

Akustik mit der Soundkarte

Volkhard Nordmeier

*„Musik wird oft nicht schön empfunden,
weil sie stets mit Geräusch verbunden.“
(Wilhelm Busch)*

Soundkarten sind heute Bestandteil eines jeden Computersystems. Diese multimedialen Komponenten liefern den Sound zu Computerspielen und die Musik vom CD- oder softwaregestützten MP3-Player. Mit ihrer Hilfe lassen sich aber auch Sprach- oder Musiksequenzen digitalisieren, bearbeiten und analysieren oder wieder akustisch ausgeben.

Die Soundkarte stellt daher ein ideales Werkzeug für den Einsatz im Physikunterricht und insbesondere im Bereich der Akustik dar: Sie kann als äußerst preiswerter und komfortabler Sinus- bzw. Funktionsgenerator, Zweikanaloszilloskop, digitaler Sampler oder Spektrumanalyser eingesetzt werden.

In diesem Beitrag sollen neben den Möglichkeiten des Einsatzes der Soundkarte als Messinterface vor allem einfache aber eindrucksvolle Experimente beschrieben werden, die mit Hilfe von Mikrofonen, Computerboxen oder Kopfhörer und passender Software auch im Hausexperiment durchgeführt werden können.

1. Die Soundkarte - Messwerterfassung ‚low-cost‘

Ein wesentliches Einsatzgebiet von Computern im Physikunterricht stellt die Aufnahme, Darstellung und Aufbereitung von Messwerten dar. Wirft man einen Blick in die aktuellen Computerzeitschriften oder Zubehörkataloge, so entfaltet sich dort ein fast unüberschaubares Angebot an Messwertaufnahmesystemen. Das Repertoire an Elektronik zum Datentransfer erstreckt sich über einen weiten Bereich: Von einfachen Analog-Digital-Wandlern (AD-Wandler) bis hin zu komfortablen PC-Messkarten mit zugehörigen Beschaltungselementen und (optionalen) Messfühlern¹; von klassischen Messgeräten wie beispielsweise elektronische Waagen oder Oszilloskope mit eingebauter Computerschnittstelle bis hin zu äußerst preiswerten ‚Handgeräten‘ wie z.B. Digitalmultimetern (DMM), die zum Zweck der Datenerfassung oftmals schon mit einem AD-Wandler ausgestattet sind und problemlos direkt über die serielle oder USB-Schnittstelle an einen PC angeschlossen werden können (vgl. z.B. [2]).

Die weit verbreiteten PC-Soundkarten erweisen sich im Bereich der Messwerterfassung als kostengünstige Alternative (vgl. z.B. [1], [5], [6], [10] u. [11]). Die technischen Eigenschaften der Soundkarte sind speziell abgestimmt auf ihren spezifischen Anwendungsbereich, die Verarbeitung akustischer Signale. Die Diskretisierung (Digitalisierung) eines Signals ist dabei sowohl im Frequenz- wie im Amplitudenbereich mit einer sehr hohen Genauigkeit möglich. Die Soundkarte eignet sich aber auch als Messwerterfassungssystem für Zwecke weit über das ursprüngliche Anwendungsgebiet der Akustik hinaus: So können beispielsweise im Bereich der Elektrotechnik die Daten eines Schwingkreises experimentell erfasst oder auch schnelle mechanische Bewegungen z.B. mit Hilfe von Tachogeneratoren aufgezeichnet werden. Mit Hilfe von entsprechender Software kann die Soundkarte

¹ Derartige Systeme sind in nahezu identischer Ausstattung und Leistungsfähigkeit z.B. im Angebot der Lehrmittelfirmen zu finden.

als Zweikanal-Messinterface auch in der Funktion eines Oszilloskops und sogar als Echtzeit-Spektrograph genutzt werden (vgl. z.B. [1], [8]).

1.1 Eigenschaften der Soundkarte

Moderne PC-Soundkarten sind in der Lage, längere Sprach-, Geräusch- und Musiksequenzen zu digitalisieren und aufzuzeichnen. Der dafür notwendige AD-Wandler - er wird in der Regel *Digital Sound Processor* oder kurz *DSP* genannt - befindet sich direkt auf der Soundkartenplatine. Der DSP kann nun auch in umgekehrter Richtung digitalisierte Klänge an einen Kopfhörer oder eine HiFi-Anlage ausgeben. Damit werden vor allem Computerspiele, multimediale Lehr- und Lernumgebungen usw. akustisch untermalt bzw. unterstützt. Die Umwandlung in 'digitale' Signale wird in diesem Zusammenhang als *Sampling* bezeichnet. Die Soundkarte stellt somit im eigentlichen Sinne einen AD/DA-Wandler dar, der zudem äußerst leistungsstark ist: Die heute gebräuchlichen Karten liefern eine Genauigkeit von 16 Bit und können mit einer Frequenz (*Samplingrate*) von bis zu 48 kHz auf zwei Kanälen (Stereo) ein Signal abtasten oder ausgeben. Dies entspricht im akustischen Bereich der Qualität eines CD-Players oder eines Digitalrecorders und ist mit Hilfe der üblichen AD/DA-Wandlersysteme nur unter weitaus höherem technischen und finanziellen Aufwand zu erreichen. Für Anwendungen in der Akustik genügt sogar die geringere Auflösung von nur 8 Bit. Die Abtastrate kann vom Benutzer variabel zwischen 5 kHz und 48 kHz eingestellt werden, wobei sich die 'maximale' Sampling-Frequenz nach dem sog. Shannonschen Sampling-Theorem ergibt, das besagt, dass die Abtast-Frequenz mindestens doppelt so groß sein muss wie die höchste zu samplende Frequenz. Sollen also akustische Signale im menschlichen Hörbereich (bis max. 20 kHz) digitalisiert werden, so ist im Prinzip eine Samplingrate von 40 kHz ausreichend. (Pro 'Schwingungsperiode' werden dann also mindestens zwei Messwerte erfasst.)

