

Physik und Tontechnik

Jürgen Kirstein und Volkhard Nordmeier

Freie Universität Berlin, Didaktik der Physik
juergen.kirstein@physik.fu-berlin.de

Kurzfassung

Audiomedien sind ein fester Bestandteil unserer Lebenswelt. Sie transportieren Musik, Wort oder O-Töne, begleiten Bilder in Fernsehen und Kino und sind dank moderner Kommunikationstechnologie an jedem Ort und jederzeit verfügbar. Die Produktion dieser Medien ist uns jedoch weniger vertraut. Insbesondere die der Audioproduktion und den Geräten der Studioteknik zugrundeliegenden physikalischen Prinzipien sind allgemein nicht bekannt und werden in der Regel auch im Physikunterricht nicht oder nur beispielhaft thematisiert. Dieses Feld bietet aber eine Fülle von Lerngelegenheiten für grundlegende Inhalte der Schulphysik und damit einen relevanten Beitrag zur multiperspektivischen Wahrnehmung der Physik.

1. Motivation

Tontechnische Probleme werden (auch in der Schule) spätestens dann offenbar, wenn etwas nicht funktioniert: Die Verstärkeranlage brummt, die mikrofonverstärkte Rede beginnt mit einem lautstarken Pfeifen, beim Auftritt der Schulband ist die Sängerin kaum zu hören oder eine Tonaufnahme im Unterricht scheitert daran, dass das Mikrofon scheinbar nicht funktioniert. Meist stecken dahinter keine technischen Defekte, sondern grundlegende physikalisch-technische Ursachen, die sich im Rahmen der Schulphysik verstehen lassen.

Physikalisches Wissen kann hier sichtbar und nützlich werden. Die Anwendung physikalischer Kenntnisse in tontechnischen Kontexten erfordert zudem oft kooperatives Handeln zur Lösung von Problemen (oft auch unter Zeitdruck) unter Rückgriff auf vorhandenes Wissen und der Vernetzung von Wissen aus verschiedenen Lernbereichen. Im Physikunterricht werden tontechnische Kontexte neben vielen anderen meist jedoch auf einige wenige Anwendungsbeispiele reduziert, wie elektrodynamische Schallwandler als Lautsprecher und Mikrofon, die Klanganalyse oder die CD als Schallspeicher [1]. Sicher haben solche Beispiele für Lernphasen wie Anwenden, Üben, Vertiefen oder Festigen physikalischer Inhalte auch eine Berechtigung. Bezüge zu Außerfachlichem herstellen, die Interessen der Lernenden aufgreifen, Lernprodukte erstellen, die Funktion und Bedeutung vielseitiger Erfahrungen erkennen, Verantwortung übernehmen, Lösungswege reflektieren, selbstständig Entscheidungen treffen und sich aktiv an der Gestaltung von Unterricht beteiligen. Diese Anforderungen, die heutige Lehrpläne [2] an den (Physik-) Unterricht stellen, lassen sich in tontechnischen Medienprojekten der Schule – teilweise auch mit der Unterstützung externer Partner – umsetzen. Es zeigt sich dabei, dass gerade der Physikunterricht wesentlich zum Erfolg dieser Projekte beitragen kann und für die Lernenden

deutlich werden lässt, welche Bedeutung fachliche Kompetenzen in den schulüblichen Themenbereichen wie beispielsweise den Schwingungen und Wellen, der Elektrostatik, der elektromagnetischen Induktion oder den Wechselstromkreisen haben.

2. Tontechnik im Kontext der Schulphysik

Die nachfolgend behandelten Beispiele zu Themen aus der professionellen Tontechnik stehen in enger inhaltlicher Beziehung zu traditionellen Inhalten der Schulphysik und wurden zum Teil bereits in [7] vorgestellt. Diese Beispiele bieten interessante und bedeutungsvolle Kontexte [3], die über die unterrichtsüblichen Beispiele hinausgeht. Sie machen hinter der oft sehr komplexen technischen Fassade der Tontechnik elementare physikalische Zusammenhänge und Prinzipien sichtbar, die in der Technik kreativ genutzt werden.

2.1. Mikrofone aus der Nähe betrachtet

Elektrodynamische Wandler in Mikrofonen enthalten eine Membran, die mit einer Spule verbunden, im Schallfeld zu Schwingungen angeregt wird. Beim elektrodynamischen Mikrofon, dem traditionellen Unterrichtsbeispiel aus der Tontechnik, wird die Signalspannung U durch die Bewegung der Spule in einem Permanentmagneten induktiv erzeugt und hängt nach dem Induktionsgesetz

$$U = \dot{\phi}$$

auch von der Geschwindigkeit der Membranbewegung ab. Dynamische Mikrofone besitzen demnach eine Frequenzabhängigkeit, die durch akustische und elektrische Maßnahmen wieder kompensiert werden muss. Das System aus Membran und Schwingspule besitzt zudem eine große Masse, reagiert also bedingt durch die Massenträgheit nicht sehr schnell.

In der Studioteknik werden daher häufiger Mikrofone eingesetzt, deren schwingende Membran nur aus einer sehr dünnen, goldbedampften Kunststoffolie

besteht, die wegen ihrer kleinen Masse sehr schnell auf impulsartige Schallereignisse reagieren kann. Bei diesen Kondensatormikrofonen ist die Signalspannung nur von der Auslenkung der Membran abhängig, sie geben also in erster Näherung eine frequenzunabhängige Signalspannung ab. Den Aufbau des Kondensatormikrofons, der dieses Thema für den Unterricht interessant macht, zeigt die nachfolgende Abbildung 1.

