messpunkte sind zur besseren Sichtbarkeit verbunden.

2 Wie bestimmt der Arduino, von wo ein Signal kommt?

Um eine Laufzeitdifferenz zu erfassen, werden zwei Mikrofone mit integriertem Verstärker verwendet, die in einem festen Abstand zueinander befestigt sind.

Die Lautstärke des Signals beeinflusst die Ausgangsspannung an dem Mikrofon und kann somit mit dem Arduino ausgelesen werden. Wird ein Signal am Mikrofon registriert, schwankt die Ausgangsspannung sowohl in positiver als auch in negativer Richtung um einen Basiswert. Deshalb muss die Amplitude des Signals zwischen dem Auslenkungsmaximum und dem Auslenkungsminimum bestimmt werden. Eine Quadrierung dieser Differenz ist dann annähernd proportional zur Lautstärke. Die Ausgangsspannungen einfacher Mikrofone sind meist nicht auf gebräuchliche Skalen wie dB(A) kalibriert. Auch ist die Empfindlichkeit für verschiedene Frequenzbereiche je nach Modell des Mikrofons unterschiedlich (s. entsprechende Datenblätter). Zur Ermittlung der Laufzeitdifferenz bestimmt der Arduino in einer Messreihe 200-mal die Amplitude beider Mikrofone. Die Messungen werden in einem zeitlichen Abstand von etwa 30 µs gemacht. Anschließend ermittelt er aus dieser Messreihe jeweils denjenigen Messwert beider Mikrofone mit der größten Amplitude (vgl. Abb. 2). Befindet sich die Signalquelle nicht exakt in der Mitte beider Mikrofone, sondern zu einer Seite verschoben, ergeben sich auch verschiedene Ankunftszeiten der Signale an den Mikrofonen und der Zeitpunkt der maximalen Amplitude ist zwischen beiden Mikrofonen zeitlich verschoben. Aus dem Vergleich beider Zeitpunkte bestimmt das Programm die Laufzeitdifferenz und gibt diese über ein LC-Display aus.

Zur Anzeige der Richtung wird außerdem ein Servomotor mit Zeiger verwendet. Der Laufzeitunterschied wird per Mappingbefehl (eine lineare Zuordnung zwischen Eingangs- und Ausgangsvariable) in einen Winkel umgerechnet, den der Servomotor dann ausgibt.

Damit der Arduino nicht auf leise Hintergrundgeräusche reagiert, ist im Programmcode ein Schwellenwert hinterlegt (s. Abb. 2, graue Linie). Eine Laufzeitdifferenz wird nur dann berechnet, wenn die maximale Amplitude beider Mikrofone diesen Schwellenwert in dem Messintervall übersteigt.

Die Abbildung 3 zeigt die rudimentäre Schaltung für das Funktionsprinzip, unter <http://physikkommunizieren.de/arduino/richtungshoeren-mit-arduino/> (16.02.2021) sind der Programmcode sowie der vollständige Schaltplan mit Taster, Display und Potentiometer abrufbar.

3 Experimente und Einsatzmöglichkeiten in der Schule

Die Einsatzmöglichkeiten der Schaltung in der Schule sind vielfältig. Exemplarisch für die Anknüpfungsmöglichkeiten im Physikunterricht wird der G9 Kernlehrplan Physik für das Land NRW herangezogen (Ministerium für Schule und Bildung des Lan-

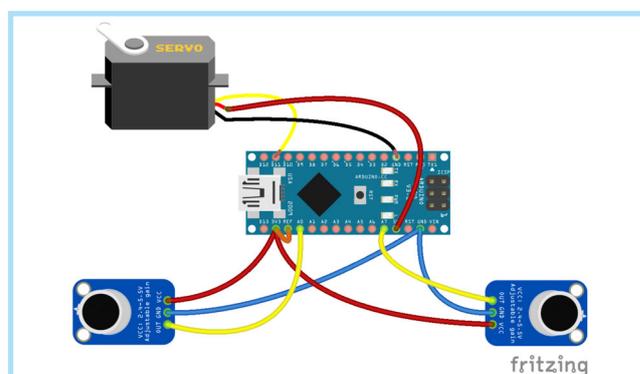


Abb. 3. Rudimentäre Messschaltung mit dem Arduino NANO mit dem ATmega328P Prozessor

des Nordrhein-Westfalen, 2019). Dieser sieht im „Inhaltsfeld 3 Schall“ u.a. die Entstehung und Ausbreitung von Schall, die Bedingungen, unter denen Hören funktioniert, sowie die Erklärung von Hör- und Orientierungsvorgängen vor (ebd., S. 16f.). Als Kompetenzerwartung im Bereich *Erkenntnisgewinnung* ist formuliert, dass Schülerinnen und Schüler „mittels in digitalen Alltagsgeräten verfügbarer Sensoren Schallpegelmessungen durchführen und diese interpretieren (E4, E5)“ sowie „Schallschwingungen und deren Darstellungen auf digitalen Geräten in Grundzügen analysieren (E5, UF3)“ (ebd., S. 27). Die folgenden Experimente können zusammen mit weiteren Experimenten zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit (z.B. PUSCH, 2019b), durchgeführt werden.

