

„Da sieht man plötzlich, was man hört!“

– zur Visualisierung und Analyse von Musik aus physikalischer Perspektive

Volkhard Nordmeier & Adrian Voßkübler

1. Einleitung

Musik steht im Spannungsfeld subjektiv erlebter Lebenswirklichkeit und vermeintlich objektiver physikalischer Interpretation: Als originär akustisch wahrnehmbare Sequenz von Tönen und Klängen, variiert durch Rhythmus und Intonation, kann sie Empfindungen auslösen, die jenseits aller objektiven Beurteilung stehen und in jedem Menschen individuelle Emotionen wachrufen. Musik ist zudem Ausdruck künstlerischen Schaffens und unterliegt hinsichtlich seiner kompositorischen Elemente musiktheoretischen Vorgaben und Gewohnheiten. Musik kann aber auch als Ausdruck kultureller Identität verstanden werden und durch Ausprägung bestimmter – vor allem generationenabhängiger – Stilrichtungen Abgrenzungen schaffen. Jugendliche interessieren sich aus unterschiedlichen Gründen für Musik: Sie hören gern Musik, bewegen sich nach ihr, spielen ein eigenes Instrument, singen in einer Band oder im Chor. Musik betrifft im außerphysikalischen Kontext also direkt die Lebenswelt der Schülerinnen und Schüler.

Unter der physikalischen Perspektive reduziert sich Musik häufig auf das Vorhandensein von mehr oder weniger regelmäßigen, periodischen Schwankungen des Luft- bzw. Schalldrucks, die sensorisch erfasst und analysiert werden: „Physikalisch ist eine Symphonie nichts anderes als eine Luftdruckkurve“ – so formulierte es bereits Einstein. Die Aspekte der Wahrnehmung, des Ausdrucks eines Lebensgefühls oder des künstlerischen Gehalts verlieren hier an Bedeutung, denn funktionale oder statistische Eigenschaften und insbesondere der Signalcharakter der Musik treten unter physikalischer Perspektive als wesentliche Merkmale in den Vordergrund.

Das Thema ‚Physik und Musik‘ macht also besonders deutlich, dass das Lernen und Lehren von Physik nicht in rein fachwissenschaftlichen Bezügen gefangen bleiben darf, wenn sowohl die Interessen der Schüler an physikalischen Inhalten angemessen berücksichtigt werden sollen als auch ein Verständnis für die wissenschaftlich-technisch geprägte Welt angestrebt wird. Da die Differenz zwischen lebensweltlicher und physikalischer Perspektive als eine der wesentlichen Schwierigkeiten für das Lehren und Lernen von Physik gilt, gehen wir davon aus, dass verstehendes und nachhaltiges Physiklernen dann erfolgreich geschieht, wenn es kontextgebunden, anwendungsbezogen und lebensweltlich orientiert ist – wenn Physikunterricht also einen starken Bezug zum Alltag der Lernenden herstellt (vgl. z.B. [1], [2]).

Eine wesentliche Konsequenz aus diesem Ansatz besteht darin, ein auf übergeordnete Lernziele wie Mündigkeit und Kritikfähigkeit ausgerichtetes Physiklernen nicht durch Einlebnung der bestehenden Differenzen zwischen der Alltagswelt und dem Fach Physik erreichen zu wollen, sondern durch eine perspektivische Vermittlung zwischen den beiden Sehweisen (vgl. [1]).

Eine besondere Chance, das Thema ‚Physik und Musik‘ im Physikunterricht integrativ zu gestalten, bietet dabei die moderne (Computer-) Technik, die den Jugendlichen aus ihrer Lebenswelt vertraut ist. Jugendliche sind es heute gewohnt, Musik nicht nur zu hören, sondern auch mit Hilfe von computergestützten Mediaplayern auf ästhetisch ansprechende Weise sichtbar zu machen (z.B. beim Abspielen von MP3-kodierter Musik). Dabei

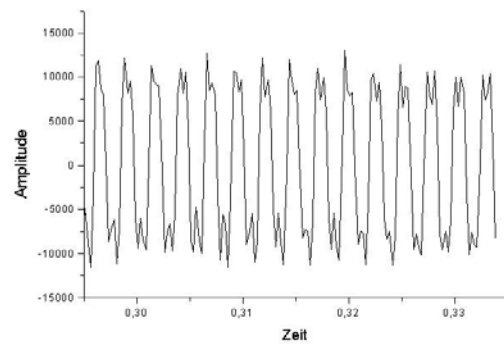


Abb. 1: Zeitreihe eines Blockflötensignals.

kommen Visualisierungsverfahren zur Anwendung, die bzgl. ihres physikalischen Gehalts zwar wenig bedeutungsvoll, methodisch aber durchaus anschlussfähig sind: Aus physikalischer Perspektive bieten sich hier – in Anlehnung an die Methoden der nichtlinearen Physik – Anknüpfungspunkte zum Einsatz moderner bildgebender Verfahren, die auch zur weitergehenden Analyse von Instrumentenklängen oder von Musiksequenzen (oder anderer akustischer Reize wie Sprache und Tierlaute) dienen. Neben Aussagen zu elementaren Eigenschaften und Charakteristika von Tönen und Klängen werden u.a. auch Interpretationen zum musikalischen Charakter einer Klangfolge oder einer Musiksequenz möglich. Es zeigt sich dabei, dass auch die Physik helfen kann, dem Wesen von Klang und Musik auf die Spur zu kommen.

2. Ton, Klang und Musik

Die Protagonisten der klassischen Akustik sind Ton, Klang und Geräusch. Ein reiner Ton wird in den Lehrbüchern zur Physik 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. Das Signal einer etwas zu stark angeblasenen Blockflöte hingegen weist bereits erstaunliche Schwankungen in den Signalspitzen auf und kann nur noch in guter Näherung als sinusartig bezeichnet werden (vgl. Abb.1). Die Ein- und Ausschwingphasen sind im Allgemeinen sogar schon aperiodisch oder transient chaotisch (vgl. [11]). 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: physikalisch also als Überlagerung mehrerer Sinustöne mit Grundton und Obertönen. Spielt ein Musiker also einen Ton auf seinem Instrument, so handelt es sich immer um einen Klang.

Die Analyse von Musik lässt sich auf diesem Weg also direkt auf die Beschreibung des Elements Klang reduzieren. Dabei reicht das Spektrum der physikalisch interessanten Fragestellungen von der eigentlichen Klangentstehung bis hin zur menschlichen Klangwahrnehmung bzw. zur Psychoakustik, der Frage also, wie es dem menschlichen Wahrnehmungsvermögen gelingt, aus einer Vielzahl von Luftdruckschwankungen eine Klangempfindung entstehen zu lassen. Losgelöst von dem Attribut Empfindung reduziert sich diese Frage zunächst aber auf die Aufgabe, Klang als Überlagerung von Schwingungsmustern zu detektieren und hinsichtlich zeitlich begrenzter Periodizitäten zu analysieren, um daraus

weitere Aussagen über Beschaffenheit und Charakterisierung des Signals treffen zu können. All dies vollbringt unser Gehör scheinbar mühelos und in Echtzeit. Wie wir in diesem Beitrag zeigen möchten, steht dem menschlichen Mustererkennungsvermögen inzwischen aber ein gewisses Methodenrepertoire (aus der Physik) gegenüber, mit dessen Hilfe es möglich wird, den Signalverläufen aus Luftdruckschwankungen, die eine Schallquelle (mechanisch) hervorbringt und ein Mikrofon in Spannungszeitreihen wandelt, einen gewissen Grad an objektivierter Bedeutung zuzuordnen – letztlich also der Versuch, das Phänomen Klangwahrnehmung mit Hilfe computergestützter Methoden aus physikalischer Perspektive nachzubilden und elementar verstehbar zu machen.

Allerdings bleibt anzumerken, dass eine derartige Betrachtung von Schalldruckkurven keine Aussage über den musikalischen Gehalt erlaubt. Klanganalyse bedeutet hier immer Schwingungsanalyse, also die rein analytische Betrachtung von (komplexen, mechanischen) ‚Schwingungsmustern‘.