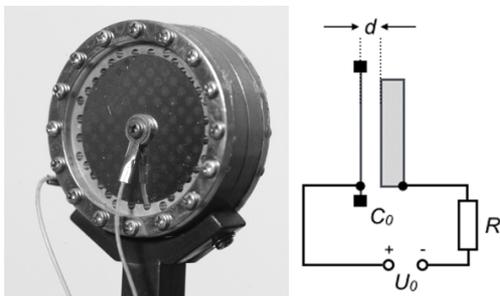


Abb. 1: Kapsel eines Großmembran-Kondensatormikrofons mit Prinzipschaltbild (Niederfrequenzschaltung) nach [6].

Die leitende Membran dieses elektrostatischen Wandlers ist in einem Abstand d von einigen $10 \mu\text{m}$ zu einer massiven Gegenelektrode montiert. Das Volumen zwischen beiden Elektroden ist luftgefüllt. Damit ist die Ruhekapazität C_0 der Kapsel des Kondensatormikrofons wie beim Plattenkondensator gegeben durch den bekannten Zusammenhang:

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

Die Mikrophonkapsel wird über den Widerstand R mit einer Gleichspannung U_0 aufgeladen, die bei etwa 100 V liegt. Wählt man den Widerstand R so, dass die Zeitkonstante

$$\tau = RC_0$$

des aus Kapselkapazität und Widerstand gebildeten Hochpasses groß ist gegen die größte Schwingungsdauer der Membran, bleibt die Ladung Q der Kapsel konstant und die Spannung an der Kapsel U_K ändert sich proportional zur Kapazität im Schallwechselfeld:

$$U_K(t) = QC(t)$$

Für eine gegebene Kapselkapazität (50 pF bis 100 pF) ergibt sich daraus die untere Grenzfrequenz f_G des Mikrofons zu:

$$f_G = \frac{1}{2\pi RC}$$

Für Experimente zum Kondensatormikrofon bieten sich schulübliche Komponenten für Aufbaukondensatoren an, bei denen man eine Platte beweglich (schwingend) aufhängt.

2.2. Signalübertragung

Ein grundlegendes Problem der Tontechnik ist die störungsfreie Übertragung der von Mikrofonen erzeugten sehr kleinen Wechselspannungen über große Entfernungen von teilweise einigen hundert Metern.

Ein dynamisches Mikrofon erzeugt zum Beispiel bei einem effektiven Schalldruck von 1 Pa eine effektive Wechselspannung von 1 bis 2 mV (Kondensatormikrofone etwa eine Größenordnung mehr).

Bei der oft üblichen sogenannten unsymmetrischen Übertragung des Signals über eine einadrig geschirmte Leitung kann sich der Signalspannung U_e eine Störspannung U_s durch äußere elektrische oder magnetische Wechselfelder überlagern:

$$U_a = U_e + U_s$$

Häufig entstehen Störungen („Brummen“) dadurch, dass über den Schirm der Leitung Ausgleichsströme zwischen Schutzgeerdeten Geräten fließen, was oft durch (gefährliches) Unterbrechen des Schutzleiters am Gerätestecker der Netzleitung behoben wird.

Ein Modellversuch (Abb. 2) demonstriert die in der Tontechnik angewandte Lösung: Man verwendet eine geschirmte Übertragungsleitung mit zwei eng beieinander liegenden Innenleitern sowie eingangs- und ausgangsseitig je einen Transformator (Übertrager). Gegen das 0 -Volt-Potenzial des Schirms sind die Signale der Innenleiter invertiert. Bringt man diese Leitung nun in ein Störfeld, so wird die gleiche Störspannung in beide Innenleiter induziert. Da der Übertrager am Ausgang der Leitung nur die Potentialdifferenz der Innenleiter berücksichtigt, hebt sich das Störsignal durch Differenzbildung auf:

$$U_a = (U_e + U_s) - (-U_e + U_s) = 2U_e$$

Im Versuchsaufbau befindet sich ein Sinusgenerator mit Leistungsverstärker, der an die Primärspule des Ausgangsübertragers (zwei Spulen mit je $N = 2500$) angeschlossen ist. Die Sekundärspule dieses Übertragers ist mit den beiden Innenleitern der symmetrischen Leitung verbunden. Auf der rechten Seite wird das Signal über den zweiten, gleich dimensionierten Übertrager zum Oszilloskop geführt.



Abb. 2: Versuchsaufbau zur Demonstration der symmetrischen Leitungsübertragung.

Das Störfeld erzeugt die Primärspule ($N = 1000$) in einem Aufbautransformator über ein Wechselspannungsnetzgerät (24 V). Eine handelsübliche symmetrische Mikrofonleitung bildet mit mehreren Windungen die Sekundärspule des Transformators. Mit diesem Aufbau lassen sich alle relevanten Signale bei Störungen durch magnetische Wechselfelder untersuchen. Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse des Modellversuchs. Während bei der symmetrischen Übertragung praktisch keine Veränderung des Eingangssignals zu beobachten ist, werden bei der unsymmetrischen Übertragung die Störungen deutlich dargestellt, sobald das Störfeld eingeschaltet wird.