1.2 Technische Daten

Neben einem Mikrophon-Eingang (MIC IN) befindet sich in der Rückblende der Steckkarte ein zweiter analoger Eingang (LINE IN). Dieser Stereo-Eingang ist für den Anschluss eines 'HiFi-Gerätes' konzipiert, er kann z.B. mit dem Ausgang eines CD-Players verbunden werden. Der Mikrophoneingang ist heute häufig nur noch als Mono-Eingang ausgelegt, beide Eingänge aber einheitlich als Mini-Klinkenbuchse (3,5 mm). Vor der Benutzung mit den schulüblichen Bananensteckern muss also ein entsprechender Adapter gelötet werden. Bei den handelsüblichen Soundkarten ist der Messbereich des (linearen) LINE-IN-Eingangs auf einen Spannungsbereich von ca. -0.7 V bis +0.7 V (max. $2 V_{SS}$) begrenzt, der MIC-IN-Eingang nur auf max. ± 100 mV. Erfolgt die Messwertaufnahme nicht generell über HiFi-Komponenten, sollte man sich zusätzlich ein kleines Interface mit verschiedenen Spannungsteilern bauen und zum Schutz der Soundkarte gegen Überspannungen z.B. Siliziumdioden (gegen Masse) einlöten. Leider hängt die Impedanz (LINE-IN ca. 20 k Ω bis 70 k Ω ; MIC-IN 600 Ω - je nach verwendeter Soundkarte) der Eingänge auch von der Frequenz des Messsignals ab. Dennoch ergibt sich zwischen der Signalamplitude am Eingang und dem entsprechenden digitalisierten Messwert i.a. ein linearer Zusammenhang (vgl. z.B. [6]). Die Messgenauigkeit der Soundkarte entspricht bei einer Auflösung von 16 Bit für den Grundmessbereich etwa 0.02 mV, d.h. der Spannungsbereich des LINE-IN-Eingangs von -0.7 V bis +0.7 V wird bei der Digitalisierung auf einem diskreten Wertebereich von -32768 bis +32768 ($2^{16} = 65536$ Einheiten) abgebildet. Bei einer Samplingrate von 48 kHz wird das Signal dabei 48000-mal pro Sekunde abgetastet, das entspricht einem zeitlichen Abstand der Abtastung von nur ca. 21 μ s!

Grundsätzlich lassen sich mit der Soundkarte nur Wechselspannungen aufzeichnen (Frequenzgang ca. 20Hz - 20kHz).

Zusammenfassend sind im Folgenden die technischen Daten einer Soundkarte als Messwerterfassungssystem aufgeführt:

- 2 analoge lineare Eingänge (LINE-IN u. MIC-IN², Stereo/Mono, 3.5mm Klinke);
- Messbereich LINE-IN: -0.7 V bis +0.7 V (je nach Soundkarte bis zu max. $2V_{SS}$)
- Messbereich MIC-IN: max. -100 mV bis +100 mV (je nach Soundkarte)
- max. Auflösung: 16 Bit AD/DA-Wandler (entspricht ca. 0.02mV bei ± 0.7 V),
- max. Samplingrate: variabel bis zu 48 kHz (je nach Soundkarte).

2. Experimente zur Akustik mit der Soundkarte

Die Akustik als Teilgebiet der klassischen Physik und zugleich immer noch hochaktuelles interdisziplinäres Forschungsgebiet vermittelt zwischen Wahrnehmungsphysiologie und der physikalischen Beschreibung akustischer Phänomene. Als Lehre vom Schall beschreibt die physikalische Akustik die Entstehung und Ausbreitung von Tönen, Klängen und Geräuschen im Kontext von Schwingungen und Wellen. Im Bereich der musikalischen Akustik stehen die physikalischen Eigenschaften wie z.B. Tonhöhe und Schalldruckpegel oder Lautstärke im Vordergrund. Die Wahrnehmung von Schall und die beim Menschen hervorgerufenen Empfindungen sind Gegenstand der Psychoakustik. Hier gilt es, die wenig exakten Beschreibungen wie z.B. laut und leise, hell und dunkel oder hart und weich physikalischen Methoden zugänglich zu machen.

Die Schulphysik beschäftigt sich bislang lediglich mit der physikalischen und teilweise mit der musikalischen Akustik. Der Einsatz moderner Multimediasysteme erlaubt es heute allerdings, auch Aspekte der Psychoakustik zu thematisieren (vgl. insbesondere die Beiträge in [11]). Die im Folgenden skizzierten Experimente sollen einige der Einsatzmöglichkeiten der Soundkarte exemplarisch aufzeigen.

2.1 Software

Die zur Soundkarte mitgelieferte Software zielt auf multimediale Anwendungen ab, die das Abspielen oder Aufnehmen von Musik-Sequenzen ermöglichen. Darüber hinaus lassen sich im Internet eine Reihe sehr nützlicher Tools und Softwarepakete für den Einsatz mit der Soundkarte finden, die entweder als Share- oder als Freeware heruntergeladen werden können. Viele dieser Programme erfüllen ähnliche Aufgaben in unterschiedlich professioneller Funktionalität.