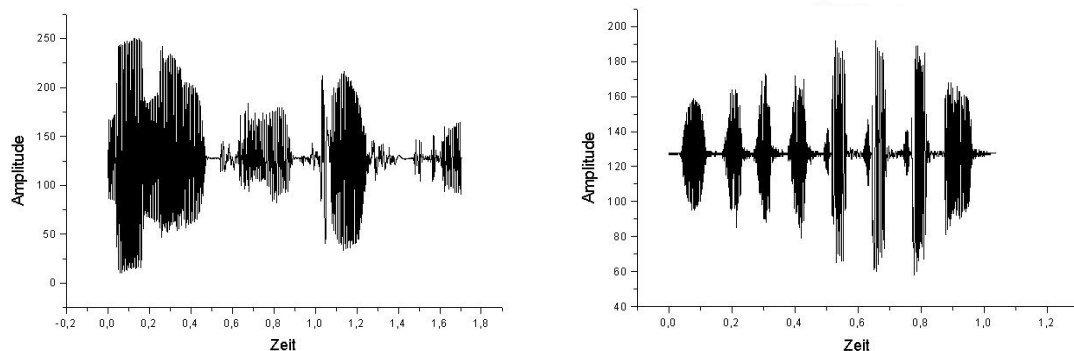


Abb. 2: Zeitserie des Sprachsignals eines Menschen (links) und der Gesang einer Nachtigall (rechts). Unserer akustischen Wahrnehmung fällt die Unterscheidung zwischen diesen Signalen sehr leicht, aus der reinen Zeitreihendarstellung heraus ist dies schon wesentlich schwieriger.

Verallgemeinert haben akustische Signale eines gemeinsam: Sie sind zwar im Zeitverlauf komplex und in der Zeitreihendarstellung für uns zunächst nicht einmal als ursächlich akustisch erkennbar (vgl. Abb.2 und Abb.4), dennoch lässt sich die Komplexität in vielen Fällen insofern reduzieren, als beispielsweise das Anklingen einzelner Töne/Klänge und insbesondere das Einschwingverhalten, das Ausschwingen sowie der stationäre Ton aus dem Signalverlauf direkt erkennbar sind. Aus der fouriertransformierten Zeitreihe lassen sich darüber hinaus sogar charakteristische, periodische Schwingungsanteile identifizieren, z.B. als instrumenten- oder stimmenspezifische Verteilungen von Grund- und Obertönen. Die Auswertung des entsprechenden Sonogramms oder des fraktalen Attraktors lässt sogar noch weitergehende Schlüsse zu (s.u.).

Im Folgenden sollen nun entsprechende (geeignete) physikalische Methoden zur Visualisierung und Analyse von akustischen Signalen vorgestellt werden. Dabei spielt der Computereinsatz eine zentrale Rolle, denn gerade die Möglichkeit, Klänge, Sprache oder andere Geräusche mit Hilfe einer Soundkarte aufzuzeichnen, zu digitalisieren und anschließend per Computer zu visualisieren und zu analysieren, eröffnet neue Perspektiven für den modernen Physikunterricht. Um die bestehenden Möglichkeiten zu erweitern und zu optimie-

ren, wurde das neue Softwarepaket SOUNDS entwickelt. Mit SOUNDS lassen sich digitalisierte Tonsequenzen und auch Echtzeitsignale anhand unterschiedlicher Methoden analysieren. Das Programm stellt sowohl herkömmliche Verfahren wie z.B. die Fourieranalyse als auch neuartige Methoden wie die Rekonstruktion eines *musikalischen* Zustandsraums bereit. Darüber hinaus bieten aber insbesondere die vielfältigen Visualisierungsmethoden von SOUNDS einen neuen Zugang zur Akustik: Möglich sind neben detaillierten Zeitreihendarstellungen auch Analysen von (Echtzeit-) Fourierspektren oder (ästhetisch sehr ansprechende) ‚Flüge‘ über dreidimensionale Tonspektren. Instrumentenklänge und Sprachelemente wie z.B. Vokale lassen sich im (Echtzeit-) Sonogramm anhand ihrer Obertonverteilung oder anhand ihrer fraktalen Attraktoren identifizieren, oder auch als Noten abbilden.

3. Visualisierung und Analyse von Musik mit SOUNDS

Das Ziel bei der Entwicklung des Softwarepakets SOUNDS war, alle derzeit gängigen Verfahren zur Klanganalyse und -visualisierung unter einer Programmoberfläche zu vereinen, um die Ergebnisse der einzelnen Methoden direkt miteinander vergleichen zu können. Gleichzeitig lassen sich so aber auch programmiertechnisch und anwendungsbezogenen Synergien auszunutzen: Eine Vielzahl von Analyseverfahren bauen z.B. auf der Fourieranalyse auf, so dass diese nur einmal berechnet und dann von verschiedenen Visualisierungen und Analysen weiterverwendet werden kann. SOUNDS bietet dem Nutzer nun unterschiedliche Visualisierungs- und Analyse-Module an (vgl. Abb. 3), mit deren Hilfe je nach Anwen-

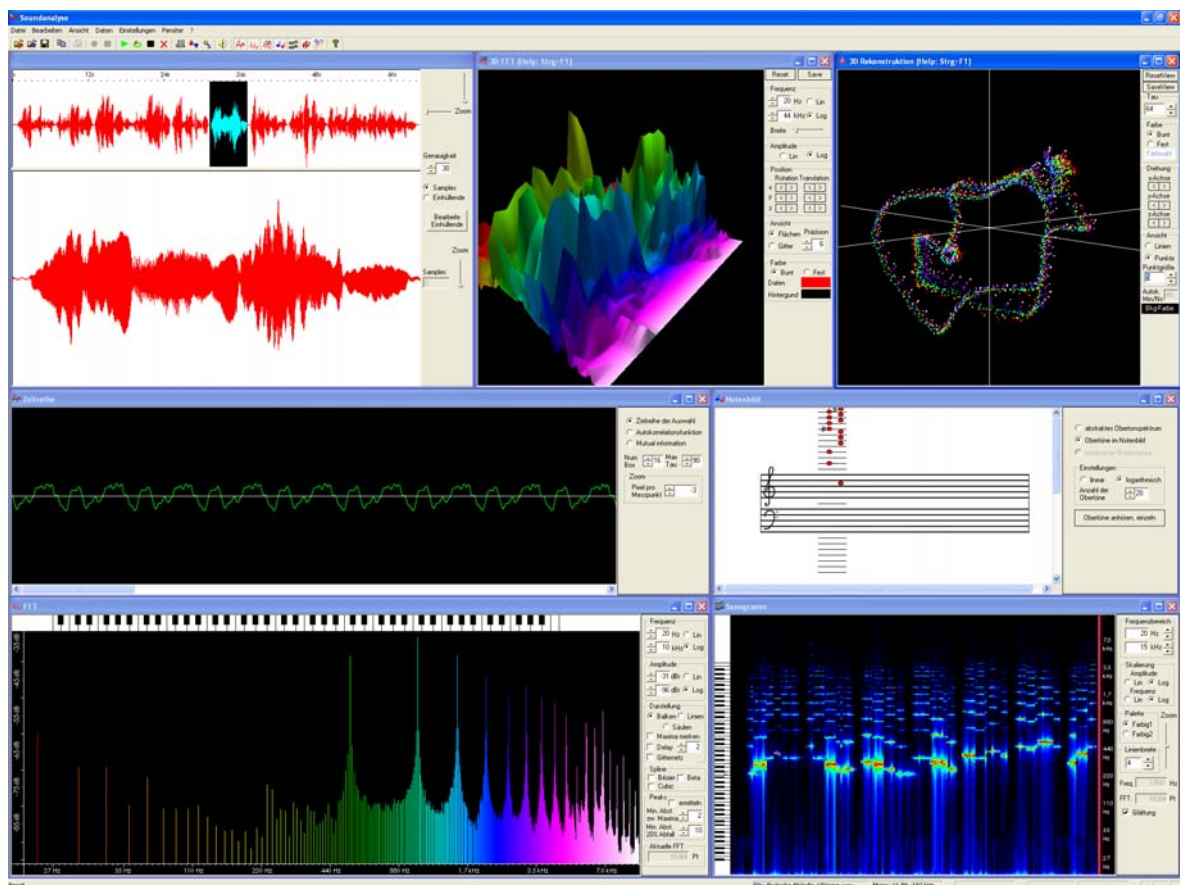


Abb. 3: Screenshot von Sounds mit allen Modulen

dung und Interesse unterschiedliche Aspekte des untersuchten Signals herausgestellt werden können. Die Software fasst bekannte Darstellungen und Analysen von Tönen zusammen, wie die Zeitreihendarstellung¹⁾ oder die Fouriertransformations- bzw. Sonogrammdarstellung²⁾, erweitert diese und fügt neuartige Darstellungsmethoden wie das Rekonstruktionsverfahren und die analytische Anzeige des Obertonspektrums hinzu. Dabei bietet sie sowohl die Möglichkeit, gespeicherte Mikrofonaufnahmen oder (beliebige) WAV-Dateien zu analysieren, als auch über den Mikrofoneingang einer angeschlossenen Soundkarte in Echtzeit Analysen durchzuführen. Für nicht akustische Signale besteht auch die Möglichkeit, reine Zeitreihen einzulesen und (analog zur Musik) zu verarbeiten.