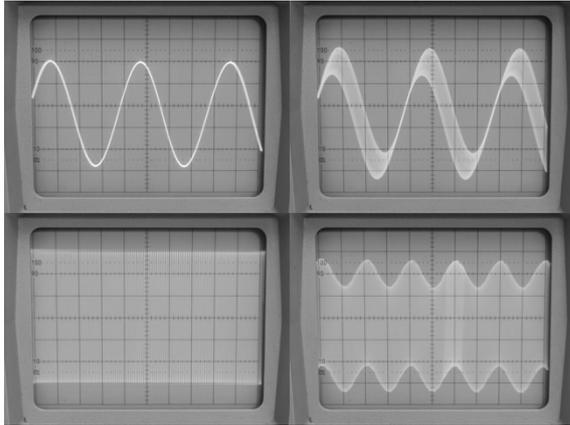


Abb. 3: Links oben das ungestörte Signal bzw. die Situation, die bei eingeschaltetem Störfeld bei symmetrischer Übertragung. Rechts daneben ist bei unsymmetrischer Beschaltung die Störung deutlich erkennbar. Darunter das Signal mit und ohne Störung bei veränderter Zeitablenkung.

2.3. Richtungshören und Stereophonie

Die von einer Schallquelle ausgehenden Wellen erreichen unsere Ohren im Allgemeinen mit verschiedenen Laufzeiten und Amplituden. Die Laufzeitdifferenz zwischen dem rechten und dem linken Ohr hängt von der Richtung der Schallquelle bezüglich des Kopfes und der Schallgeschwindigkeit ab. Da ein Ohr meist im Schallschatten vom Kopf liegt, erreicht es die Schallwelle nur durch Beugung oder Reflexion, wodurch sich auch die Amplitude richtungsabhängig ändert. Diese Laufzeit- und Amplitudendifferenzen ermöglichen die räumliche Lokalisierung.

Mit einem Kunstkopfmikrofon ist es möglich, diese Zusammenhänge näher zu untersuchen. Es besteht aus einer Nachbildung des menschlichen Kopfes mit ausgeformten Ohrmuscheln, in denen kleine Kondensatormikrofone angeordnet sind. Das Kunstkopfmikrofon wird über einen Lautsprecher beschallt (Abb. 4), wobei der Abstand zum Kunstkopfmikrofon viel größer als der Abstand d der Mikrofonkapseln im Kopf, so dass sich die auf den Kopf treffende Welle genähert als eben beschreiben lässt. Die Signale der Mikrofone stellt ein Oszilloskop dar. Das Kunstkopfmikrofon ist um seine vertikale Achse drehbar. Eine Skala ermöglicht das Ablesen des Drehwinkels α (s. Abb. 4, rechts unten).

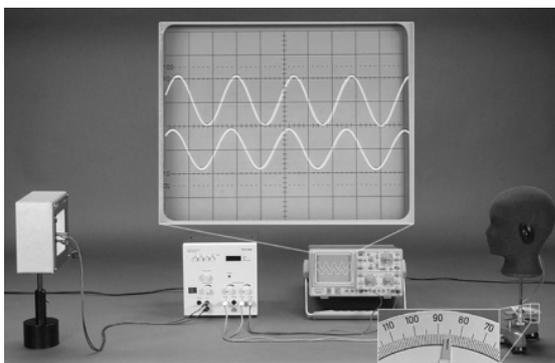


Abb. 4: Versuchsaufbau zur Messung der Laufzeitdifferenz mit einem Kunstkopfmikrofon.

Der Laufzeitunterschied Δt beim Auftreffen der ebenen Schallwelle lässt sich aus dem Mikrofonabstand d , dem Winkel α und der Schallgeschwindigkeit c nach

$$\Delta t = \frac{d}{c} \sin \alpha$$

bestimmen. Abbildung 5 zeigt den Vergleich zwischen dem theoretischen Zusammenhang (mit $d = 0,143$ m und $c = 344$ m/s) und den Messergebnissen.

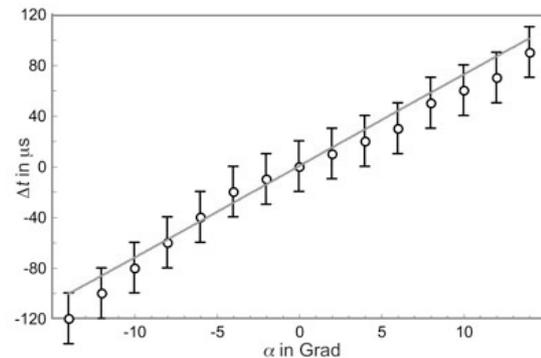


Abb. 5: Grafische Auswertung einer Messung mit dem Kunstkopfmikrofon.

Das Experiment zum Richtungshören ist insofern auch von Bedeutung, da für die stereofone Schallübertragung sowohl Laufzeit- als auch Amplitudenunterschiede eingesetzt werden.

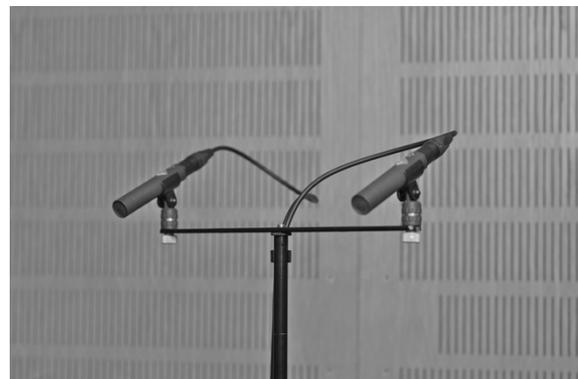


Abb. 6: Mikrofonanordnung für die Laufzeitstereophonie.