Vor wenigen Jahren noch ließ sich ein Signal nur als Ganzes sampeln und erst danach weiterverarbeiten. Viele Programme arbeiten noch heute nach diesem Prinzip. Dabei wird zunächst ein Signal (z.B. eine Tonsequenz) mit Hilfe des MS-Windows-*Audiorecorders* oder anderen Programmen³ digitalisiert, als Datei gespeichert und daraufhin mit geeigneter Software analysiert. Die Messdaten selbst liegen dann in einem speziellen Format vor, in sog. *wav*-Dateien.⁴

² Der Mikrofon-Eingang kann direkt zum Sampeln von Sprachsignalen o.ä. verwendet werden. Dazu sollte man beachten, dass sich dieser Eingang automatisch an die Impedanz des angeschlossenen Mikrophons anpasst.

³ Sehr empfehlenswert sind die Shareware-Programme *Goldwave* (<http://www.goldwave.com>) und *CoolEdit2000* (in älteren Versionen als Freeware erhältlich: <http://www.syntrillium.com>).

⁴ Der Kopf (*Header*) einer *wav*-Datei besitzt eine Länge von 20 Byte und lässt sich unter Verwendung des Datentyps *LongInt* oder als '*file of longint*' verarbeiten. Mit ein wenig Geschick lässt sich die Soundkarte und die Verarbeitung der *wav*-Dateien aber auch selbst programmieren; vgl. z.B. [6].

Sollen nun aber auch in Echtzeit Messwerte aufgenommen, dargestellt und analysiert werden, so muss entweder auf kommerzielle Software oder auf spezielle Share- oder Freeware zurückgegriffen werden. Die Qualität der angebotenen ‚freien‘ Programme ist recht unterschiedlich, empfohlen sei hier der *AudioTester* zur Frequenzanalyse mit den zusätzlichen Funktionen wie ‚Zweikanaloszilloskop‘ und ‚Frequenzgenerator‘ (Shareware: <http://www.sumuller.de/audiotester>).

Neben der Möglichkeit, die Soundkarte als Frequenzanalysator (per FFT-Fourierspektrum) zu nutzen, bietet das Programm GRAM50 zudem die Funktion eines Spektrographen (Freeware: <http://www.visualizationsoftware.com/gram.html>). Hier werden kurze Signalsequenzen einer Fourieranalyse unterworfen und die Ergebnisse im Sonogramm fortlaufend ausgegeben. Diese Software kann sowohl *wav*-Dateien als auch z.B. die Signale eines Mikrophons in Echtzeit verarbeiten.

2.2 Signalerzeugung - die Soundkarte als Sinusgenerator

Die Soundkarte lässt sich neben ihrer Funktion als AD-Wandler in Zusammenarbeit mit einem Leistungsverstärker auch als ein hervorragender Sinusgenerator (d.h. DA-Wandler) einsetzen: Der eingebaute FM-Chip ermöglicht eine Signalerzeugung, die theoretisch einen Frequenzbereich bis über 90 kHz erlaubt (vgl. z.B. [6], [10]).

Die analoge Klangerzeugung basiert dabei auf dem Prinzip der Frequenzmodulation (FM). Im Allgemeinen enthalten die entsprechenden FM-Chips neun Kanäle (Stimmen) mit mindestens zwei Oszillatoren pro Kanal (Träger- und Modulatorschwingung). Parameter wie Amplitude, Frequenz, Hüllkurve, Wellenform u.a. können für jeden Kanal und zum Teil sogar für jeden Oszillator getrennt eingestellt werden.

Das Sharewareprogramm *AudioTester* stellt einen hervorragenden Funktionsgenerator (mit integriertem Wobbelgenerator) zur Verfügung. Die Frequenz kann über den gesamten Hörbereich mit einer Genauigkeit von 0.01 Hz eingestellt und in ein- oder 100-Hz-Schritten per ‚Mausklick‘ variiert werden. Neben einem Sinus- und Rechtecksignal stehen dem Benutzer rosa- oder weißes Rauschen und auch eine frei wählbare Signalform zur Verfügung. Als Grundlage dafür kann eine beliebige *wav*-Datei gewählt werden. Die Lautstärke lässt sich (für jeden Kanal einzeln) in einem Bereich von 0 dB bis -99 dB in diskreten Schritten variieren (s.u.).

Wie im weiteren beschrieben wird, eignet sich der *AudioTester* auch in besonderer Weise für Hörtests und zur Erstellung einer Hörschwellenkurve.

2.3 Erstellung einer Hörschwellenkurve

Die Beschäftigung mit dem eigenen Körper und den persönlichen physischen Fähigkeiten stellt ein hohes Motivationspotential für Schüler dar, dies gilt insbesondere für den Bereich der akustischen Wahrnehmung (vgl. z.B. [11]). Aus Alltagserfahrungen ist vielen SchülerInnen bekannt, dass z.B. die Hörgrenze mit zunehmendem Alter abnimmt. So können die Eltern oder Großeltern hohe Frequenzen sehr viel schlechter hören als die Jugendlichen selbst. Allerdings weisen heute viele Jugendliche signifikante Hörstörungen auf, die vor allem auf den exzessiven Genuss von lauter ‚Kopfhörermusik‘ (Walkman u.a.) zurückzuführen sind. Derartige Schädigungen werden im Alltag oft nicht früh genug oder gar nicht erkannt, erst der Besuch eines Ohrenarztes und ein ausgiebiger Hörtest führen zur Detektion von Hörstörungen, die dann bereits den Zustand eines irreparablen Hörschadens erreicht haben können.