Die Entwicklung einer Software ist, wie man aus alltäglicher Erfahrung weiß, nie abgeschlossen und das trifft auch auf das Soundanalyseprogramm SOUNDS zu. Jedoch ist ein Stand erreicht, mit dem man anhand der bislang integrierten Analyseverfahren bereits ein sehr tiefgehendes Verständnis von Klängen entwickeln kann.

Im Folgenden werden die Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten der einzelnen Programmkomponenten und Module kurz beschrieben.

3.1. Schall als Zeitreihe – Darstellung von WAV-Dateien

Mit Hilfe von SOUNDS lassen sich vorzugsweise akustische Zeitreihen (Mikrofonaufnahmen in Form von WAV – Dateien) untersuchen. Diese bestehen aus dem Amplitudenverlauf der Mikrofonmembran und bilden das Rohmaterial für alle weiteren Analysen. In ihnen steckt die gesamte Information über den Klang, die auch dem menschlichen Ohr zur Verfügung steht und die es Musikern ermöglicht z.B. eine Geige von einer Bratsche zu unterscheiden.

Im Hauptfenster des Programms wird diese Amplitudenzeitreihe in der Übersicht angezeigt, und es können Ausschnitte vergrößert werden. Dabei stehen verschiedene Darstellungsmodi und Auswahlmöglichkeiten zur Verfügung (Abb.4).

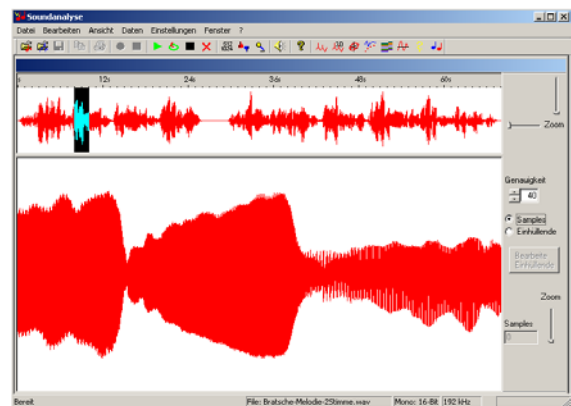


Abb. 4: Zeitreihendarstellung eines akustischen Signals mit Ausschnittsvergrößerung (Ausschnitt aus einer WAV-Datei).

¹⁾ Diese Funktion bieten alle sog. Audioeditoren an; Software also, mit deren Hilfe sich Klang- bzw. Musiksequenzen in Form von z.B. WAV-Dateien bearbeiten lassen. Das Angebot an solchen Programme ist derzeit nahezu unüberschaubar, die Autoren empfehlen z.B. GOLDWAVE, WAVELAB oder AUDACITY im Internet sind aber auch zahlreiche weitere Audioeditoren (teilweise frei) downloadbar.

²⁾ Im Internet finden sich eine Reihe sehr nützlicher Tools zur Frequenzanalyse mit Hilfe der Soundkarte, die entweder als Share- oder als Freeware herunter geladen werden können. Empfohlen sei hier der *AudioTester* zur Frequenzanalyse mit den zusätzlichen Funktionen ‚Zweikanaloszilloskop‘ und ‚Frequenzgenerator‘ (<http://www.sumuller.de/audiotester/>, Shareware) und das Programm *Spectrogram* zur Frequenzanalyse per Fourierspektrum und zusätzlicher Sonogrammdarstellung (in Echtzeit!) (<http://www.visualizationsoftware.com/gram.html>, Shareware; die etwas ältere Version GRAM 5.0 ist noch immer frei downloadbar z.B. unter <http://www.schule-bw.de/unterricht/faecher/physik/mess/soundkarte/soundprogs.htm>). Während der *AudioTester* nur Echtzeitsignale analysiert, lassen mit Hilfe der *Spectrogram*-Software darüber hinaus auch WAV-Dateien verarbeiten.

Wahlweise kann ein Ausschnitt zur Analyse übergeben werden oder man bestimmt eine Position, ab derer die Musik abgespielt und währenddessen analysiert werden soll. Allen weiteren aktiven Modulen werden während des Abspielens in Abständen von 100 ms die jeweils neuen Werte der Zeitreihe zur Auswertung übergeben.

Gilt das Interesse der Gestalt bzw. dem zeitlichen Verlauf von Hüllkurven einzelner Töne, also insbesondere dem Amplitudenverlauf des Einschwingens und Ausklingens, so bietet das Hauptfenster die Möglichkeit, aus gewählten Ausschnitten eine solche charakteristische Hüllkurve zu generieren. Als Ergänzung lässt sich die anfängliche Punktmenge durch Auswahl weiterer Ausschnitte von anderen Tönen überlagern und auf diese Weise eine Art Durchschnittshüllkurve generieren. Anhand der Hüllkurven wird z.B. das exponentielle Abklingen von gezupften Saiten oder das Vibrato von Opernsängern untersucht.

In einer späteren Fassung des Programms könnte dann der Versuch unternommen werden, die so generierten Hüllkurven auf andere Klänge anzuwenden, um so die Charakteristik eines Klangs, der durch die Hüllkurve hervorgerufen wird, präziser zu analysieren und evtl. sogar hörbar zu machen.

3.2. Zeitreihendarstellung – der Klang im Detail

Da die eingelesenen Dateien in der Regel aus mehreren Millionen von Messwerten bestehen³⁾ und man sich oft nur für einen winzigen Ausschnitt davon genauer interessiert, bietet die Zeitreihendarstellung die Möglichkeit, den im Hauptfenster gewählten Ausschnitt messwertgenau darzustellen (Abb.5). Die Darstellung ist so detailliert, dass man bei Bedarf die Diskretisierungsschritte aus der Analog-Digitalwandlung des Mikrofonsignals sehen kann. Gerade bei tieffrequenten Schwingungen, die mit geringen Samplingraten aufgenommen wurden, ist das Diskretisierungsphänomen deutlich zu sehen.



Abb. 5: Detailausschnitt aus einer Saxophonzeitreihe

Als Ergänzung zur Zeitreihendarstellung lässt sich wahlweise im selben Fenster die Autokorrelationsfunktion der untersuchten Zeitreihe anzeigen (als Maß für die Periodizität des Signals). Sie wird als inverse Fouriertransformierte aus dem Leistungsspektrum des Signals erstellt. Angezeigt wird außerdem die Position, bei der die Autokorrelationsfunktion ihre erste Nullstelle hat. Dieser Wert dient als Anhaltspunkt für die

Festlegung der Verzögerungszeit τ für die Rekonstruktion des Zustandsraums (s.u.). Als dritte Funktion kann man in diesem Modul die so genannte ‚mutual information‘ (vgl. [3]) darstellen. Sie liefert einen weiteren Anhaltspunkt für die Wahl der Verzögerungszeit (Position des ersten Minimums bei Attraktoren mit niedriger Einbettungsdimensionen; für eine ausführlichere Darstellung dieser Thematik verweisen wir auf [6], [3] und [4]).

