Analoge Klangsynthese zur Vermittlung von Grundkenntnissen der Signalverarbeitung an Studierende nicht-technischer Fachrichtungen

Matthias Krumme[1], Manuel Webersen[1], Leander Claes[1], Yvonne Webersen[2]
[1] *Universität Paderborn, Elektrische Messtechnik, 33098 Paderborn, Deutschland*
[2] *33098 Paderborn, Deutschland*
Korrespondenzautor: krumme@emt.uni-paderborn.de

Motivation und Ziele

Im Studiengang *Populäre Musik und Medien* an der Universität Paderborn werden unter anderem Grundlagen der Musikwissenschaft und der Musikproduktion vermittelt. Signalverarbeitende Audiotechnik stellt einen wichtigen Bestandteil der Musikproduktion und -wiedergabe dar und wird im Rahmen des Studiengangs vielfältig eingesetzt, meist jedoch ohne Betrachtung der technischen Hintergründe. Ziel der neu konzipierten Lehrveranstaltung *Klanganalyse und -synthese* ist es daher, eine Brücke zwischen der eher kulturwissenschaftlichen Sicht auf Musikproduktion einerseits und der (ingenieur)technischen Sicht andererseits zu schlagen. Studierende sollen gängige Methoden der Signalverarbeitung nachvollziehen und selbst einsetzen, um ihre Anwendung in der Praxis erkennen und kritisch beurteilen zu können. Die dafür erforderlichen Grundlagenkenntnisse werden ebenfalls vermittelt.

Eine besondere Herausforderung stellen dabei die fehlenden physikalisch-technischen Grundlagenkenntnisse der Studierenden dar. Die für MINT-Studiengänge übliche theorie- und mathematikorientierte Herangehensweise ist daher hier ungeeignet. Stattdessen wird ein Ansatz mit starkem Anwendungsbezug und praktischen Beispielen gewählt, bei dem grundlegende Begriffe und Konzepte der Signalverarbeitung (z. B. Amplituden- und Frequenzmodulation) von den Studierenden mit bekannten Klangeindrücken oder gängigen Arbeitsschritten aus der Musikproduktion verknüpft werden können.

Lehrveranstaltungskonzept

Die Lehrveranstaltung besteht aus zwei Teilen: Zunächst werden im Vorlesungsteil die erforderlichen Konzepte und Methoden eingeführt und in der begleitenden praktischen Übung zur Anwendung gebracht. Den zweiten Teil bildet die Projektphase, in der die Studierenden in Kleingruppen von zwei bis drei Personen selbstständig eine umfangreichere Aufgabe bearbeiten. Dabei wird, im Unterschied zu den vorherigen Übungen, bewusst auf eine kleinschrittige Aufgabenstellung verzichtet, um die Teilnehmenden im Sinne einer Kompetenzorientierung dazu zu befähigen, mit ihrem neuerworbenen Wissen praxisnahe Probleme zu lösen [1]. Als Abschluss der Lehrveranstaltung werden die ausführlich dokumentierten Ergebnisse in einem Vortrag (15 bis 20 Minuten) mit anschließendem Kolloquium präsentiert.

Die Struktur der Lehrveranstaltung orientiert sich grundsätzlich an der Lernzieltaxonomie nach [2], gemäß der die Lernziele auf verschiedenen Niveaustufen hierarchisch gegliedert werden. Im Verlauf der Lehrveranstaltung zielen die Aufgabenstellungen zunehmend auf die Lernziele höherer Stufen.

Vorlesungsteil und Inhalte

Zu Beginn der Lehrveranstaltung werden verschiedene physikalisch-technische Grundlagen der Akustik behandelt. Viele der betrachteten Themen sind den Studierenden aus der Alltagserfahrung bekannt, können aber meist nicht genau zugeordnet oder korrekt bezeichnet werden. Ziel der Vorlesung zu diesen Themen ist es daher, die Alltagserfahrung physikalisch einzuordnen, die Begrifflichkeiten korrekt zu definieren und typische Fehlvorstellungen zu thematisieren. Beispiele für die betrachteten Themen sind die physikalischen Grundlagen der Schallausbreitung (bekannter Aspekt: Raumhall), die Darstellung von Zeitsignalen (bekannt aus Aufnahme-Software) oder Signalspektren (bekannt aus Wiedergabe-Software) sowie Schallpegelmaße (Dezibel-Skala).