Das menschliche Hörvermögen ist sowohl abhängig vom Schalldruck als auch von der Frequenz, d.h. wir hören unterschiedliche Töne selbst bei gleichem Schalldruckpegel unterschiedlich laut. Oder anders ausgedrückt: Ob wir einen Ton akustisch wahrnehmen,

hängt nicht nur von seiner Lautstärke, sondern auch von seiner Frequenz ab. Der maximal wahrnehmbare Hörbereich liegt zwischen ca. 20 Hz und 20 kHz. Allerdings besitzt jeder Mensch sein individuelles ‚Wahrnehmungsprofil‘. Dies kann mit Hilfe eines *Audiogramms* erfasst werden: Zur Erstellung einer *Hörschwellenkurve* – im Folgenden kurz *Hörkurve* genannt – wird die Empfindlichkeit des Hörvermögens in Bezug auf die frequenz- und schallpegelabhängige Hörschwelle ermittelt. Üblicherweise wird dabei die Lautstärke eines reinen Sinustons fester Frequenz so lange erhöht, bis die Hörschwelle des jeweiligen Probanden erreicht wird, d.h. der Ton als solcher akustisch wahrgenommen wird.⁵ Dieses Verfahren erweist sich in der Anwendung als sehr kompliziert, da zunächst Signale mit definierten Schallpegeln erzeugt werden müssen. Der Zusammenhang zwischen Schalldruck, -pegel und Lautstärke ist äußerst kompliziert und wird im Physikunterricht der Sekundarstufe I kaum oder z.B. nur im Rahmen des Themas ‚Lärm und Lärmbekämpfung‘ thematisiert (vgl. z.B. [4]). Zur Erinnerung: Die bekannte Skala des Schallpegels bezieht sich auf den Schalldruck bzw. die -intensität eines reinen Sinustons von 1000 Hz. Ein ‚durchschnittlicher‘ Proband nimmt diesen Ton erst ab einer Schalldruckamplitude von ca. $3 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ bzw. einer Schallintensität von ca. $10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ wahr. Die Schallwahrnehmung erreicht die Schmerzgrenze ab ca. 600 Pa bzw. $20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Nach dem Weber-Fechner-Gesetz verhält sich die menschliche Wahrnehmung und insbesondere das Hörvermögen nicht linear, sondern die empfundene Lautstärke ist proportional zum (dekadischen) Logarithmus der Schalldruckamplitude bzw. der Intensität. Das menschliche Hörvermögen wird daher mit Hilfe einer Logarithmisierung auf die lineare Skala des Schalldruckpegels in Dezibel (dB) abgebildet. Die Hörschwelle liegt dann bei 0 dB, die Schmerzgrenze bei ca. 120 dB.⁶ Der physikalischen Beschreibung über den Schalldruck, die Intensität oder den Pegel steht also die subjektive menschliche Empfindung der Lautstärke oder der ‚Lautheit‘ gegenüber: Die Lautstärke eines Tons definiert sich über den Schalldruckpegel eines als gleich laut wahrgenommenen Tons der Frequenz von 1000 Hz.⁷

Mit Hilfe der Soundkarte und der AudioTester-Software lässt sich mit einfachen Mitteln eine Hörkurve ermitteln, die im Wesentlichen ohne eine präzise Begriffsdefinition von Schalldruck, -intensität und Pegel auskommt. Die Lautstärkeregelung der vom Programm ausgegebenen Töne erfolgt zwar in Dezibel, dieser Pegel bezieht sich allerdings auf die jeweilige Ausgangsspannung des Soundkartensignals. Der jeweils aktuell über die softwarebasierte *Lautstärkeregelung (Volume Control)* der Windows-Umgebung einjustierte Pegel entspricht dann immer 0 dB. Dieser Pegel kann nun stufenweise abgeschwächt werden von 0 dB bis auf –99 dB. Eine Eichung auf die dB(U)-Skala ist problemlos mit Hilfe

⁵ Es kann auch die Lautstärke eines deutlich hörbaren Tons so lange verringert werden, bis ein Proband diesen Ton gerade nicht mehr wahrnimmt. Da aber die menschliche Wahrnehmung gegenüber konstanten Reizeinflüssen schnell Unempfindlichkeiten ausprägt und insbesondere das Gehör bei Dauerreizen sehr schnell an Empfindlichkeit verliert, ist das oben skizzierte Verfahren zu bevorzugen.

⁶ Mit Hilfe eines *Schallpegelmessers* lassen sich auch die Schallpegel von Umweltgeräuschen ausmessen und hinsichtlich ihrer Lautstärke beurteilen bzw. vergleichen.

⁷ Als weiterführende Literatur seien hier neben allgemeinen Lehrbüchern zur Physik z.B. [3], [9] und [11] (insb. [12]) empfohlen.

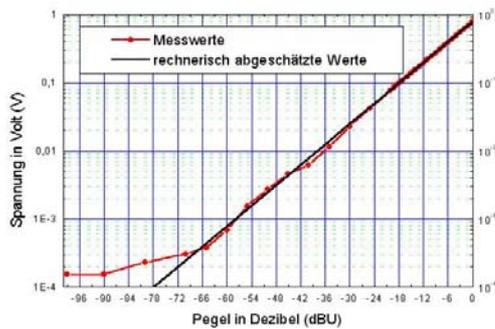


Abb.2: Eichkurve des Ausgangssignals einer Soundkarte zum Programm AudioTester.