³⁾ Eine zehnsekündige Aufnahme mit 192 kHz besteht bereits aus 1,92 Millionen Messwerten!

3.3. Frequenzanalyse durch Fouriertransformation (FFT)

Als besonders geeignetes mathematisch-physikalisches Werkzeug zur Analyse von ‚akustischen‘ Zeitreihen bietet sich eine klassische Methode an: die Fouriertransformation bzw. die Erstellung eines Fourierspektrums (vgl. z.B. [7] und [8]). Etliche Darstellungen in SOUNDS fußen auf der Grundlage der sog. FFT (*Fast Fourier Transformation*) der ursprünglichen Zeitreihe. Je nach gewählter Anzahl der Punkte für die FFT wird dabei ein mehr oder weniger präzises Bild der Frequenzanteile des Signals ermittelt. Die Frequenzanalyse ist in der abgewandelten Form der Modalanalyse schon heute ein z.B. bei Geigenbauern verwendetes Verfahren zur Optimierung der Instrumente, da sich damit unter anderem Abstrahlschwächen aufdecken lassen, die sich für die Tragfähigkeit von Soloinstrumenten gegenüber dem Orchester als gravierend herausstellen können. Sie bietet damit einen direkten Einstieg in die Lebenswelt von Musikern.

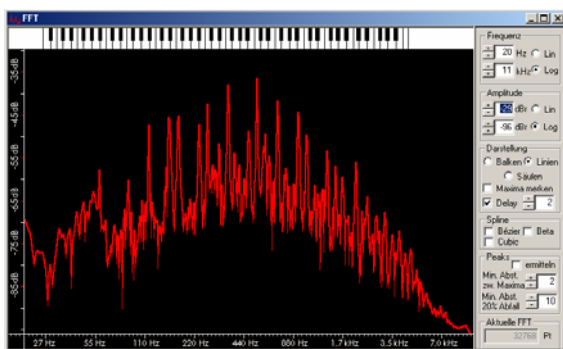


Abb. 6: FFT Spektrum des Windows Begrüßungssounds.

Ganz oben im SOUNDS-FFT-Fenster ist eine Klaviertastatur abgebildet (vgl. Abb.6). Sie dient zur Orientierung, insbesondere für den ‚Musiker‘ – denn so lässt sich sehr einfach den bekannten Tönen eine Frequenz zuordnen (und umgekehrt). Außerdem dient sie zur Kontrolle der angezeigten Frequenzen, denn beim Anklicken der Klaviatur ertönt ein Ton mit der entsprechenden Frequenz aus dem PC-Lautsprecher.

Das FFT-Fensters bietet wahlweise lineare oder logarithmische Amplituden- und Frequenzskalen. Dabei werden die relativen Amplituden der Frequenzanteile bezüglich der Maximalamplitude, die durch die Aufnahmequalität (8bit/16bit) festgelegt ist angegeben. Der voreingestellte Bereich der Frequenzskala reicht von 20 Hz bis zur halben Samplingrate (bei einer Aufnahmequalität von 48 kHz also bis 24 kHz). Diese prinzipielle Einschränkung lässt sich durch das Shannonsche Abtasttheorem begründen: Die höchste durch eine FFT detektierte Frequenz ist kleiner als die halbe Abtastfrequenz, denn durch weniger als zwei Punkte kann keine Sinus- oder Kosinus-schwingung eindeutig bestimmt werden (vgl. z.B. [5]). Bei einer Abtastrate von 48 kHz wird eine 24 kHz-Schwingung gerade durch zwei Stützstellen erfasst, noch schnellere Schwingungen sind somit nicht mehr detektierbar.

Die Frequenzskala ist standardmäßig logarithmisch eingeteilt, denn nur so haben Oktaven denselben geometrischen Abstand, und die Klaviertastatur wird so ‚gleichmäßig‘ abgebildet, wie sie in Wirklichkeit ist.

Für eine gute Frequenzauflösung in den tiefen Frequenzen ist FFT-bedingt eine höhere Anzahl an Punkten zur Auswertung vorzusehen, also die FFT-Größe anzuheben. Hier wird man statt der 4.096 Punkte eher 16.384 Punkte nehmen, sofern genügend lange Töne oder hohe Samplingraten zur Verfügung stehen.

In der Regel interessiert man sich für die Peaks der FFT, d.h. versucht die Frequenzen abzuleiten, die in dem Klang enthalten sind. Jede FFT liefert transformationsbedingt eine gewisse Unschärfe, selbst wenn der analysierte Ton ein reiner Sinuston ist. Die Ursache liegt darin, dass für die Analyse nur ein zeitlich begrenzter Ausschnitt aus dem Tonsignal verwendet wird, und nicht – wie theoretisch erforderlich – die zeitlich ‚unendliche‘ Schwingung. Hier wird in Zukunft der Einsatz von Wavelettransformationen für eine mathematisch elegantere und genauere Analyse geprüft (vgl. z.B. [11]).

Interessiert man sich für die sog. Formanten also den Stärken und Schwächen im Obertonspektrum, so können die ermittelten Peaks durch Splinealgorithmen verbunden werden (vgl. Abb.7).

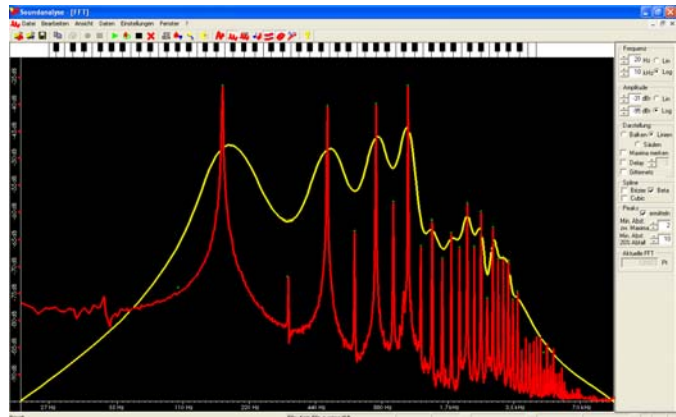


Abb.7: Formanten eines Klarinettons im FFT Modul

3.4. Notenbild und Obertonspektrum

Das Ziel dieses Moduls ist es, Hilfsmittel zur Instrument- und Klanganalyse bereit zu stellen, die vor allem die Charakteristik des Obertonspektrums genauer beleuchten können, denn darin steckt ein Großteil der Informationen, anhand derer sich z.B. Instrumente voneinander unterscheiden lassen.

Anhand der FFT-Darstellung gelingt es, die in einem Ton hauptsächlich enthaltenen Frequenzen algorithmisch zu ermitteln. Aus dieser Darstellung wird aber nicht ersichtlich, inwieweit diese Obertöne mit der theoretischen Obertonreihe übereinstimmen, dass also alle Obertöne geradzahlige Vielfache des Grundtons sind. Genau diese Lücke füllt das „abstrakte Obertonspektrum“. (Bild 8) Hier sind die rechnerischen Frequenzvielfachen des Grundtons als horizontale schwarze Linien eingetragen und links entsprechend der Obertonreihe mit Oktave, Quinte, Quarte usw. beschriftet. Die vom Programm detektierten Peaks sind darauf als rote Linien eingezeichnet, deren Breite durch die Amplitude des entsprechenden Frequenzanteils gegeben ist. Die entsprechenden absoluten Frequenzen und die Differenzfrequenzen zwischen zwei aufeinander folgenden Obertönen sind mit eingetragen. So kann man auf einen Blick sehen, ob es im Spektrum des Instruments Obertöne gibt, die nicht exakt mit den rechnerischen Vielfachen übereinstimmen. Daraus ergeben sich mögliche Hinweise auf eine Charakteristik des entsprechenden Instruments oder der Stimmgruppe.

Im Programm lassen sich die Frequenzbestandteile des so zerlegten Tons sogar einzeln nacheinander anhören. In der Regel wird man dabei die dem Ohr geläufige Naturtonreihe zu Gehör bekommen. Dabei ist erstaunlich, welche hohen Frequenzen auch in sehr tiefen Instrumenttönen noch enthalten sind.