Bei der Laufzeitstereophonie (AB-Stereophonie) stellt man zwei Mikrofone in einem festen Abstand nebeneinander vor der Schallquelle auf (Abb. 6). Diese Mikrofonanordnung registriert - wie das Kunstkopfmikrofon - je nach Richtung des einfallenden Schalls verschiedene Laufzeitdifferenzen, die zwar auch mit geringen Amplitudendifferenzen verbunden sind, aber für die Richtungswahrnehmung bestimmend sind [6]. Bei der stereofonen Übertragung wird mit diesem Verfahren eine gute Raumillusion erreicht. Allerdings darf es auf dem gesamten Übertragungsweg, einschließlich aller Bearbeitungs- und Aufzeichnungsschritte zu keinen weiteren Phasenverschiebungen der Mikrofonensignale kommen, was unweigerlich eine Änderung der Richtungswahrnehmung zur Folge hätte. Aufgrund des sogenannten Kammfiltereffekts (s. u.) treten bei der AB-

Stereofonie Klangverfärbungen auf, wenn die phasenverschobenen Signale der Stereoübertragung L und R zu einem Monosignal M addiert werden, also die Wiedergabe nur über einen Lautsprecher erfolgt. Man verwendet die AB-Mikrofonanordnung daher meist nur dann, wenn der Abstand der Mikrofone zur Schallquelle groß ist. Also etwa zur Mikrofonierung größerer Klangkörper in der Musikproduktion und weniger für stereofone Wortproduktionen [5]. Für diese Zwecke spielen monokompatible Übertragungsverfahren eine zentrale Rolle. Das sind Verfahren, bei denen die Addition der Stereokanäle ohne Auslöschungen aufgrund von Phasenverschiebungen möglich ist. Bei der stereofonen Übertragung wird das durch eine Mikrofonanordnung erreicht, bei der zur Vermeidung von Laufzeitunterschieden zwei Mikrofonkapseln unmittelbar nebeneinander angeordnet sind (Abb. 7).

Die Stereosignale L und R einer solchen Mikrofonanordnung (auch als XY-Anordnung bezeichnet) unterscheiden sich nur in ihrer Amplitude; in der Ton-technik hat sich für dieses Verfahren der physikalisch unzutreffende Begriff der 'Intensitätsstereofonie' etabliert. Da also hier keine Phasenverschiebung im Stereosignal auftritt (es sei denn durch Übertragungsstörungen), kann es bei der Addition zum Monosignal keine Auslöschungen geben.



Abb. 7: Mikrofon für die Intensitätsstereofonie. Beide Mikrofonkapseln sind hier direkt übereinander angeordnet.

Für stereofone Audioproduktionen werden beide Verfahren meist gemischt angewendet und oft durch einzelne Monomikrofone ergänzt, deren Signale erst bei der Mischung über Richtungssteller ('Panoramapotenziometer') ebenfalls durch die Erzeugung von Amplitudendifferenzen in das Stereosignal eingefügt werden [5].

Stereoübertragungsverfahren wie auch die elektrische Bearbeitung von Stereosignalen bieten für den Unterricht ein ergiebiges Feld für Problemstellungen rund um Wechselspannungen, den Begriff der Phasenverschiebung und den Konsequenzen bei der Überlagerung von Wechselspannungen. Experimente lassen sich in diesem Themenfeld bereits mit einfachen Kondensatormikrofonen und Kleinmischpulten durchführen, die bereits auch in einfacher Ausführung über symmetrische Schaltungstechnik verfügen

und die für den Betrieb der Mikrofone erforderliche Versorgungsspannung bereitstellen. Derartige Geräte sind in der Schule dann nicht nur für Experimente im Physikunterricht, sondern universell für alle Audio-produktionen einsetzbar.

2.4. Kontrolle von Stereosignalen

Die akustische Kontrolle stereofoner Signale durch Lautsprecher soll eine exakte Lokalisation der reproduzierten Schallquelle(n) möglich machen. Im Regieraum stellt man dazu die Lautsprecher L_1 und L_2 so auf, dass sie mit der Hörposition H ein gleichseitiges Dreieck bilden und sich die Mittelsenkrechten der Lautsprecher an der Hörposition kreuzen. Strahlen beide Lautsprecher ein in Amplitude und Phase exakt gleiches, kohärentes Signal ab, nimmt man an einem Ort S zwischen den Lautsprechern (der Basis) eine Schallquelle, die sogenannte Phantomschallquelle, wahr. Der Ort dieser Schallquelle hängt – wie beim Richtungshören – sowohl von Amplituden- als auch von Phasendifferenzen der Signale ab. Wesentlich für die exakte Lokalisation ist daher, dass beide Lautsprecher den genau gleichen Abstand zum Hörer besitzen, damit keine zusätzlichen Amplituden- und Laufzeitdifferenzen auftreten. Die Hörposition (Sweet Spot) darf nicht verändert werden, die Beurteilung der Anordnung von Schallquellen bei der stereofonen Wiedergabe ist nur auf der Symmetrieachse möglich. Auch diese Bedingungen lassen sich im Experiment einfach nachvollziehen. Weiterhin sind die raumakustischen Eigenschaften des Regieraums, seine möglichst symmetrische Gestaltung und die Vermeidung schallreflektierender Flächen in der Nähe der Lautsprecher oder hinter der Hörposition ("Sweet Spot") von wesentlicher Bedeutung für die Qualität der akustischen Kontrollmöglichkeiten.