die Beschallung über einen Kopfhörer, wobei nur ein Kanal des Stereoausgangs benutzt werden sollte, da leider nur jeweils ein Regler im Programm zur gleichen Zeit variiert werden kann. Eine andere Lösung besteht darin, beide Kanäle über einen Adapter auf ‚Mono‘ zu schalten. Zur Bestimmung der jeweiligen Hörschwelle wird zunächst der Lautstärkeregler auf -99 dB geregelt, dann eine Frequenz eingestellt und schließlich der Pegel so lange erhöht, bis der Proband den Ton wahrnimmt. Nach diesem Verfahren werden nun sukzessive für unterschiedliche Tonhöhen Messwerte von Frequenz und Hörschwellenpegel gewonnen und im Audiogramm als individuelle Hörkurve graphisch dargestellt. Je nach gewünschter Genauigkeit reicht es aus, ca. zehn Wertepaare zu ermitteln. Die Skalierung der Frequenzachse erfolgt typischerweise (dekadisch) logarithmisch. Bei der Frequenzauswahl sollte daher besonders darauf geachtet werden, die Frequenzabstände jeweils zu vergrößern – z.B. zu verdoppeln. Abb.1 zeigt eine auf diese Weise aufgenommene Hörkurve. Der zeitliche Aufwand zur Gewinnung der Messwerte für ein solches Audiogramm beträgt etwa fünf Minuten. Obwohl der Verlauf jeder Hörkurve individuell unterschiedlich ist und sozusagen einen ‚Fingerprint‘ des Hörvermögens darstellt, gleicht sich die Grundstruktur jeder Hörkurve: Die Hörschwelle ist frequenzabhängig, die Empfindlichkeit des Ohres für tiefe und hohe Frequenzen gering und im Bereich von ca. 1 kHz bis 10 kHz erweist sich das menschliche Gehör als besonders empfindlich. Das abgebildete Audiogramm zeigt keine Hörschädigungen, es entspricht eher einer Standardhör-

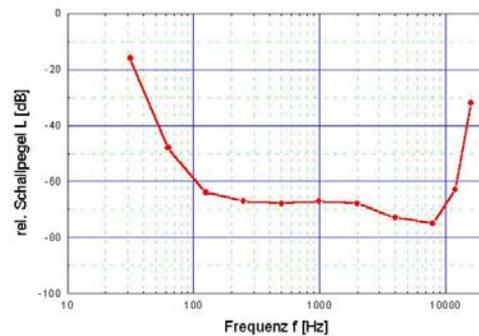


Abb.1: Hörkurve eines erwachsenen Mannes (36 Jahre).

⁸ Die dB(U)-Skala bezieht sich auf eine Referenzspannung von $U_0 = 775$ mV. Bei der Einstellung des Audiotester-Pegels von 0 dB(U) lässt sich diese Ausgangsspannung der Soundkarte z.B. bei einem 1000 Hz-Ton über die Windows-Lautstärkeeinstellung direkt einregeln, d.h. der Windows-Volume-Schieberegler wird so lang verschoben, bis das Multimeter bei der 0 dB(U)-Einstellung des AudioTesters am Soundkartenausgang eine Spannung von $U_0 = 775$ mV anzeigt. Der jeweilige Pegel ergibt sich dann zu $L_U = 20 \cdot \log(U/U_0)$ [dB(U)] bzw. die Ausgangsspannung zu $U = U_0 \cdot 10^{(L_U/20)}$ [V]. Eine Abschwächung um -6 dB(U) entspricht dabei einer Halbierung der Ausgangsspannung, bei -12 dB liegt nur noch ein Viertel der Referenzspannung an (vgl. Abb.2).

kurve. Eine Hörstörung ließe sich durch signifikante Abschwächungen der Hörschwelle für bestimmte Frequenzen erkennen.

Wie bereits angedeutet, reduziert sich die Umsetzung des hier skizzierte Verfahrens auf die Verwendung der beschriebenen Software AudioTester und eines Standard-PC's mit Soundkarte und eines Kopfhörers. Eine derartige Ausrüstung ist heute in einer Vielzahl von Haushalten zu finden. Die Aufnahme einer Hörkurve sollte also auch als Hausexperiment durchführbar sein. Neben einer handlungsorientierten Auseinandersetzung mit physikalisch-technischen Inhalten führt die aktive Handhabung multimedialer Softwareumgebungen letztendlich auch zu einer Stärkung der Medienkompetenz bei Schülerinnen und Schülern.

2.4 Musikalischer Schall als periodische Schwingung

Die Musik steht im Spannungsfeld subjektiv erlebter Lebenswirklichkeit und objektiver physikalischer Interpretation: Als originär akustisch wahrnehmbare Sequenz von Tönen und Klängen, ‚verziert‘ durch Rhythmus und Intonation, kann sie Empfindungen auslösen, die jenseits aller objektiven Beurteilung stehen und in jedem Menschen individuelle Emotionen wachrufen. Im Sinne eines Ausdrucks kultureller Identität kann Musik aber auch ein typisch generationenabhängiges Lebensgefühl ausdrücken oder hervorrufen und durch die Ausprägung bestimmter Stilrichtungen Abgrenzungen schaffen, die z.B. gerade für die Persönlichkeitsentwicklung Jugendlicher von elementarer Bedeutung sein können. Musik ist jedoch auch Ausdruck künstlerischen Schaffens und unterliegt hinsichtlich seiner kompositorischen Elemente musiktheoretischen Vorgaben und Gewohnheiten.

Unter der physikalischen Sichtweise wird die Musik dagegen zu einer Messreihe reduziert und kann als Luftdruckkurve sensorisch erfasst und analysiert werden. Die Aspekte der Wahrnehmung und des künstlerischen Gehalts verlieren hier an Bedeutung, funktionale oder statistische Eigenschaften und der Signalcharakter der Musik treten als wesentliche Merkmale in den Vordergrund.