Das zentrale Thema der Signalverarbeitung im Rahmen der Musikproduktion bzw. die dafür nötigen Schritte können letztlich auf relativ einfache technische Komponenten, nämlich Verstärker, Filter und Signalgeneratoren, zurückgeführt werden. Mit konstanten Parametern werden diese beispielsweise in Mischpulten (als Vorverstärker, Kanal-Fader oder Equalizer) verwendet, während durch zeitabhängige Steuerung bestimmter Parameter verschiedene gängige Klangeffekte (Tremolo, Vibrato, Phaser usw.) erzeugt werden können. Im Rahmen der Vorlesung werden diese Komponenten daher zunächst einzeln und anschließend in ausgewählten Kombinationen vorgestellt.

Zur abstrakten Beschreibung der Zusammenhänge werden die in den Ingenieurwissenschaften gängigen Blockschaltbilder eingeführt und in vereinfachter Form (siehe z. B. Abbildung 1) verwendet. Auf eine mathematische Modellierung der Komponenten wird verzichtet, da hierfür beispielsweise Kenntnisse der komplexen Wechselstromrechnung erforderlich wären. Stattdessen soll der Bezug zwischen der abstrakten Beschreibung und dem Höreindruck, der den Studierenden für die meisten Beispielanwendungen geläufig ist, hergestellt werden. Bereits in der Vorlesung wird daher mit Hörbeispielen gearbeitet.

Praktische Übung und Projektphase

Die praktische Übung wird vorlesungsbegleitend durchgeführt und dient der Veranschaulichung der Vorlesungsinhalte. Im Grundlagenteil sollen die Teilnehmenden beispielsweise die behandelten physikalischen Phänomene

erleben, erkennen (Lernziel *Erinnern*) und anschließend korrekt beschreiben (Lernziel *Verstehen*). Elementare Kenntnisse über die Durchführung von Experimenten u. ä. werden begleitend vermittelt, etwa am Beispiel der Schallpegelmessung.

Beim zentralen Thema der Signalverarbeitung sollen die Studierenden zunächst die einzelnen Komponenten zur Signalverarbeitung kennenlernen (Lernziel *Verstehen*) und ihr Verhalten praktisch untersuchen (Lernziel *Anwenden*), um im späteren Verlauf auch komplexere Systeme aus mehreren Komponenten differenziert betrachten zu können (Lernziel *Analysieren*). Im Rahmen der Lehrveranstaltung wird dafür der analoge Modularsynthesizer A100 der Firma *Doepfer* eingesetzt, der gegenüber herkömmlicher Laborausstattung (Signalgeneratoren, Filterbänke usw.) zahlreiche Vorteile bietet: Da es sich um ein Komplettsystem handelt, sind alle Komponenten direkt miteinander kompatibel, d. h. spezielle Adapterleitungen, Pegelanpassungen usw. entfallen grundsätzlich. Außerdem ermöglicht der Fokus auf musikalische Anwendungen einen vereinfachten Einstieg, da die technische Terminologie vermieden wird und unnötige Einstellungsmöglichkeiten (z. B. Frequenzen bis in den MHz-Bereich) nicht zur Verfügung stehen. Zusätzlich praktische Vorteile ergeben sich aus der relativ kleinen Stellfläche, die für das Gesamtsystem benötigt wird, sowie der einheitlichen Spannungsversorgung.

Im Rahmen der Projektphase steht ebenfalls der Modularsynthesizer im Vordergrund. Die zugehörigen Aufgabenstellungen werden jedoch allgemeiner formuliert und erfordern somit die eigenständige Planung und Umsetzung der Lösung durch die Teilnehmenden (Lernziele *Bewerten* sowie *Schaffen*).