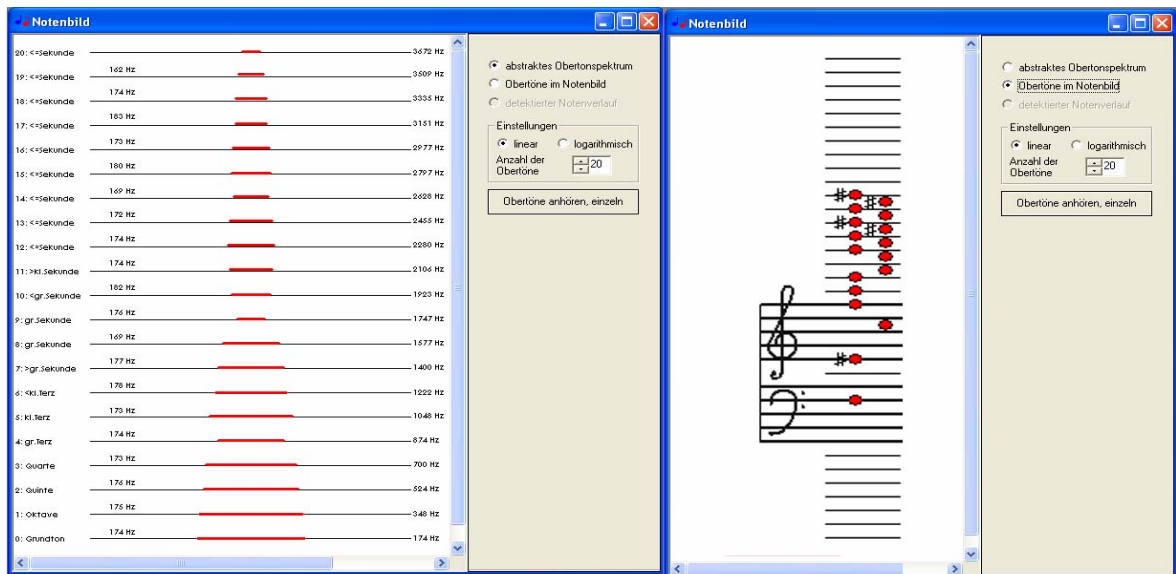


Abb. 8: Obertonspektrum einer Bratsche

Eine zweite Rubrik heißt „Obertöne im Notenbild“ und übersetzt die Darstellung des abstrakten Spektrums in die klassische Notenschreibweise (Abb.8). Diese Darstellung schafft eine Verbindung zur Welt der Musik bzw. zu den aktiv Musizierenden oder Notenkundigen.

Die Zuordnung der Frequenzen zu Notenlinien ist leider nicht trivial, zumal die Aufgabe durch die Regelung der Vorzeichen erschwert wird, so dass es mitunter vorkommt, dass zwei verschiedene benachbarte Frequenzen als enharmonisch verwechselbare Töne notiert werden. Im strengen Sinne bezeichnen sie in der Notation aber die gleiche Frequenz.

3.5. Frequenzlandschaften – 3D FFT

In diesem Modul wird dem Benutzer die Möglichkeit gegeben, den Zeitverlauf der einzelnen FFTs bei der Wiedergabe zu verfolgen und ggf. zu untersuchen. Dazu wird aus den aufeinander folgenden FFT-Daten in einem virtuellen dreidimensionalen Raum ein Netz aus Punkten zusammengesetzt. Durch diese perspektivische Projektion entsteht auf dem Bildschirm der Eindruck eines dreidimensionalen Objekts (Abb.9). Durch die Steuerung

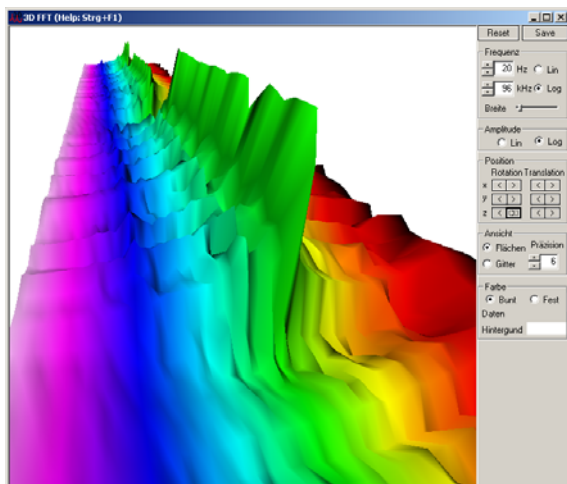


Abb. 9: 3D Fourierspektrum einiger aufeinander folgender Töne.

der Projektion kann man den Standpunkt des Betrachters und die Blickrichtung verändern und erhält so das Gefühl, sich um das Objekt herumzubewegen zu können, wie man es aus den sog. 3D-Spielen kennt.

Das Verfahren ist so aufgebaut, dass die FFT-Daten in dreidimensionale Koordinaten umgerechnet und als konstituierende Punkte eines Drahtgitters eingelesen werden. Die Daten der folgenden FFT werden um einen kleinen Schritt in Richtung der Zeitachse verschoben dem Netz hinzugefügt usw., so dass ein Netz aus vielen hintereinander lie-

genden parallel angeordneten FFTs zusammengesetzt wird. Die einzelnen Punkte bekommen dabei zusätzlich zu ihren Koordinaten in Abhängigkeit von der Frequenz eine Farbe zugeordnet. Wie schon im FFT-Modul kann auch für die dreidimensionale Darstellung der Frequenzbereich ausgewählt und eine Auswahl zwischen linearer oder logarithmischer Einteilung sowie eine Justierung der Blickrichtung vorgenommen werden. Teile dieser Funktionen lassen sich auch direkt über die Funktionselemente der Maus bedienen. Zusätzlich zur Gitternetzdarstellung kann das Gitternetz auch flächig als ‚Gebirgslandschaft‘ dargestellt werden.

Alles in allem ist dieses Modul vor allem ein Visualisierungstool, es eignet sich aber auch zur Analyse (z.B. von Einschwingvorgängen). Die dreidimensionale Farbigkeit und die Möglichkeit, mit der Maus über die ‚Gebirgsfläche‘ zu fliegen, bieten die Möglichkeit, Klänge bzw. ihre Frequenzanteile in ihrem zeitlichen Verlauf zu erfassen und nachzuempfinden.

3.6. Musik ‚sehen‘ – Sonogramme

Mit Hilfe von Software-Sonographen lassen sich die Fourierspektren als Sonogramm visualisieren, dies geschieht unter SOUNDS im Modul ‚Sonogrammdarstellung‘. Dabei werden fortlaufend Spektren (mit konstanter Fensterbreite) ermittelt und als Funktion der Zeit angezeigt. Im Bereich der Musikanalyse hat sich dieses Verfahren etabliert, wobei die Einzelspektren aber nicht dreidimensional (wie z.B. bei der SOUNDS-3D-FFT), sondern die Amplituden der detektierten Frequenzen farblich kodiert in einem zweidimensionalen Plot dargestellt werden (vgl. Abb.10 bis Abb.12): Dabei werden Frequenzen mit hohen Amplituden in kräftigen und Frequenzen mit niedrigen Amplituden in ‚schwachen‘ Farben (über der Zeit) aufgetragen.