2.4.1 Frequenz und Amplitude von Ton und Klang

Die Protagonisten der klassischen (musikalischen) Akustik sind Ton, Klang und Geräusch. Ein reiner Ton wird in den Lehrbüchern zur Physik in der Regel als eine Sinusschwingung charakterisiert. Wie schwierig diese Umschreibung ist, stellt sich spätestens beim experimentellen Umgang mit der Akustik heraus: Digitalisiert man das Signal einer Stimmgabel, so zeigt sich der zeitliche Amplitudenverlauf noch als nahezu sinusartig (vgl. Abb.4). Das Signal einer naturgemäß leicht überblasenen Blockflöte hingegen weist bereits erstaunliche Schwankungen

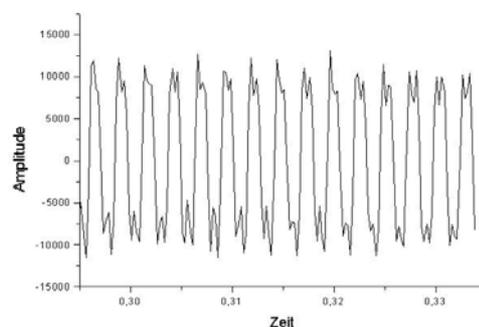


Abb.3: Zeitreihe eines Blockflötensignals.

in den Signalspitzen auf und kann nur in guter Näherung als sinusartig bezeichnet werden (vgl. Abb.3). Dieser Effekt lässt sich nicht auf eine ungenügende Aufnahmequalität, z.B. eine zu schlechte Auflösung oder kleine Samplingrate zurückführen - der Signalverlauf eines realen Tons repräsentiert eben nicht immer einen reinen Ton, sondern kann vielmehr bereits als Klang interpretiert werden: in der physikalischen Interpretation also eine Über-

lagerung mehrerer Sinustöne mit Grundton und Obertönen. Spielt ein Musiker einen Ton auf seinem Instrument, so handelt es sich immer um einen Klang.

Dem Signal einer Blockflöte und dem ‚reinen‘ Sinuston einer Stimmgabel ist aber gemeinsam, das sie (bis auf die aperiodischen Einschwingphasen) als periodische Schwingungen charakterisiert werden können. Dieser Periodizität wird eine Frequenz zugeordnet, die angibt, wieviele Schwingungen pro Sekunde durchlaufen werden. Der Periodizität eines Ton wird in gleicher Weise mit der empfundenen Tonhöhe verknüpft: Je höher ein Ton klingt, desto höher ist seine Frequenz – und umgekehrt.⁹ Dieser Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Frequenz und insbesondere die Bestimmung einer Frequenz lässt sich besonders anschaulich mit Hilfe der Oszilloskop-Funktion der AudioTester-Software demonstrieren: Es können z.B. in Echtzeit Mikrofonsignale im Amplituden-Zeit-Diagramm aufgezeichnet und auch Sequenzen auf dem Bildschirm ‚eingefroren‘ werden.¹⁰ Zählt man z.B. die Schwingungsperioden des 512-Hz-Stimmgabelsignals von Abb.4 aus, so ergeben sich in einem Zeitraum von 10 ms etwas mehr als fünf Schwingungen, das entspricht einer Frequenz von etwas mehr als 500 Hz. Eine zweite Stimmgabel mit höherer Frequenz schwingt in gleicher Zeit häufiger – ein Ton klingt also umso höher, je größer die Frequenz der Schwingung ist.

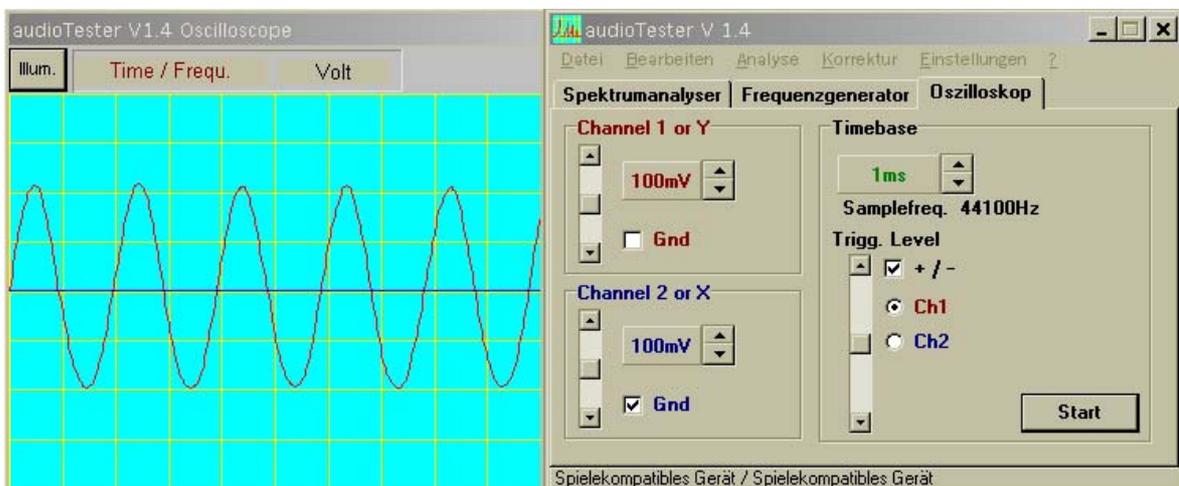


Abb.4: Signal einer 512-Hz-Stimmgabel (C^2) – Echtzeitdarstellung eines Mikrofonsignals mit Hilfe der Oszilloskopfunktion der AudioTester-Software (s.o.).

Mit Hilfe des AudioTesters und einem Mikrophon lassen sich eine Reihe von kleineren Experimenten zum Thema akustische Schwingungen durchführen. Das Signal einer menschlichen (Sing-) Stimme erzeugt periodische Schwingungsmuster und auch (akustische) Musikinstrumente zeigen Periodizitäten, die i.a. aber nicht mehr einer Sinusschwingung folgen.