3.1 Experiment 1: Aus welcher Richtung kommt der Schall?

Die Schaltung ermöglicht bspw. verschiedene, zunächst sehr spielerische Experimente: so kann z. B. durch Schnipsen, Klatschen oder Klopfen an verschiedenen Positionen getestet werden ob die Schaltung die Richtung des Ursprungs erkennt und mit Hilfe eines Zeigers anzeigt (Abb. 4). Gleichzeitig wird auf dem Display der Laufzeitunterschied (z.B. 150 μ s) zwischen den Mikrofonen angegeben. Es lassen sich auch Messreihen wie in Abbildung 2 erzeugen und auswerten. Lernende können in diesem Einstiegsexperiment mit zugehaltenen Augen ebenfalls versuchen, die Richtung des Schalls zu erkennen.



Abb. 4. Spielerisches Ausprobieren der Messschaltung

3.2 Experiment 2: Welche Signale eignen sich?

Es zeigt sich schnell, dass die Schaltung nicht auf alle Signale gleich gut reagiert. So reagiert die Schaltung z.B. auf Sprache nicht zufriedenstellend, was sowohl an der Lautstärke als auch an

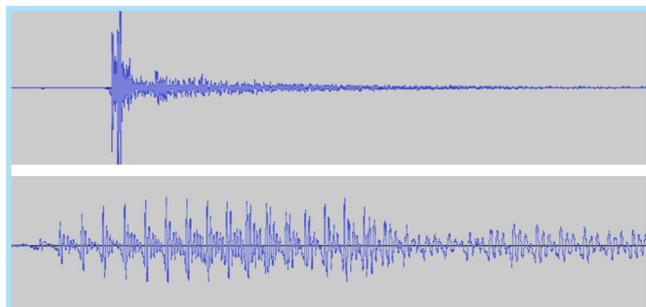


Abb. 5. Vergleich von kurzem Schallimpuls (Klatschen, oben) und Sprache (unten). Aufnahme mit Audacity, gleiche Zeit- und Amplitudenskala.

der Art des Signals liegt. Während Schnipsen, Klatschen oder Klopfen idealerweise ein zeitlich sehr kurzes Signal (ein „Impuls“) mit großer, schnell abklingender Amplitude ist, besteht z. B. Sprache aus längeren Signalen unterschiedlicher Amplituden und Frequenzen (vgl. Abb. 5). Der vergleichsweise einfache Analysealgorithmus der Schaltung kann zeitlich ausgedehnte Signale nicht auseinanderhalten. Vergleichsaufnahmen wie in Abbildung 5 können durch die Lernenden bspw. mit Audacity (<https://www.audacityteam.org>, 16.02.2021) oder entsprechenden Smartphone-Apps selbst aufgenommen, analysiert und interpretiert werden, um die Eignung verschiedener Signale für die Schaltung zu beurteilen.

3.3 Experiment 3: Was beeinflusst das Richtungshören?

Ist eine geeignete Signalquelle gefunden, kann experimentell überprüft werden, welche Einflüsse das Richtungshören (mittels Laufzeitunterschied) stören. Sind z. B. Wände oder schallabsorbierende Gegenstände (z. B. Tafelschwamm) vor den Mikrofonen, ändert sich auch die daraus angezeigte Richtung (Abb. 6).



Abb. 6. Sind Hindernisse im Schallweg, kann die Schaltung die Richtung nicht mehr genau bestimmen

Werden diese Experimente analog am eigenen (funktionierenden) Gehör durchgeführt, so kann der Richtungseindruck von der Anzeige der Schaltung abweichen. Dies zeigt, wie das Gehirn u. a. durch Einbezug von Lautstärke und basierend auf der Anatomie der Ohrmuschel, den Richtungseindruck bildet. Mit Hilfe der Schaltung kann auch bei einem der Mikrofone schrittweise der Verstärkungsfaktor verringert werden.