Der zeitliche Verlauf des Klangs eines Blockflötentones wird im Sonogramm durch eine farblich stark ausgeprägte Linie für den Grundton (dunkelrot) und farblich weniger auffällige Linien für die Obertöne (orange-rot bis gelb) visualisiert (Abb.10). Der ‚Klang‘ einer kurz angeschlagenen Stimmgabel entspricht in dieser Darstellung einer einzelnen Linie (Grundfrequenz), deren Amplitude langsam abnimmt. Die im Sonogramm angezeigte Farbe wechselt dabei mit abnehmender Amplitude von einem tiefen Rot über Orange-Gelb bis hin zu Blau und verschwindet dann ganz. Das Sonogramm eines Gitarrentones gleicher Höhe enthält den farblich gleich markierten Grundton, besitzt aber ein etwas anderes Obertonspektrum. D.h. oberhalb der dunkelroten ‚Grundlinie‘ erscheinen entsprechend andere Linien. Auf diese Weise lassen sich Klänge, die menschliche Sprache oder Gesang, aber

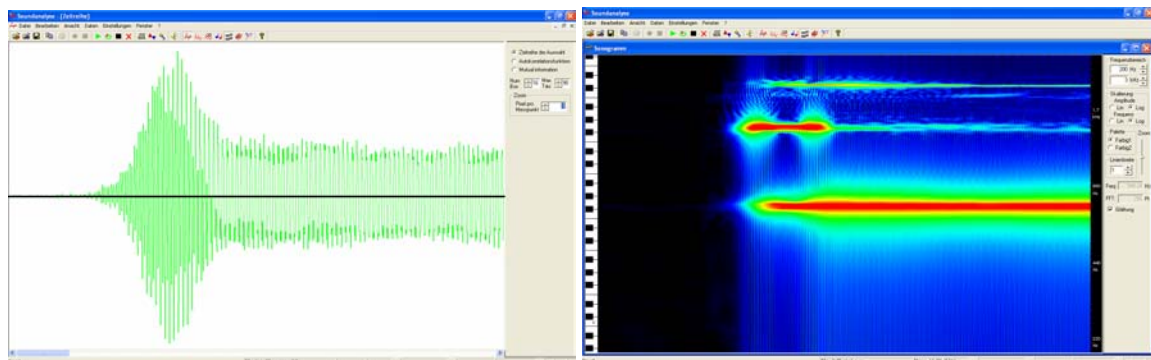


Abb.10: Zeitserie und Sonogramm eines Blockflötensignals (mit Einschwingverhalten).

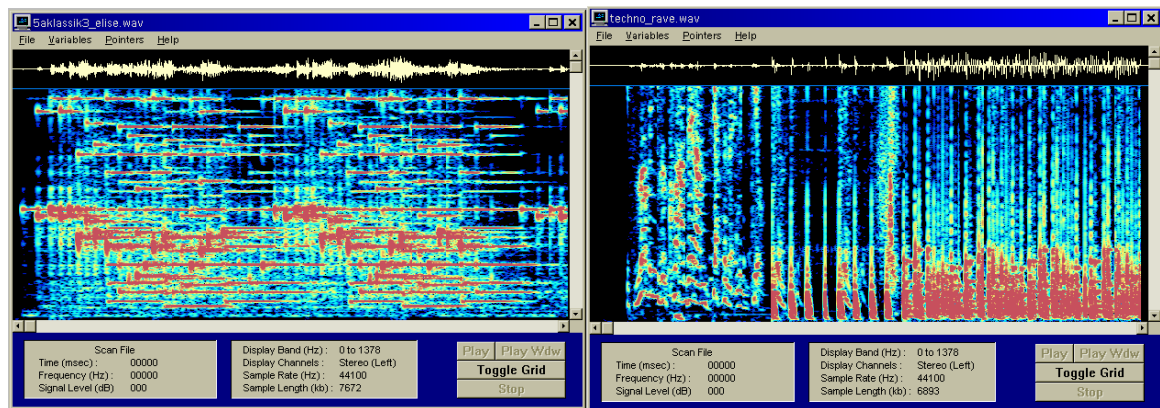


Abb. 11: Sonogramme⁴⁾ der ersten Takte des Stückes ‚Für Elise‘ (li.) und von Techno-Musik (re.).

auch Tierlaute oder andere Signale aus Natur und Technik ästhetisch sehr ansprechend visualisieren und auf sehr anschauliche Weise analysieren, denn die Interpretation der Linienstrukturen im Sonogramm ist i.a. sehr eindeutig und aussagekräftig. Mit Hilfe von Sonogrammen können z.B. auch Variationen von Tönen und Klängen und besonders eindrucksvoll Musiksequenzen dargestellt werden. Abb. 11 zeigt einige Takte unterschiedlicher Musikstücke (Frequenzband jeweils bis ca. 1,4 kHz). Im linken Sonogramm (‚Für Elise‘, nur Klavier) sind noch die einzelnen Spektren der angespielten Noten, im rechten Diagramm nach ein paar Takten Sprechgesang deutlich die im schnellen Rhythmus intonierten ‚Klänge‘ zu erkennen. Die starke Einfärbung im unteren Frequenzbereich der Technomusik entspricht einer speziellen Frequenzverteilung – es werden nicht mehr einzelne Töne eines Instruments gespielt, sondern eher ‚Frequenzbänder‘ – die hier verwendeten Instrumente sind synthetisch. Der Vergleich der beiden Sonogramme macht neben der Unterschiedlichkeit der Einzelspektren aber auch zwei weitere wesentliche Unterschiede deutlich, denn es lassen sich hier erste Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Musikstile ziehen: Technomusik besitzt einen sehr schnellen und stark periodischen (monotonen) Rhythmus und die Grundtöne der betrachteten Sequenz werden kaum moduliert. Das Sonogramm der klassischen Musik zeigt eine Akzentuierung auf einzelne Melodietöne (bzw. Klänge) und deren Variation. Insbesondere ist hier deutlich das längere Aushalten einiger Töne auch über mehrere Takte hin sichtbar, während bei der Technomusik eine eigentliche Melodieführung kaum zu erkennen (bzw. vorhanden) ist.

Das Sonogramm bietet also eine weitere, sehr nützliche Visualisierungs- bzw. Analyseform der FFT-Analyse im Zeitverlauf.

Am linken Rand des SOUNDS-Moduls ‚Sonogrammdarstellung‘ (Abb.12) befindet sich wieder die für den ‚Musiker‘ wichtige Klaviatur (s.o.), am rechten Rand die Frequenzskala und der Parameterbereich, und die x-Achse ist

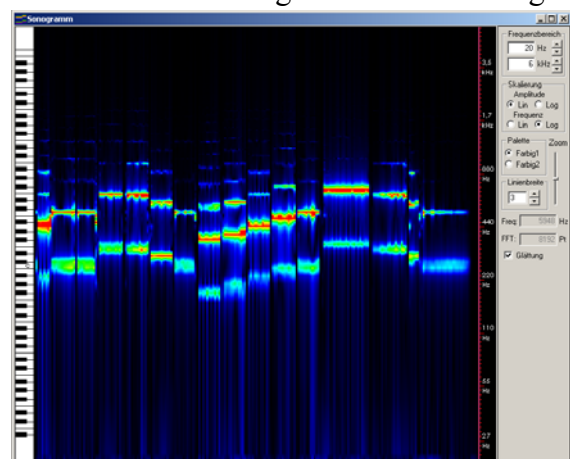


Abb. 12: Sonogrammdarstellung einer Melodie in SOUNDS.

⁴⁾ Die abgebildeten Sonogramme wurden mit Hilfe der Software *Spectrogram* erstellt; Link s.o. in Fußnote 2).

eine Zeitachse. Die Farbcodierung ist so eingerichtet, dass nur die FFT-Peaks farblich hervortreten. Frequenzen mit sehr hoher Amplitude erscheinen rot, schwächere in Abstufungen gelb, grün, blau (s.o.). Wie bereits beschrieben, lässt sich so auf einfache Weise aus der Sonogrammdarstellung auch ein Melodieverlauf ableiten. Notenhöhen und Notenwerte können dabei direkt aus der Position des Grundtonpeaks und der Länge der Linien (zumindest qualitativ) bestimmt werden.

Die Einstellungsmöglichkeiten umfassen auch in diesem Modul die Auswahl eines bestimmten Frequenzbereichs, einer linearen oder logarithmischen Frequenzdarstellung und der Farbpalette. Ist der Schalter „Glättung“ aktiviert, wird zwischen den einzelnen Farbwerten für verschiedene Messpunkte interpoliert, denn insbesondere bei geringer FFT-Größe ist die Frequenzauflösung in den tiefen Frequenzbereichen relativ schlecht.