Subtraktive Klangsynthese

Die subtraktive Synthese ist seit den 1960er Jahren die am weitesten verbreitete Form der Klangsynthese, die auch im *Doepfer* A100 zum Einsatz kommt. Ihr Grundprinzip besteht darin, ein meist obertonreiches Grundsignal durch die (namensgebende) Entfernung gewisser Frequenzanteile zu formen. Umfangreiche Gestaltungsmöglichkeiten entstehen durch die zeitabhängige Variation (*Modulation*) verschiedenster Parameter.

Als Signalquelle dienen ein oder mehrere Oszillatoren (OSC), die meist einige einfache Wellenformen (Sinus, Dreieck, Rechteck, Sägezahn) erzeugen können. Bei moderneren digitalen Synthesizern können auch beliebige gespeicherte Wellenformen in Form von *Wavetables* oder Samples in der entsprechenden Tonhöhe abgespielt werden. Die Grundfrequenz, also die wahrgenommene Tonhöhe, wird typischerweise durch die auf einer Klaviatur gespielte Taste festgelegt.

Die Klangformung erfolgt dann mit einem oder mehreren Filtern, deren Grenzfrequenz eingestellt werden kann. Meist kann zusätzlich die Charakteristik (Tiefpass, Hochpass, Bandpass usw.), die Güte oder die Ordnung des Filters eingestellt bzw. ausgewählt werden. Eine weitere, wenn auch sehr einfache, Beeinflussung des Klanges erfolgt durch Verstärker (VCA, *voltage controlled amplifier*), die schlicht den Signalpegel verändern. Da die meisten Synthesizer mehrere Signalpfade aufweisen, kommen außerdem ein oder mehrere Mischer zum Einsatz, um die Signale zusammenzuführen.

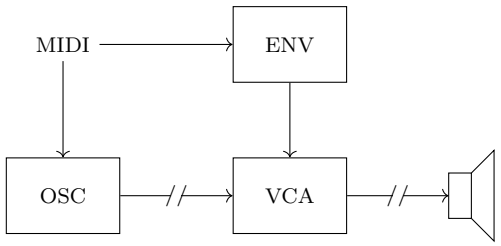

Abbildung 1: Reduziertes Blockschaltbild eines subtraktiven Synthesizers

Zur weiteren Klangformung stehen Modulationsquellen zur Verfügung, die zur zeitabhängigen Variation verschiedenster Parameter von Oszillatoren, Filtern und Verstärkern verwendet werden können. Je nach Synthesizer-Modell können auch andere Modulationsquellen gesteuert werden. Die beiden klassischen Beispiele für Modulationsquellen sind Hüllkurvengeneratoren (*envelope generators*, ENV), die transiente Steuersignale in Abhängigkeit von der Betätigung einer Taste auf der Klaviatur ermöglichen, und der *low frequency oscillator* (LFO) für periodische Steuersignale. [3]

Klassische Oszillatoren wie die des Doepfer A100 liefern kontinuierlich ein Ausgangssignal, d. h. unabhängig davon, ob eine Taste auf der Klaviatur gespielt wird. Ausgangspunkt für die Klanggestaltung ist daher in der Regel die in Abbildung 1 skizzierte Basiskonfiguration. Dabei wird der Hüllkurvengenerator zur Steuerung des Verstärkers verwendet, sodass das Oszillatorsignal nur bei gedrückter Taste am Ausgang anliegt. In der hier verwendeten Konfiguration des Doepfer A100, das über keine eingebaute Klaviatur verfügt, wird die Information über den Tastendruck digital über das *musical instrument digital interface* (MIDI) übermittelt und innerhalb des Systems als (analoge) Steuerspannung bereitgestellt.

Es sei angemerkt, dass seit dem ersten Auftreten in den 1960er Jahren unzählige Synthesizer mit verschiedensten Funktionen auf dem Markt erschienen sind, die hier nicht umfassend betrachtet werden können. Daher werden hier nur die oben aufgeführten elementaren Komponenten betrachtet.