Da diese Bedingungen nicht immer leicht zu realisieren sind, werden im Studiobetrieb Phasenverschiebungen im Stereosignal (Monokompatibilität) zusätzlich mit speziellen Messgeräten, den Goniometern, überwacht. Diese Messgeräte sind in jeder Gerätesammlung vorhanden: Es sind im Prinzip Oszilloskope, die ohne Zeitablenkung im x-y-Betrieb eingesetzt werden. Die x-Achse wird dabei zur Darstellung des linken und die y-Achse zur Darstellung des rechten Kanals verwendet.



Abb.8: Oszilloskop im x-y-Betrieb zur Darstellung einer Phasenverschiebung zwischen L- und R-Signal. Das Mischpult mit seinen Filterschaltungen dient hier als Phasenschieber.

Die in Abbildung 8 gezeigte Phasenverschiebung im Stereosignal von $\pi/2$ wird im Mischpult durch einen

parametrischen Filter erzeugt, dessen Mittenfrequenz auf die Generatorfrequenz eingestellt ist. Derartige Filter werden durch Schaltungen von Kapazitäten, Induktivitäten und Widerstände als Sieb- oder Sperrkreise realisiert, so wie sie traditionell im Physikunterricht auch quantitativ thematisiert werden [1].

Im Kontext der Tontechnik hat dieses Thema nun eine ganz praktische Bedeutung, da bei der elektrischen Klangbearbeitung von Stereosignalen unter Umständen erhebliche Veränderungen der Stereoabbildung entstehen können.

Goniometer sind heute zusätzlich meist mit einem Messgerät für den Korrelationsgrad des Stereosignals ausgestattet. Für zwei kohärente, harmonische Wechselspannungen gleicher Frequenz mit der Phasenverschiebung φ ist der Korrelationsgrad r definiert durch:

$$r = \cos\varphi$$

Im Korrelationsgradmesser werden die beiden Signale L und R miteinander multipliziert und dann über ein RC-Glied integriert. Die so erzeugte Gleichspannung ist dann zum Korrelationsgrad r proportional

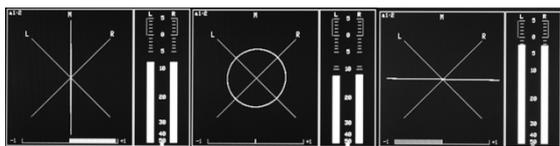


Abb. 9: Goniometer- und Korrelationsgradanzeigen für sinusförmige Stereosignale (v.l.n.r.): $\varphi = 0^\circ$, $r = +1$; $\varphi = 90^\circ$, $r = 0$; $\varphi = 180^\circ$, $r = -1$. Die Phasenverschiebung $\varphi = 90^\circ$ wurde durch Einschalten eines parametrischen Filters in einen Kanal erzeugt. Wenn man ein Stereosignal mit $r = -1$ durch Addition der Signale $L + R$ in ein Monosignal M umwandelt, ist dessen Amplitude 0.

Allgemein kontrolliert man mit diesem Messgerät natürlich keine sinusförmigen Wechselspannungen, sondern Musik- oder Wortproduktionen, die eine Überlagerung verschiedener Einzelsignale darstellen (Abb. 10).

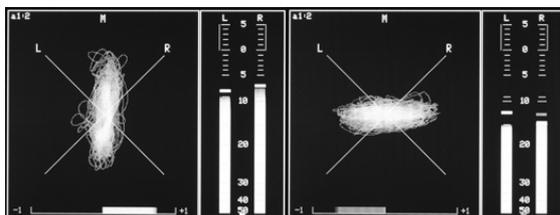


Abb. 10: Der Goniometerbildschirm zeigt links ein kompaktes Stereosignal. Das Signal rechts ist nicht monokompaktibel; der Korrelationsgrad ist < 1 .

Diese Zusammenhänge sind mit schulüblichen Oszilloskopen nachzuvollziehen. Allerdings ist bei einem Goniometer der Bildschirm um 45° gedreht, was die Zuordnung zwischen visueller und akustischer Kontrolle vereinfacht. Mit dem Goniometer lassen sich natürlich auch umgekehrt alle Darstellungen erzeugen, wie sie mit einem Oszilloskop im x-y-Betrieb möglich sind (Abb. 11).

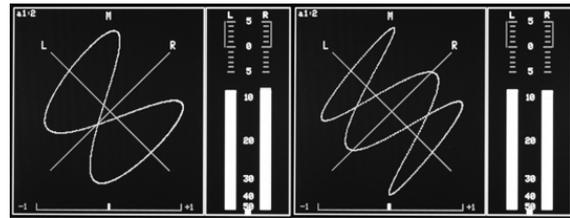


Abb. 11: Da das Goniometer nichts anderes als ein Oszilloskop mit gedrehtem Bildschirm im x-y-Betrieb ist, lassen sich auch Lissajous-Figuren darstellen, hier für die Frequenzverhältnisse 1:2 und 1:3.

