Computermusik Vorlesung WS 18, 20-24, SS 26

Johannes Waldmann

30. April 2026

1 Einleitung

Definition Computermusik

- *Computermusik* (richtig: Musikinformatik) soll bedeuten:
  Analyse und Synthese von Musik mithilfe der Informatik (Algorithmen, Software)
  (An.: hören, verstehen; Syn.: komponieren, aufführen)
- beruht auf Modellen aus der Musiktheorie, z.B. für
  - Erzeugung von Klängen in physikalischen Systemen,
  - das Tonmaterial:
    Tonhöhe, Konsonanz und Dissonanz, Akkorde, Skalen
  - die zeitliche Anordnung des Materials:
    Rhythmen, Melodien, Kadenzen, Kontrapunkt

Definition Musik

- die Kunst der zeitlichen Anordnung von Klängen.
  (Edgar Varese 1883–1965: *I call it organised sound*)
- „Kunst“ bedeutet: der Autor (Komponist, Interpret) will im Hörer Empfindungen hervorrufen
- das geht sowohl sehr direkt, Beispiele:
  - Tonreihe aufsteigend: Frohsinn, absteigend: Trübsal

  - Dissonanz ⇒ Spannung, Unruhe; Konsonanz ⇒ Auflösung, Ruhe

als auch indirekt, Beispiele:

  - Zitat (Parodie) von Elementen andere Musikwerke:
    Anerkennung (Daft Punk ⇒ Giorgio Moroder), Aneignung (F.S.K.), Ablehnung (Punk ⇒ Prog Rock).

Definition Pop(uläre) Musik

- die mechanische (Aufnahme und) Vervielfältigung von Audiosignalen (seit ca. 1920, Grammophon) trennt die *Aufführung* vom ihrem *Resultat* (dem Klang)

  (Elijah Wald, An Alternative History of American Popular Music, Oxford Univ. Press, 2009)

- dadurch entsteht Popmusik, das ist etwas Neuartiges

  - statt Komposition (Klassik) oder Improvisation (Jazz): *Produktion* des Klangs in einem Studio
  - rezipiert wird nicht nur der Klang, sondern unzählige *Nebenprodukte*, insb. Bilder (z.B. Schallplattenhüllen)
    die Bedeutung wird daraus vom *Fan* konstruiert

  (Diederich Diederichsen, Über Popmusik, Kiepenheuer, 2014)

Hörbeispiele

- Daft Punk (Guy-Manuel de Homem-Christo und Thomas Bangalter): *Giorgio by Moroder* (LP Random Access Memories, 2013)
- Donna Summer: *I Feel Love* (Single, 1977) Produzent: G. Moroder
- Kraftwerk (Ralf Hütter und Florian Schneider): *Autobahn* (LP 1974), aufgenommen im Studio Conny Plank
- Neu! (Michael Rother und Klaus Dinger): *Hallogallo* (1972), Produzent: Conny Plank
- Stereolab (Tim Gaine, Laetitia Sadier u.a.): *Jenny Ondioline* (1993)
- Grandmaster Flash (Joseph Sadler) *The Message*(1982)
- Big Black (Steve Albini u.a.): *Kerosene* (1986)

Organisation der LV insgesamt

- jede Woche eine Vorlesung, eine Übung
- Prüfungszulassung: regelmäßiges und erfolgreiches Bearbeiten von Übungsaufgaben (teilw. autotool)
- Prüfung: Projekt (erarbeiten, dokumentieren, präsentieren),
  - je zwei Personen
  - live coding
  - mit Methoden und Werkzeugen aus der Vorlesung
  - Dokumentation (*welche* kreative Idee wurde *wie* realisiert)
  - Abschluß-Konzert (je Projekt: 10 min Präsentation, 20 min Diskussion)

Organisation der Übungen

- Sie benutzen die Rechner im Pool (Z423/430) mit dort installierter Software. — *Kopfhörer mitbringen!*

  Es ist zu empfehlen, die gleiche Software auch auf Ihren privaten Rechnern zu installieren, damit Sie selbst experimentieren und Hausaufgaben erledigen können.
- wir verwenden ausschließlich *freie* Software (Definition: siehe `https://www.gnu.org/philosophy/free-software-intro.html`) (Debian-Pakete oder selbst kompiliert). Alles andere wäre unwissenschaftlich — weil man es eben nicht analysieren und ändern kann.