3.7. Rekonstruktion von ‚musikalischen‘ Attraktoren

Das Methodenrepertoire der nichtlinearen Physik bietet im Rahmen der *Zeitreihenanalyse* eine Vielzahl von Analyseverfahren zur Untersuchung irregulärer, deterministisch-chaotischer Signale an, die auch auf Musiksequenzen angewendet werden können.⁵⁾

Vom Verhalten einfacher chaotischer Systeme weiß man, dass sie trotz der Unmöglichkeit, das Verhalten lokal vorhersagen zu können, eine globale Vorhersage erlauben, die in Form eines kompakten geometrischen Gebildes, einem sog. chaotischen Attraktor visualisiert werden kann. Das zeitliche Verhalten eines dynamischen Systems kann in Form einer sog. Trajektorie dargestellt werden, die in einem (durch die das Systemverhalten beschreibenden Parameter aufgespannten) mehrdimensionalen Zustandsraum einen begrenzten, kompakten Raum belegt, den Attraktor. Obwohl das lokale Verhalten einer Trajektorie nicht vorhersagbar ist, verlässt sie doch niemals den chaotischen Attraktor und ist somit global vorhersagbar.

Aber auch das Verhalten nicht-chaotischer Systeme lässt sich im Zustandsraum in Form eines Attraktors darstellen. Dabei zeigen stark periodisch arbeitende Systeme sehr geordnete, oft nur einfach geschlossene geometrische Figuren. So verläuft die Trajektorie der Zustandsgrößen (Ort und Geschwindigkeit) eines harmonisch schwingenden Pendels z.B. auf einem kreisförmiger Attraktor.

Sieht man den Attraktor als Signet des betrachteten Systems an, so sollte es möglich sein, auch aus den Daten einer musikalischen Zeitreihe ein entsprechendes Diagramm in einem musikalischen Zustandsraum zu erstellen. Da aber – wie gerade bei musikalischen Signalen – nicht alle relevanten Systemgrößen der messtechnischen Erfassung zugänglich sind, muss der zugehörige Attraktor speziell konstruiert werden, dafür hat sich ein entsprechendes *Rekonstruktionsverfahren* etabliert. Dazu wird der mehrdimensionale Zustandsraum des hypothetischen Systems (z.B. Musik) aus der eindimensionalen Zeitserie mit Hilfe von zeitverzögerten Koordinaten rekonstruiert. (Eine eingehende Beschreibung dieses Verfahrens findet sich z.B. in [6].)

Im rekonstruierten Zustandsraum des Klangsignals eines Bratschentons (Abb.13) ergibt sich in der dreidimensionalen Darstellung ein kompaktes, aber leicht verschlungenes und im Raum leicht gekipptes Gebilde – die Interpretation als Attraktor eines periodischen Sig-

⁵⁾ Der interessierte Leser sei hier z.B. auf [4] und [6] verwiesen.

nals liegt nahe. Allerdings werden auch deutlich die Amplitudenschwankungen und ganz charakteristische ‚Schleifen‘ sichtbar. Und tatsächlich ist es so, dass jede Instrumenten- bzw. Stimmgruppe seinen eigenen, charakteristischen Attraktor besitzt – er kann gleichsam als Fingerabdruck des Instrumentenklangs gedeutet werden (vgl. [10] und [11]).

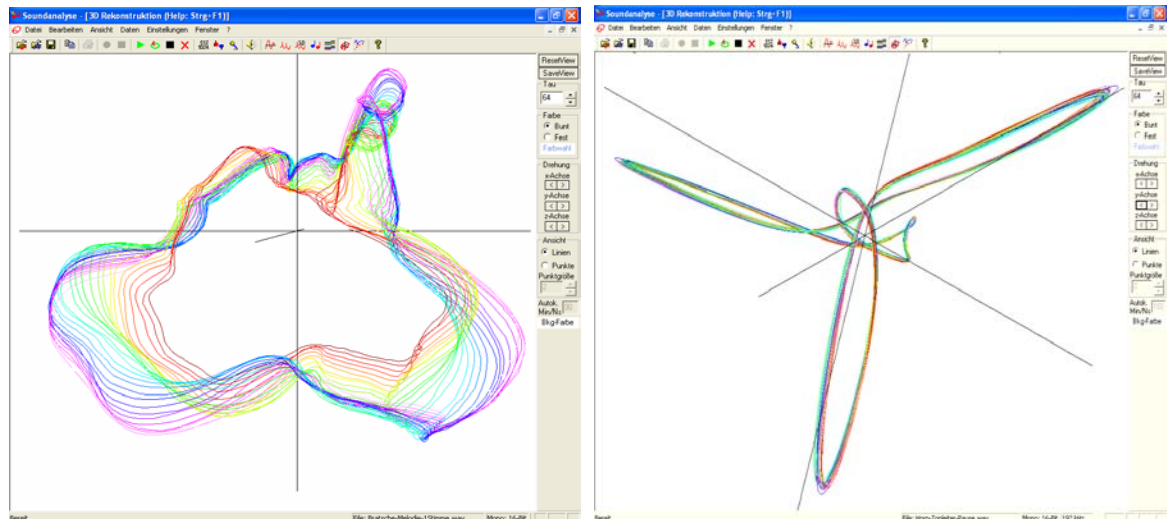


Abb. 13: Darstellung eines dreidimensionalen, rekonstruierten Bratschenton- und eines Horn- Attraktors.

Das Verfahren zur Rekonstruktion von Attraktoren lässt sich auf jede (eindimensionale) Zeitreihe anwenden. Abb.14 zeigt die dreidimensionale Darstellung eines Nachtigallengesangs. Auch hier ergibt sich ein kompakter Attraktor: Der Gesang einer Nachtigall weist zwar Periodizitäten auf, aber gleichzeitig wird deutlich, dass dieses Signal sehr viel komplexer ist als das einer Bratsche – es erinnert in seiner Struktur bereits an die Attraktoren chaotischer Systeme (vgl. z.B. [9] oder [10]). Die Struktur eines Attraktors gibt also auch Hinweise auf die Komplexität der Dynamik.

Im SOUNDS-Modul wird der musikalische Zustandsraum direkt aus der ursprünglichen Schallpegel-Zeitreihe rekonstruiert. Da bei dieser Methode kein rechenintensives Verfahren wie z.B. eine FFT erforderlich ist, bringt dies einen erheblichen Rechenzeitgewinn mit sich. Das in SOUNDS implementierte Rekonstruktionsverfahren erlaubt es daher, immer dreidimensionale Attraktoren (auch in Echtzeit!) zu generieren.

Im Parameterbereich dieses Moduls lässt sich die für dieses Verfahren wichtige Zeitverzögerung τ einstellen (s.o.) sowie festlegen, ob die Punkte einfarbig oder bunt abgebildet werden. Zusätzlich wird der Wert der ersten Nullstelle bzw. des ersten Minimums der Autokorrelationsfunktion der ausgewählten Zeitreihe angezeigt, der ja ein Anhaltspunkt für die Wahl des Zeitverzögerungsparameters ist (s.o.). Oftmals ist die Wahl von τ aber auch ‚per Hand‘ empfehlenswert, da jedes Be-

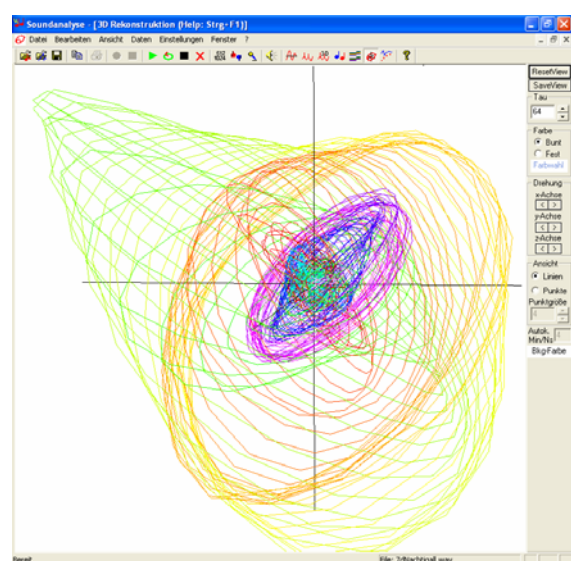


Abb. 14: Zweidimensionale Projektion des rekonstruierten Attraktors einer Tierstimme – der Gesang einer Nachtigall.

trachteraue ganz eigene Vorstellungen einer auch ästhetisch ansprechenden Darstellung hat. Der rekonstruierte Attraktor kann über alle drei Raumachsen gedreht werden, dies erleichtert die Erfassung der räumlichen Geometrie des entstandenen Gebildes.