2.5. Stehenden Wellen und der Kammfiltereffekt

Wie bereits in Abschnitt 2.3 angesprochen, treten aufgrund des sogenannten Kammfiltereffekts bei der AB-Stereofonie Klangverfärbungen auf, wenn die laufzeitverschobenen Mikrofonsignale L und R zu einem Monosignal M addiert werden. Ein äquivalentes Problem besteht dann, wenn von der Schallquelle ausgehender Direktschall und reflektierter Schall (frühe Reflexionen an harten Begrenzungsflächen) am Ort eines Mikrofons interferieren. Klangverfärbungen sind die Folge, die man möglichst vermeiden will.

Ein klassisches Experiment in der Fachsystematik des Physikunterrichts ist der Nachweis stehender Schallwellen und ggf. die Bestimmung der Schallgeschwindigkeit. Tastet man eine stehende Welle fester Frequenz mit einem Sondenmessmikrofon durch Verschieben ab, so lassen sich ortsfeste Schwingungsknoten und -bäuche beobachten (vgl. Abbildung 12, links). Der Abstand benachbarter Knoten entspricht dabei der halben Wellenlänge.

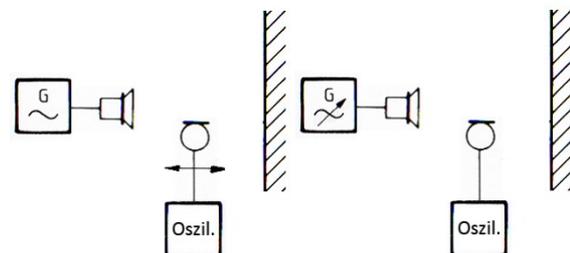


Abb. 12: Links: Der Lautsprecher strahlt auf eine harte Wand. Durch Verschieben des Mikrofons tastet man Knoten und Bäuche der stehenden Welle bei konstanter Frequenz ab. Rechts: In diesem Aufbau ist das Mikrofon nun ortsfest und die Frequenz wird variiert.

Verändert man bei feststehendem Mikrofon am Ort x die Frequenz ω des Generators, verändert sich die Wellenlänge λ – die Knoten und Bäuche der stehenden Welle "wandern" am Ort des Mikrofons vorbei. Das Experiment zeigt, dass bereits ein kleiner Wechsel der Perspektive von der unterrichtsüblichen Behandlung eines Themas hin zu einem bedeutungsvollen Kontext führt.

Dieser Kammfiltereffekt entsteht allgemein immer dann, wenn zwei harmonische Funktionen mit der Laufzeitdifferenz Δt überlagert werden:

$$g(t) = \sin\omega t + \sin\omega(t + \Delta t).$$

Schwingungsknoten am festen Ort des Mikrofons treten immer dann auf, wenn für $n = 1, 2, 3, \dots$ gilt:

$$\begin{aligned}\omega t + (2n - 1)\pi &= \omega(t + \Delta t) \\ (2n - 1)\pi &= \omega\Delta t \\ \omega_n &= \frac{(2n - 1)\pi}{\Delta t}\end{aligned}$$

bzw.

$$f_n = \frac{2n - 1}{2\Delta t}.$$

Der Frequenzgang des Kammfilters lässt sich im Experiment nachvollziehen (vgl. Abbildung 14), wenn man die Schalllaufzeit des an der Wand reflektierten Signals berücksichtigt ($\Delta t = 2d/c$, d Abstand zwischen Mikrofon und Wand).

Steht für die Schule ein Computer mit einem Programm zur mehrkanaligen digitalen Aufzeichnung, Bearbeitung und Mischung von Audiosignalen (Sequencer) zur Verfügung, lassen sich auch damit Experimente zum Kammfiltereffekt durchführen. Dazu wird das vom programm-eigenen Generator erzeugte sinusförmige Sweep-Signal auf einer Spur aufgezeichnet und dann auf eine zweite Spur dupliziert (vgl. Abbildung 13, links).



Abb. 13: Experiment zum Kammfiltereffekt mit einem Sequencer.

Die identischen Signale beider Spuren summiert ein virtueller Mischer. Dabei ist in den einen Kanal des Mixers ein Verzögerungsglied (Delay) eingeschaltet. Das Summensignal läuft nun über ein Plugin, das über eine Frequenzanalysatorfunktion verfügt. Bei der Wiedergabe des Sweep-Signals wird die Kammfilterkurve aufgezeichnet.

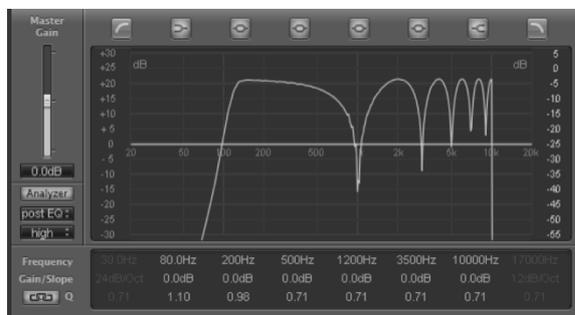


Abb. 14: Frequenzgang des Kammfilters bei einer Verzögerungszeit von 0,5 ms. Der erste Einbruch der Frequenz erfolgt dann bei $f_1 = 1$ kHz. Aufgrund der logarithmischen Frequenzskala ist der Abstand der weiteren Frequenzeinbrüche f_n nicht äquidistant.