Modularsynthesizer in der Lehrveranstaltung

Analoge Modularsysteme bieten gegenüber den meisten marktüblichen Synthesizern mit fest verdrahteten Komponenten zwei Vorteile für den Einsatz in der Lehrveranstaltung: Einerseits ermöglicht der modulare Aufbau die einfache Übertragung der abstrakten Konzepte auf die praktische Anwendung, da die einzelnen Module direkt mit den im Blockschaltbild dargestellten Komponenten korrespondieren. Die erforderliche Verschaltung kann so direkt abgeleitet werden. Andererseits können alle Ein- und

Abbildung 2: Eine Zeile des *Doepfer* A100 Modularsystems mit unterschiedlichen signalverarbeitenden Modulen

Ausgangssignale, auch Steuersignale, direkt abgegriffen und zur Veranschaulichung visuell (mittels Oszilloskop) oder akustisch (mittels Lautsprecher) ausgegeben werden. Somit ist es möglich, die praktische Übung direkt auf die behandelten Signalverarbeitungskomponenten anzupassen und zunächst einzelne Module und anschließend ausgewählte Kombinationen zu betrachten.

Das Modularsystem enthält alle dafür erforderlichen Komponenten zur Signalerzeugung und -verarbeitung, darunter zwei Oszillatoren, zwei Filtermodule mit insgesamt 17 Filtern sowie Verstärker mit linearer und exponentieller Kennlinie, siehe Abbildung 2. Alle Module des Systems können an der Vorderseite mit Klinkensteckern (3,5 mm) miteinander verbunden werden, so dass der Abgriff von unterschiedlichen Signalen einfach möglich ist. Freies Experimentieren am System ist ohne große Einschränkungen möglich, da eine fehlerhafte Verbindung, etwa die zweier Ausgänge, in der Regel nicht zum Ausfall von Modulen führt.

Eine Herausforderung für die Lehrenden ist die Vermittlung der Tatsache, dass Audiosignale und Steuersignale sich nur konzeptuell, nicht aber technisch unterscheiden. Beispielsweise können beide Signaltypen in gleicher Weise abgegriffen und visualisiert werden, da es sich in beiden Fällen um elektrische Spannungen handelt. Die versehentliche Mischung beider Signaltypen führt hingegen oft zu unerwarteten Resultaten und einer langwierigen Fehlersuche. Vorkenntnisse bei der Bedienung gewöhnlicher (nicht modularer) Synthesizer sind dabei meist nutzlos, da bei diesen Geräten eine strenge Trennung der beiden Signaltypen vorliegt.

Ansätze zur praktischen Vermittlung der Inhalte

Die Vermittlung der Inhalte im Rahmen der praktischen Übung erfolgt gemäß zweier Ansätze bzw. Schwerpunkte, die in der Aufgabenstellung gesetzt werden können. Diese werden im Folgenden am Beispiel der Amplitudenmodulation vorgestellt.

Das Konzept der Amplitudenmodulation [4] wird in technischen Studiengängen in der Regel im nachrichtentechnischen Kontext vermittelt. Im musikalischen Kontext existiert dieses Konzept auch und ist als Effekt oder Spieltechnik unter dem Begriff *Tremolo* bekannt [5]. Der auditive Eindruck des Tremolo kann von den Teilnehmenden in der Regel benannt und zugeordnet werden. Gegebenenfalls können Hörbeispiele zur Klärung eingesetzt werden.

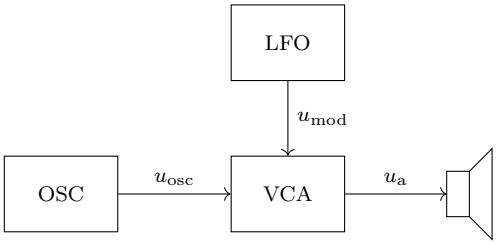

Abbildung 3: Blockschaltbild für die Erzeugung eines amplitudenmodulierten Signals