Ohne großen technischen Aufwand können zudem Aussagen über den Zusammenhang zwischen empfundener Lautstärke und der Signalamplitude getroffen werden: Ein Ton wird als umso lauter empfunden, je größer die Amplitude der zugehörigen Schwingung ist. Dieser Zusammenhang lässt sich besonders deutlich unter Verwendung der Echtzeitdarstellung demonstrieren, z.B. anhand unterschiedlich lauter Sprach- oder Instrumentensig-

⁹ Die hier vorgenommene Beschreibung zielt ab auf die im Physikunterricht üblicherweise thematisierten ‚reinen‘ Sinustöne. Reale Töne bzw. Klänge besitzen immer ein mehr oder weniger reichhaltiges Obertonspektrum. Zur Erklärung der physiologischen Tonhöhenwahrnehmung existieren bis heute unterschiedliche Ansätze; vgl. z.B. auch [3] u. [9].

¹⁰ Der AudioTester dient ebenfalls als Speicheroszilloskop.

nale. Neben dem Einsatz von Mikrofonen kann hier auch auf digitalisierte Musiksequenzen zurückgegriffen werden. Abb.5 (oben) zeigt den Amplitudenverlauf klassischer Klaviermusik – Beethoven: „Für Elise“. Viele Programme (wie z.B. *Goldwave*, s.o.) lassen auch einen ‚Zoom‘ in die Signalkurven zu, so dass auch hier periodische Schwingungsmuster aufgespürt werden können. Im Vergleich zu der in Abb.5 (unten) ebenfalls abgebildeten Partitur wird deutlich, dass sich Musik unter der physikalischen Perspektive eben nur (oder gerade) auf die Interpretation von Schalldruckfluktuationen reduziert: „Physikalisch ist eine Symphonie nichts anderes als eine Luftdruckkurve“ – so formulierte es Einstein. Hier offenbart sich die besondere Aspekthaftigkeit der Physik: Der Gehalt oder die Bedeutung einer Schalldruckkurve erfährt erst im Rahmen der ästhetischen Interpretation durch den Menschen seine Bedeutung. Die Entscheidung, ob ein Signal z.B. als Geräusch oder Klang, als Rauschen oder Musik interpretiert wird, liegt im Bereich der subjektiven menschlichen Empfindung. Die Betrachtung von Schalldruckkurven erlaubt insbesondere keine Aussage über den musikalischen Gehalt (vgl. Abb.5), selbst die Unterscheidung zwischen Signalen verschiedener Herkunft ist einem Ungeübten nahezu unmöglich: Welches der in Abb.6 dargestellten Signalverläufe entspricht einer Sequenz der menschlichen Sprache und welche dem Zwitschern eines Vogels? Erst unter Verwendung spektralanalytischer Methoden lassen sich weiterführende Informationen aus Schalldruckkurven gewinnen (vgl. insbesondere [8]). Mit Hilfe des Fourierspektrums können Grundfrequenzen und Obertöne detektiert und im Spektrogramm auch zeitliche Variationen verfolgt werden. Auf diese Weise lassen sich aus Musiksignalen auch wieder Melodie- und sogar Notenverläufe gewinnen.

Der AudioTester verfügt über einen softwaregestützten *Spektrumanalyser*; das Programm *GRAM* (s.o.) darüber hinaus über einen *Spektrographen*. Obwohl die Spektralanalyse üblicherweise nicht Inhalt der Mittelstufenphysik ist, kann sich diese im Sinne einer ‚black-box‘-Methode als didaktisch sinnvoll erweisen, da die mit ihrer Hilfe gewonnenen Ergebnisse auch ohne das Wissen um den theoretischen Hintergrund erfolgreich interpretiert werden können. Zudem sind Visualisierungsmethoden von Musik heute bereits in einer Vielzahl von Programmen integriert (wie z.B. im Windows-Mediaplayer, WINAMP, etc.). Gerade die von SchülerInnen oftmals verwendete Abspielsoftware für MP3-kodierte Mu-

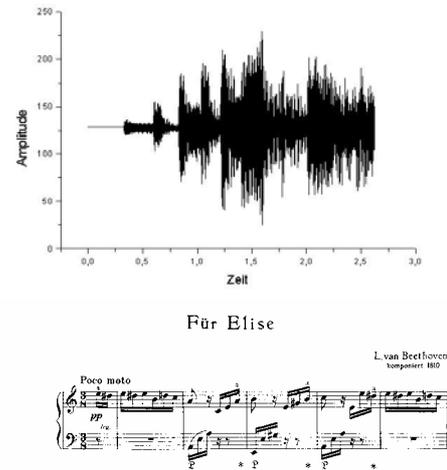


Abb.5: ‚Signalkurve‘ und Ausschnitt der Partitur eines Musikstücks: „Für Elise“ (Beethoven).

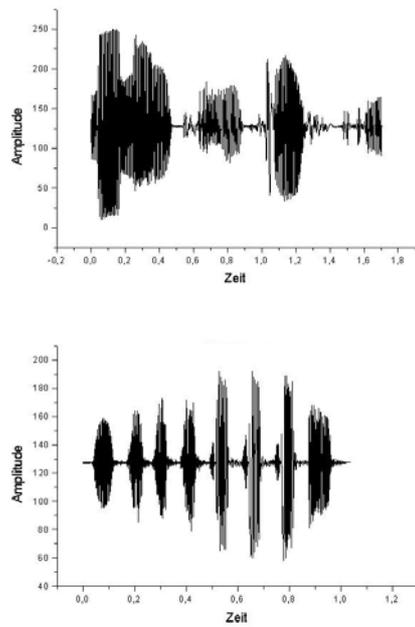


Abb.6: Zeitserie des Sprachsignals eines Menschen (oben) und der ‚Gesang‘ einer Nachtigall (unten).

sik, die im Internet gehandelt und getauscht wird, enthält Visualisierungstools, die auf spektralanalytische Methoden zurückgreifen und zudem von den Nutzern frei programmiert werden können (z.B. WINAMP, s.o.). Auf diese Weise lässt sich im Physikunterricht direkt an die Alltagserfahrungen und Interessen der Jugendlichen anknüpfen.