2.6. Magnetische Schallspeicherung

Glücklicherweise ist auch die magnetische Speicherung analoger Signale nicht vollständig aus der Tonstudioteknik verschwunden. Auch viele digitale Speicher basieren auch heute noch auf diesem Prinzip (Festplatte). Für den Physikunterricht (oder auch die Medienwerkstatt) ist das Magnetbandgerät nicht nur im Rückblick auf eine historisch bedeutende Speichertechnologie von Wert. An dieser Stelle soll damit aber nicht das Prinzip der magnetischen Schallspeicherung mit einem ferromagnetischen Band weiter besprochen werden. Das Magnetbandgerät stellt vielmehr auch eine Wellenmaschine der besonderen Art dar.



Abb. 15: Magnetbandgerät für Rundfunkzwecke um 1980. Noch heute werden solche Geräte für verschiedene Aufgaben in der Studioteknik eingesetzt.

Das mit konstanter Geschwindigkeit bewegte, periodisch magnetisierte Tonband entspricht einer laufenden Welle. Die Magnetisierung ändert sich periodisch sowohl räumlich als auch zeitlich am Ort des Wiedergabekopfes. Die Bandgeschwindigkeit v entspricht dabei der Phasengeschwindigkeit der Welle. Bei einer in der Studio- und Rundfunktechnik üblichen Bandgeschwindigkeit von $v = 38,1$ cm/s ergeben sich nach dem bekannten Zusammenhang

$$v = \lambda f$$

Wellenlängen λ von 1 cm bei einer Frequenz von $f = 40$ Hz bis zu 25 μm bei 15 kHz.

Läuft das periodisch magnetisierte Band am Hörkopf vorbei, so ergibt sich aus dem Induktionsgesetz, dass die induzierte Spannung mit der Frequenz f zunehmen sollte. Allerdings nimmt diese Spannung bei großen Frequenzen ab. Woran liegt das? Wird für große Frequenzen die Wellenlänge λ gleich der Spaltbreite d des Hörkopfes, kann prinzipiell keine Spannung mehr induziert werden. Je kleiner die Bandgeschwindigkeit ist, desto kleiner ist also die obere Grenzfrequenz der Magnetaufzeichnung [5].

Mit den im Physikunterricht üblichen Aufbaustransformatoren lässt sich auch die magnetische Schallaufzeichnung in einem Modellexperiment zum Magnetbandgerät nachvollziehen. Dazu wird aus einer Spule und einem U-Kern mit Joch ein Modell eines Sprechkopfes gebaut. Der für die Magnetisierung erforder-

liche schmale Spalt wird einfach mit einem zwischen U-Kern und Joch eingeklemmten Papierblatt realisiert. Die Spule wird über einen Sinusgenerator mit Leistungsverstärker angeschlossen. Für die Wiedergabe des aufgezeichneten Signals ist ein zweiter Magnetkopf und eine Verstärkung für die Darstellung des Signals auf einem Oszilloskop oder für die Lautsprecherwiedergabe erforderlich. Zudem muss das Band mit konstanter Geschwindigkeit an den Köpfen vorbeigeführt werden. In unserem Versuchsaufbau (vgl. Abbildung 16) haben wir dafür eine Magnetbandmaschine mit Wiedergabefunktion eingesetzt.

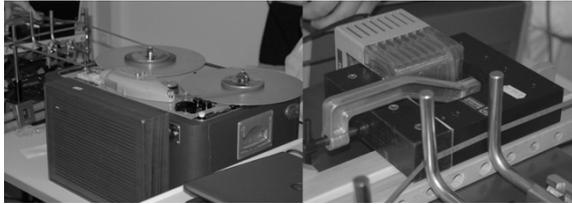


Abb. 16: Modellexperiment zur magnetischen Schallspeicherung. Der Antrieb des Magnetbands und die Wiedergabe des aufgezeichneten Signals erfolgt über eine Studiobandmaschine. Rechts im Detail das Modell des Sprechkopfs. Die Spaltbreite wird durch ein eingeklemmtes Blatt Papier definiert.

Für derartige Experimente ist es sinnvoll, sogenanntes Standardband mit einer Dicke von $50\ \mu\text{m}$ zu verwenden. Dünnere Bandmaterialien sind mechanisch nicht ausreichend belastbar.

Der Sprechkopf besitzt neben dem sogenannten Arbeitsspalt, über den das vorbeilaufende Band magnetisiert wird, auf seiner Rückseite noch einen weiteren Spalt, den ‚Scherspalt‘. Dieser Begriff kommt daher, dass abhängig von der Breite des Scherspalt die Hysteresekurve des Kopfes geschert wird. Auch diesen Effekt kann man im Experiment mit dem Modell des Sprechkopfes nachweisen, wenn man die Hysteresekurve mit dem Oszilloskop dynamisch darstellt (ersatzweise könnte man dafür natürlich auch ein Goniometer verwenden). Über dem Scherspalt lassen sich also die magnetischen Eigenschaften des Sprechkopfes beeinflussen.

2.7. Tontechnik und Atomphysik

In der Tontechnik werden Signale häufig nicht nur in ihrem zeitlichen Verlauf, sondern auch in ihrer spektralen Zusammensetzung analysiert. Für die Frequenzanalyse erlauben heute bereits Apps wie ‚phyphox‘ (<https://phyphox.org/de/home-de/>) die spektrale Darstellung eines Audiosignals. Auch in der Schulbuchliteratur [1] ist dies als Klanganalyse ein übliches Thema.