3.4 Experiment 4: Auswirkung von Abstand, Winkel und Absorption

Die Schaltung kann in einem weiteren Modus auch die Lautstärke anzeigen und somit für weitere Experimente wie bspw. die Untersuchung der abnehmenden Lautstärke mit zunehmendem Abstand oder Winkel von der Schallquelle analysieren. Auch Experimente zur Abschirmung z. B. mit Hindernissen oder absorbierenden Materialien sind möglich.

Es lässt sich bspw. die gesellschaftliche Debatte um den Abstand von Windrädern zu Wohngebieten oder Maßnahmen zum Schallschutz an Auto- und Eisenbahnlagen thematisieren. ARX & HOLLENSTEIN (2017) beschreiben bspw. eine Unterrichtseinheit zum Thema Lärm für die auch eine Lautstärkemessschaltung mit Arduinos anstelle von Smartphones zur Messung verwendet werden kann.

3.5 Fächerübergreifender Einsatz

Im Kernlehrplan für die Gesamtschule in NRW zum Fach Naturwissenschaften zeigen sich exemplarisch inhaltsfeldübergrei-

fende Anknüpfungsmöglichkeiten zwischen dem Inhaltsfeld „Sinne und Wahrnehmung (3)“ der Biologie (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2013, S. 27) und dem Inhaltsfeld „Sinneswahrnehmungen mit Licht und Schall (2)“ sowie den damit verbundenen Kompetenzerwartungen (ebd. S. 93). Hier können mit Hilfe der Schaltung und entsprechenden Experimenten bspw. die Möglichkeiten und Grenzen der Sinneswahrnehmung samt Funktionsweise des Richtungshörens beim Menschen thematisiert werden. Neben diesen sind auch weitere fächerübergreifende Einsatzszenarien denkbar: bspw. die gemeinsame Thematisierung der menschlichen Sinne in Physik und Biologie, der Nachbau der Schaltung samt Gehäuse aus dem 3D-Drucker im Technikunterricht und der Zugriff und Überarbeitung der Programmierung im Fach Informatik.

4 Ausblick

Durch die Beschränkung auf die Auswertung der Laufzeitdifferenz zur Bestimmung der Richtung zeigt die Schaltung in verschiedenen Experimenten (bspw. Hindernisse / Schlauch vor einem Mikrofon etc.) auch, wie eine Einschränkung von einzelnen Sinnen direkt die gesamte Wahrnehmung der Umwelt einschränken kann. Auf der anderen Seite ermöglicht die Schaltung aber gehörlosen oder eingeschränkt hörenden Personen experimentelle Teilhabe an der Thematik.

Ein Video der Schaltung im Betrieb, die Teilleiste, der vollständiger Schaltplan, der Programmcode zum Betrieb sowie zur Aufnahme der Daten für Abbildung 2 sowie die 3D-Teile finden sich unter <http://physikkommunizieren.de/arduino/richtungs hoeren-mit-arduino/> (16.02.2021).

Literatur

VON ARX, M. & HOLLENSTEIN, D. (2017). Rund um den Lärm. *Unterricht Physik*, Heft 161, 32–35.

BEAR, M., CONNORS, B. & PARADISO M. (2018). *Neurowissenschaften. Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie*. Springer.

KOHLRAUSCH, A., BRAASCH, J., KOLOSSA, D. & BLAUERT, J. (2013). An Introduction to Binaural Processing. In J. BLAUERT (Hg.), *The Technology of Binaural Listening* (1–32). Berlin, Heidelberg: Springer.

Ministerium für Schule und Bildung des Landes Nordrhein-Westfalen. (2019). Kernlehrplan für die Sekundarstufe I Gymnasium in Nordrhein-Westfalen. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/lehrplan/208/g9_ph_klp_%203411_2019_06_23.pdf (15.09.2020)

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (2013). *Kernlehrplan für die Gesamtschule – Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen. Naturwissenschaften Biologie, Chemie, Physik*. https://www.schulentwicklung.nrw.de/lehrplaene/upload/klp_SI/GE/NW/KLP_GE_NW.pdf (16.02.2021)

PUSCH, A. (2019a). Arduino im Physikunterricht. *Physikjournal*, 18(5), 26–29.

PUSCH, A. (2019b). Schnell wie der Schall. Experimente zur digitalen Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in unterschiedlichen Medien. *Naturwissenschaft im Unterricht Physik*, Heft 171/172, 69–71.

NILS HAVERKAMP studiert Physik und Mathematik auf Lehramt für Sek II an der WWU Münster. nils.haverkamp@wwu.de

Dr. ALEXANDER PUSCH ist Studienrat im Hochschuldienst an der WWU Münster, Institut für Didaktik der Physik. alexander.pusch@wwu.de