2.5 Freihandexperiment zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit

Als letztes Beispiel zum Einsatz der Soundkarte in der Akustik wird im Folgenden eine vereinfachte Variante zur Messung der Schallgeschwindigkeit (in Luft) vorgestellt. Dazu werden lediglich eine Schallquelle (z.B. Stimmgabel) und zwei Mikrophone benötigt, die über den Stereo-LINE-IN Eingang (per ‚Y-Adapter‘) an die Soundkarte angeschlossen sind. Zur Messwerterfassung dient wieder das Programm AudioTester im Oszilloskop-Modus.



Abb.7: Messung der Schallgeschwindigkeit mit Hilfe der AudioTester-Software anhand der Phasenverschiebung unterschiedlich positionierter Mikrophone.

Zum Phänomen der Schallausbreitung existieren eine Vielzahl ‚schöner‘ Experimente, die zeigen, dass zur Ausbreitung von Schall zum einen ein Medium wie z.B. Luft nötig ist und Schall sich zum anderen in Form von longitudinalen Wellen ausbreitet. Im Kontext dieses Ausbreitungskonzeptes lässt sich mit einfachen Mitteln auch die Geschwindigkeit von Schall bestimmen: Schall bewegt sich im Raum und legt dabei pro Zeiteinheit eine bestimmte Weglänge zurück. So empfangen zwei in gleicher Entfernung (nebeneinander) vor der Schallquelle positionierte Mikrophone ein ausgesandtes Signal zeitgleich. Wird nun eins der beiden Mikrophone etwas nach ‚hinten‘ verschoben, so wird das Signal etwas später empfangen. Diese Phasenverschiebung lässt sich besonders eindrucksvoll mit Hilfe eines reinen Tones z.B. einer Stimmgabel demonstrieren: Abb.7 (links) zeigt das Signal von zwei nebeneinander aufgestellten Mikrofonen. Wird nun das zweite Mikrofon um einige Zentimeter zurück verschoben, so ‚verschiebt‘ sich auch das empfangene Signal. In Abb.7 (rechts) wurde das zweite Mikrofon um ca. 33 cm gegenüber dem ersten verschoben, das zweite Sinussignal verschiebt sich dabei um ca. 1 ms in der Zeitskala. D.h., dass Signal benötigt etwa 0.001 Sekunden, um eine Strecke von 0.34 Meter zurückzulegen. Damit lässt sich die Schallgeschwindigkeit (in einer Art Freihandexperiment) zu $v_{\text{Luft}} = 340$ m/s abschätzen.

3. Literatur

- [1] CARSTENS, M.: HiFi-Meßlabor. In: c't, Heft 10, 1997.
- [2] FRENZEL, M.; MEBMER, M.; NORDMEIER, V.: Datentransfer mit einem Multimeter. In: Unterricht Physik, 36/7 (1996) S.8.
- [3] GOLDSTEIN, E.B.: Wahrnehmungspsychologie – eine Einführung. Heidelberg u.a.: Spektrum Verlag, 1997.
- [4] HEEPMMANN, B. ET AL.: Physik für Realschulen. Berlin: Cornelsen Verlag, 2000.
- [5] LITSCHKE, H.: Physik und Musik – Altes Thema und moderne Computer. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 3/49 (2000) S.22.
- [6] MEBMER, M.: Signalverarbeitung mit Hilfe einer Sound-Karte. Examensarbeit, Universität Osnabrück, unveröffentlicht, 1996.
- [7] MOSER, A.L.; NORDMEIER, V.; SCHLICHTING, H.J.: Physik des menschlichen Stimmapparats - Analyse von Schallgeräten mit Hilfe eines Computersystems. In: Didaktik der Physik, Berlin 1997, S.486.
- [8] NORDMEIER, V.: Physik jenseits der Ordnung – Zugänge zur nichtlinearen Dynamik aus fachdidaktischer Sicht. Oder: Wie chaotisch ist Musik? In: Nordmeier, V. (Red.): Didaktik der Physik. Vorträge der Frühjahrstagung der DPG Bremen 2001, ISBN 3-931253-87-2.
- [9] PIERCE, J.R.: Klang – Musik mit den Ohren der Physik. Heidelberg, Berlin: Spektrum Verlag, 2. Aufl., 1999.
- [10] STEIN, W.: Versuche mit der Soundkarte. Stuttgart u.a.: Ernst Klett Verlag, 1999.
- [11] Themenheft „Mit dem Mikrofon in der Akustik“. Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule, 2/50 (2001).
- [12] WINTER, R.: Das Ohr – ein Sinnessensor mit vielen Besonderheiten. In: [11].

Anhang 1:

Bezugsquellen für Soundkarten-Software (oftmals mit Tonbeispielen):

- Spezielle Software zur Aufnahme, Bearbeitung und Speicherung von Audio-Dateien wird in der Regel vom Hersteller der Soundkarten mitgeliefert.
- **AudioTester**: Die Soundkarte als Oszilloskop, zur Fourieranalyse und als Funktionsgenerator: <http://www.sumuller.de/audiotester>
- **GRAM**: Erzeugung von Online-Spektrogrammen: <http://www.monumental.com/rshorne/gramdl.html> oder <http://www.visualizationsoftware.com/gram.html>
- **DITON**: (Fourieranalyse und –synthese) www.didaktik.physik.uni-erlangen.de
- Programmierung der Soundkarte in TURBO-Pascal (Units und DOS-Software): nordmeier@uni-muenster.de

Anhang 2:

Kopiervorlage zur Erstellung eines Audiogramms
(Datei: Kopiervorlage_Audiogramm1.jpg)