Weniger bekannt ist, dass auch die Unschärferelation, die im Physikunterricht der Schule erst als abstrakter Zusammenhang in der Atomphysik wieder auftritt, in der Tontechnik eine sehr konkrete und praktische Bedeutung hat. Impulsartige Schallereignisse besitzen nach der Frequenz-Zeit-Unschärfe

$$\Delta t \Delta f \approx 1$$

eine große spektrale Breite [6]. Je kürzer die Dauer Δt des Schallereignisses ist, desto größer die Bandbreite Δf des Signals, das zum Beispiel von einem Messmikrofon empfangen wird. Im Experiment (vgl. Abbildung 17) wird zum Nachweis ein Pulsgenerator verwendet, bei dem die Pulsbreite einstellbar ist. Die spektrale Analyse erfolgt mit einem Goniometer, das wie viele Geräte dieser Art auch über einen FFT-Spektralanalysator verfügt.



Abb. 17: Das mit einem FFT-Spektrometer (rechts) dargestellte Frequenzspektrum eines Pulssignals.

Natürlich kann als Signalquelle auch ein Mikrofon eingesetzt werden, das impulsartige Schallereignisse verarbeiten kann, vorzugsweise also ein Kondensatormikrofon. Dann erzeugt man den Schallimpuls zum Beispiel mit einer Funkenentladung oder einem Knackfrosch, der sich auch bestens zum ‚Ausknallen‘ von Räumen bewährt. Hierbei werden die Eigenschwingungen eines Raumes breitbandig angeregt und die spektrale Analyse erfolgt im einfachsten Fall mit dem geschulten Gehör.

Derartige Messung auf Grundlage der Frequenz-Zeit-Unschärfe werden mit verfeinerten messtechnischen Mitteln auch eingesetzt, um die bei der Beschallung kritischen Rückkopplungsfrequenzen zu identifizieren, die sich dann mit Filtern schmalbandig unterdrücken lassen.

3. Zusammenfassung und Anregungen für den Unterricht

Guter (Physik-) Unterricht zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass anschauliches und interessantes Lernmaterial bereitgestellt ist, an dem die Lernenden sich fachliche Inhalte selbstständig im Rahmen bedeutungsvoller Kontexte erarbeiten können. Die Tontechnik bietet ein didaktisch lohnendes Feld für Problemstellungen, an denen sich die Inhalte des fachsystematisch orientierten Physikunterrichts bedeutungsvoll und lebensweltbezogen erarbeiten lassen. Tontechnische Themen können somit als mehr als nur reine Anwendungsbeispiele sein, wie die Beispiele zeigen. Die Tonstudioteknik deckt schulphysikalische Inhalte in großer Breite ab – vom Plattenkondensator bis hinein in die Atomphysik. Teilweise reicht bereits ein kleiner Wechsel der Perspektive, um von einem fachsystematisch relevanten Inhalt zu einem kontextorientierten Thema zu gelangen, wie das Beispiel des Kammfiltereffekts zeigt.

Kompetenzorientierte Aufgaben im Bereich der Tontechnik ermöglichen das selbstständige Problemlösen in relevanten Situationen, sie fördern die Eigenaktivität der Lernenden und erfordern das Zurückgreifen

auf früher gelernte Inhalte des Physikunterrichts auch in Transferprozessen. Das Fach erlangt damit eine Bedeutung, die auf das Interesse positiv wirken kann.

Lerndokumentationen haben für das kompetenzorientierte Lernen einen besonderen Stellenwert. Eine Möglichkeit dazu liegt im Kontext dieses Themas auch darin, Lernergebnisse im Rahmen einer Audioproduktion zu dokumentieren, bei der das Gelernte angewendet und vor allem hörbar gemacht wird. Derartige Projekte, die der Physikunterricht mit begleiten kann und sollte, steigern die Lernqualität durch schüler-eigene Erfolgsziele, durch Teamarbeit und Selbstorganisation. Projektlernen wird so zum festen Bestandteil der Lernkultur einer Schule. Die Tontechnik gewährleistet dabei die (schul)öffentliche Sichtbarkeit der eigenen Lernprodukte. Dafür sollte den Schülerinnen und Schülern die Nutzung von Schulräumen für eigene Aktivitäten ermöglicht werden, etwa im Rahmen einer Medienwerkstatt in der Schule, die mit geeigneten (semi)professionellen tontechnischen Geräten ausgestattet ist, auf die dann auch der Physikunterricht für die Arbeit an den physikalisch-technischen Anteilen der Medienkompetenz zurückgreifen kann.

4. Literatur

- [1] Diehl, B. et al. (2008): Physik Oberstufe, Cornelsen, Berlin.
- [2] Exemplarisch sei hier verwiesen auf: www.berlin.de/sen/bildung/schulorganisation/lehrplaene/ (20.05.2023)
- [3] Muckenfuß, H. (1995): Physik im sinnstiftenden Kontext, Cornelsen, Berlin.
- [4] Dickreiter, M. (1997): Handbuch der Tonstudientechnik, Saur, München.
- [5] Meschede, D. (Hg.) (2002): Gerthsen Physik, Springer, Berlin u.a.
- [6] Kirstein J.; Nordmeier, V.: Tontechnik im Kontext der Schulphysik. In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 3/59 (2010), S. 27