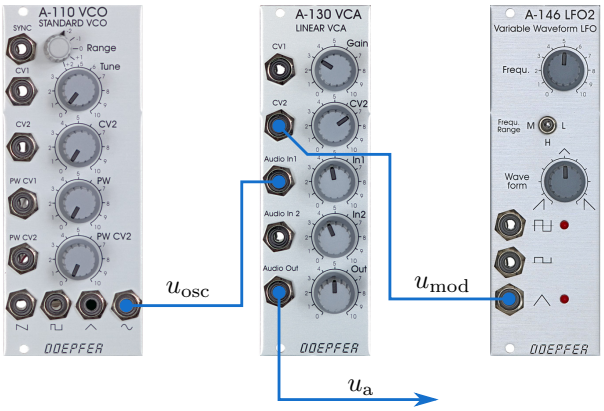

Abbildung 4: Verschaltung der Module des *Doepfer* A100 Modularsynthesizers zur Realisierung einer Amplitudenmodulation

Aufbauend auf diesem bekannten Effekt kann dann die Funktionsweise einzelner signalverarbeitender Elemente zum einen ausgehend von beobachteten Signalen experimentell ermittelt werden. Zum anderen kann ein System zur Generierung eines beobachtbaren Ausgangssignals durch die Teilnehmenden mit vorgegebenen Modulen, deren Funktionsweise bekannt oder vorher zu erarbeiten ist, eigenständig entworfen und aufgebaut werden. Beide Ansätzen profitieren davon, dass die Elemente des Blockschaltbildes (Abbildung 3) nahezu direkt mit den Modulen des Synthesizers (Abbildung 4) korrespondieren.

Der erstgenannte Ansatz dient primär dazu, den Teilnehmenden die Funktionsweise einzelner Module durch eigene Experimente näher zu bringen. Dazu wird das fertig verschaltete System zur Amplitudenmodulation zur Verfügung gestellt und das Ausgangssignal u_{a} (Abbildung 5) sowohl akustisch als auch mit Hilfe eines Oszillo-

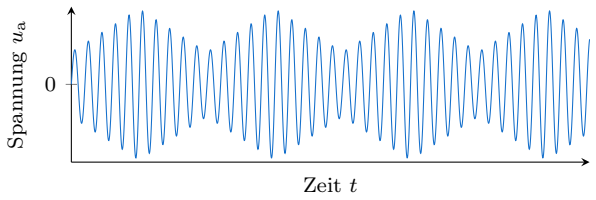

Abbildung 5: Spannungssignal mit modulierter Amplitude.

skops beobachtet und mit den Teilnehmenden diskutiert (Lernziel *Verstehen*). Grundkenntnisse im Umgang mit einem Oszilloskop werden den Teilnehmenden im Vorfeld vermittelt. Weiterhin werden das Ausgangssignal des Oszillators u_{osc} sowie das Modulationssignal u_{mod} beobachtet. Durch Variation der Signalparameter (Lernziel *Anwenden*) können die Teilnehmenden explorativ den Einfluss der beiden Eingangssignale des spannungsgesteuerten Verstärkers untersuchen und so die Funktionsweise dieses Moduls kennenlernen und beschreiben. Je nach Kenntnisstand der Teilnehmenden kann aus dem Beobachtungen auch eine mathematische Beschreibung abgeleitet werden.

Der zweitgenannte Ansatz eignet sich eher zum Einsatz im späteren Verlauf einer Lehrveranstaltung, wenn größere Teile der Inhalte, z. B. Elemente eines Blockschaltbildes, bekannt sind. Angewandt auf das vereinfachte Beispiel der Amplitudenmodulation wird den Teilnehmenden das Ausgangssignal u_{a} (Abbildung 5) in akustischer oder graphischer Form zur Verfügung gestellt und soll nachgebildet werden. Dazu charakterisieren die Teilnehmenden die Eigenschaften des Signals (Lernziel *Analysieren*), evaluieren die Eignung der ihnen bekannten Module für die Umsetzung (Lernziel *Bewerten*) und entwerfen schließlich eine vollständige Verschaltung des Synthesizers zur Erzeugung des Signals (Lernziel *Schaffen*). Um die abstrakte Betrachtung zu fördern, kann dabei beispielsweise auch gefordert werden, das System zunächst als Blockschaltbild zu entwickeln, bevor die praktische Realisierung mit Hilfe der Module erfolgt. In der Lehrveranstaltung *Klanganalyse und -synthese* wird dieser Ansatz zum Abschluss der Veranstaltung gewählt, bei der die Teilnehmenden die vorgegebenen Klänge mit Hilfe des modularen Synthesizers gezielt nachbilden sollen. Neben den genannten Analysemethoden (akustisch sowie Zeitbereichsdarstellung mit dem Oszilloskop) ist den Teilnehmenden zu diesem Zeitpunkt auch die Darstellung des Signals im Frequenzbereich bekannt.