3.8. Zeitreihenanalyse mit SOUNDS

In SOUNDS sind zusätzlich zu den Visualisierungsmodulen auch mehrere aus der (nichtlinearen) Zeitreihenanalyse bekannte analytische Verfahren zur Berechnung charakteristischer Kenngrößen implementiert. Berechnet werden sog. Lyapunovexponenten und –spektren sowie die fraktalen Korrelationsdimensionen der rekonstruierten Attraktoren. Die bereits erwähnte Feinstruktur eines Attraktors lässt z.B. weitere Rückschlüsse auf das betrachtete ‚System‘ zu. So können anhand der Fraktalität des Attraktors Aussagen über die Komplexität der dem Verhalten zugrundeliegenden Dynamik gemacht werden. Dazu müssen die *Einbettungs-* und die *fraktale Korrelationsdimension* des Attraktors berechnet werden.

Der interessierte Leser sei hier auf die ausführliche Hilfefunktion des Programms und für eingehende Beschreibungen der verwendeten Verfahren auf die entsprechende Literatur verwiesen: [4], [6], [9]–[11].

4. Zusammenfassung

Im Bereich der Analyse von Klängen oder Musiksequenzen können die zunächst subjektiven Interpretationsmuster der menschlichen Wahrnehmung durch eine physikalisch-objektive Betrachtungsweise ergänzt werden. Gleichzeitig offenbart sich dabei die besondere Aspekthaftigkeit der Physik, denn der musikalische Gehalt oder die Bedeutung von Musik erfährt erst im Rahmen der ästhetischen Rezeption durch den Menschen seine Bedeutung. Die Physik stellt andererseits aber auch Methoden bereit, bei denen im Rahmen neuartiger Darstellungs- und Analyseverfahren zwar immer die Signalhaftigkeit in den Vordergrund gestellt wird, gleichzeitig vermag die Physik aber auch, die akustische Wahrnehmung durch ästhetisch äußerst ansprechende Visualisierungen, wie z.B. 3D-FFTs oder rekonstruierte ‚musikalische‘ Attraktoren zu erweitern.

Das Softwarepaket SOUNDS stellt unter einer gemeinsamen Programmoberfläche eine Reihe von Verfahren zur Analyse und Visualisierung von akustischen Signalen zur Verfügung. Für den Unterricht besonders interessant sind dabei sicherlich Echtzeituntersuchungen von Mikrofonsignalen der Stimme, von Instrumentenklängen oder anderen Signalen aus Natur und Technik.

Auf diesem Wege könnte es gelingen, die lebensweltliche und die physikalische Perspektive zu verknüpfen: Die Physik reduziert unsere Erfahrungswelt einerseits auf Messbares und löst sie gleichsam von Emotionen, aber gleichzeitig transformiert sie subjektiv bedeutsame Erfahrungen auf eine intersubjektive Erkenntnisebene. Die physikalische Sichtweise auf die Musik erlaubt zwar keine Bewertung von Musik als solcher, physikalische Methoden ermöglichen aber objektive und adäquate Repräsentationen wissenschaftlicher Teilaspekte, die wiederum aus einer lebensweltlichen Perspektive heraus ihre ‚Schönheit‘ auf visueller Ebene erhalten: Musik als Folge von Tönen und Klängen ist also sowohl *akustisch* sinnlich und emotional wahrnehmbar als auch – mit Hilfe physikalischer Visualisierungsmethoden – *visuell* sinnlich erfahrbar.

5. Systemvoraussetzungen und Download

Die Software SOUNDS ist mit Microsoft Visual C++ 6.0 Service Pack 6 geschrieben und nutzt Routinen aus der Multimediaschnittstelle DirectX 8.1b. Mindestvoraussetzung ist also ein Windows 9x/Windows 2000/Windows XP Rechner, auf dem DirectX 8.1b installiert sein muss. Für die Livemikrofonaufnahmen ist eine Soundkarte mit 16 bit/44 kHz-Eingang empfehlenswert, jedoch nicht zwingend notwendig – eine installierte Soundkarte (mit Lautsprecherausgang und -sprechern oder Kopfhörer) jedoch Voraussetzung. Ein Rechner mit 400Mhz ist für die flüssige Darstellung vor allem großer Musikdateien schon etwas schwach bemessen, ein Arbeitsspeicher von mehr als 256 MByte unbedingt zu empfehlen. Die Festplattengröße spielt nur für eventuelle Aufnahmen eine große Rolle, das Programm ist mit 200 MByte freiem Speicher gut bedient, für die Installation benötigt es weniger als 1 MByte davon. Durch die Vielzahl der Module, die im Prinzip alle gleichzeitig gestartet bzw. dargestellt werden können, empfiehlt sich eine Bildschirmauflösung von 1280x1024 Pixel auf einem 19'' Monitor mit mindestens 16 Bit Farbtiefe. Alternativ sollte die Auswahl der aktiven bzw. angezeigten Fenster entsprechend beschränkt werden.

Das Programm ist Freeware und mit zahlreichen Klangbeispielen auf der aktuellen DPG-Tagungs-CD des Fachverbandes Didaktik der Physik enthalten [12]. Im Internet steht es auf der Homepage der AG Didaktik der Physik der Freien Universität Berlin zum Download bereit; derzeit unter der Adresse: <http://www.ibe.tu-berlin.de/WebsiteSounds/>

6. Literatur:

- [1] Schlichting, H. J.: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts (Teil 1 u. 2). In: Physik in der Schule 34/9, 283-288 und 34/10 (1996) S. 339.
- [2] Muckenfuß, H.: Themen und Kontexte als Strukturelemente des naturwissenschaftlichen Unterrichts. In: Physik und Didaktik in Schule und Hochschule (PhyDid) 2/3 (2004) S.57.
- [3] Fraser, A. M.; Swinney, H. L.: Independent coordinates for strange attractors from mutual information. In: Phys. Rev. A 33 (1986) S. 134.
- [4] Kantz, H.; Schreiber, T.: Nonlinear Time Series Analysis, 2. Edition. Cambridge: University Press, 2004.
- [5] Henning, G.; Spittel, U.: Einführung in die digitale Signalverarbeitung. Berlin: Verlag Technik, 1991.
- [6] Nordmeier, V.; Schlichting, H. J.: Auf der Suche nach Strukturen komplexer Phänomene. (Themenheft Komplexe Systeme) In: Praxis der Naturwissenschaften - Physik, 1/45 (1996) S.22.
- [7] Litschke, H.: Physik und Musik. – Altes Thema und moderne Computer. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik, 3/49 (2000) S.22.
- [8] Pierce, J. R.: Klang. Musik mit den Ohren der Physik. Heidelberg u. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 1999.
- [9] Nordmeier, V.: Physik jenseits der Ordnung – Zugänge zur nichtlinearen Dynamik aus fachdidaktischer Sicht. Oder: Wie chaotisch ist Musik? In: Nordmeier, V.: Didaktik der Physik – Frühjahrstagung Bremen 2001. Berlin: Lehmanns-Media, 2001.
- [10] Voßkühler, A.: Physikalische Untersuchungen zur Analyse und Visualisierung von Klängen aus dem Blickwinkel des Physikunterrichts. TU Berlin: Examensarbeit, 2004. (unveröffentlicht)
- [11] Bader, R.: Fraktale Dimensionen, Informationsstrukturen und Mikrorhythmik der Einschwingvorgänge von Musikinstrumenten. Universität Hamburg: Dissertation, 2002. (unveröffentlicht)
- [12] Nordmeier, V.; Oberländer, A.: Didaktik der Physik – Berlin 2005. Berlin: Lehmanns-Media, 2005. (im Druck)

Kontakt:

Prof. Dr. Volkhard Nordmeier, Adrian Voßkühler

Institut für Atomare Physik und Fachdidaktik, Technische Universität Berlin

Sekr. PN 1-1, Hardenbergstraße 36, 10623 Berlin

e-mail: nordmeier@physik.tu-berlin.de oder adrian@physik.tu-berlin.de