Darüber hinaus sind auch Aufgabenstellungen möglich, die beide Ansätze kombinieren. Beispielsweise kann die Amplitudenmodulation zunächst experimentell beobachtet und bis zur Interpretation als Tremolo beschrieben werden, um anschließend eine Modifikation zum *Vibrato* (Frequenzmodulation) zu realisieren.

Da der Großteil der Aufgaben im Rahmen der praktischen Übung mit beiden Schwerpunkten bearbeitet werden kann, ergibt sich dadurch auch eine Möglichkeit zur Anpassung an die unterschiedlichen Vorkenntnisse und Kompetenzniveaus der Teilnehmenden (Binnendifferenzierung). Diese ist aufgrund der stark variierenden Vorkenntnisse der Teilnehmenden ohnehin erforderlich, kann aber durch geeignete Wahl der Aufgabenstellungen relativ einfach umgesetzt werden, ohne den Gegenstand der Aufgabe zu ändern.

Fazit

Das hier vorgestellte Konzept zur Vermittlung von Grundkenntnissen der Signalverarbeitung im musikalischen Kontext wurde in der Lehrveranstaltung *Klanganalyse und -synthese* bisher in vier Jahrgängen umgesetzt. Bei den Abschlussvorträgen ist ein sicherer Umgang mit den Begrifflichkeiten aus dem Kontext der Signalverarbeitung (Frequenzen, Spektrum etc.) zu beobachten. Weiterhin zeigt sich im anschließenden Kolloquium, dass die Funktionen und Anwendungsfälle unterschiedlicher signalverarbeitender Elemente von der Mehrzahl der Teilnehmenden verstanden wird, auch wenn auf die mathematische bzw. signaltheoretische Beschreibung verzichtet wird. Die Übertragung des Gelernten auf nicht-modulare Systeme, für die Blockschaltbilder vorliegen, wie etwa Audio-Mischpulte, kann von den Teilnehmenden in der Regel vollzogen werden.

In Zukunft soll untersucht werden, inwiefern die modularen Synthesizer-Systeme auch im Kontext technischer Studiengänge, insbesondere im Umfeld der Elektrotechnik, eingesetzt werden können. Vorteile gegenüber klassischer Laborausstattung sind hierbei primär die Portabilität der Systeme sowie die Vielzahl der enthaltenen, unterschiedlichen signalverarbeitenden Schaltungen. Aufgrund der vollständig analogen Realisierung der meisten Module können hier z. B. auch schaltungstechnische oder systemtheoretische Aspekte, sowohl in der Analyse von vorhandenen Modulen als auch im Entwurf von neuen Modulen zur Erweiterung der Funktionalität, betrachtet werden.

Literatur

[1] F. E. Weinert, Hrsg. *Leistungsmessungen in Schulen*. Beltz, 2001. ISBN: 978-34072-5256-2.

[2] L. Anderson, D. Krathwohl, P. Airasian, K. Cruikshank, R. Mayer, P. Pintrich, J. Raths und M. Wittrock. *A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives*. Jan. 2001. ISBN: 978-0-8013-1903-7.

[3] M. Russ. *Sound Synthesis and Sampling, Third Edition (Music Technology)*. Focal Press, Okt. 2008. ISBN: 978-0-240-52105-3.

[4] A. Oppenheim, A. Willsky und S. Nawab. *Signals and Systems*. Prentice-Hall signal processing series. Prentice Hall, 1997. ISBN: 0-13-809731-3.

[5] S. Sadie und J. Tyrrell. *The new Grove dictionary of music and musicians*. 20. Grove's Dictionaries, 2001. ISBN: 978-1-56159-239-5.