GNU/Linux-Audio

- ... kompliziert, weil
  - alles sehr modular funktionieren soll,
  - korrekt (bei Musik: mit geringer Latenz)
  - für einen großen Bereich von Hardware (neu bis alt, teuer bis billig)
- Hardware (Soundkarte, intern/extern), Treiber
- ALSA `https://alsa-project.org/` Advanced Linux Sound Architecture

- Jack `https://wiki.archlinux.org/title/JACK_Audio_Connection_Kit` (pipewire-jack)
- Pipewire, Pulseaudio (kämpfen mit Jack um Zugriff auf Hardware bzw. Alsa-Treiber)

Übungs/Haus-Aufgaben

Das sind Beispiele für Tätigkeiten, die in dieser LV (und in allen anderen) immer wieder vorkommen: nicht nur Software bedienen und Knöpfchen drehen, sondern auch:

Analysieren, Rechnen, Recherchieren, historisch einordnen, Programmieren (Synthetisieren).

1. (bereits in Ü) ausprobieren: Hydrogen (Drum-Sequencer) $\rightarrow$ Rakarrack (Effekt-Prozessor)

   Audio-Routing mit qjackctl oder qpwgraph (zuerst starten?!)

2. Finden Sie die von Hydrogen benutzte Audio-Datei für *TR808 Emulation Kit, Kick Long*

   anhören mit `vlc`,

   konvertieren Sie mit `sox` in `wav`-Format, (Hinweis: `man sox`),

   betrachten Sie Dateiinhalt (Amplituden-Verlauf) mit

   ```
   gnuplot -persist -e "plot 'kick.wav' binary format='%int16' using 0:1
   ```

   Bestimmen Sie mittels dieses Bildes die Grundfrequenz der Schwingung. Welche weitere Information ist dazu nötig, woher bekommen Sie diese?

3. betrachten Sie Dateiinhalt mit

   ```
   od -cx kick.wav | less
   ```

   Wo endet der Header (wo steht das erste Datenbyte)?

   Suchen Sie die offizielle WAV-Spezifikation, bestimmen Sie deren bibliografische Daten (Autor/Gremium, Ort, Jahr)

   Erzeugen Sie durch ein selbstgeschriebenes Programm (Sprache beliebig) eine wav-Datei, die einen (kurzen) Sinus-, Dreieck-, oder Rechteckton enthält, ansehen mit `gnuplot`, abspielen mit `vlc`,

verwenden Sie das als Sample in Hydrogen.

4. Wie sah diese Maschine (TR808) aus?

   Welche Band führt diese Maschine im Namen? (Hinweis: `https://www.vintagesynth.com/`, Matt Friedman 1996–)

   Kann Hydrogen alle dort angegebenen Eigenschaften des Originals simulieren?

   beschreiben Sie Struktur und (einige) Elemente von *Ritchie Hawtin: Minus Orange 1*, *Aphex Twin: Flaphead* o.ä., simulieren Sie mit Hydrogen und Rakarrack.

2 Geräusch und Klang

Begriffe

- Geräusch:
  - erzeugt durch Schwingungen eines physikalischen Systems (z.B. Musikinstrument)
  - übertragen durch Druckschwankungen in einem Medium (z.B. Luft), durch Ohr wahrnehmbar
- Klang: …durch *periodische* Schwingungen …
- virtuelle (elektronische) Instrumente
  - simulieren den physikalischen Vorgang
  - oder speichern nur dessen Verlauf
- Unterschied zu automatischem Spiel reeller Instrumente

Modell einer periodischen Schwingung

- Modell:
  - ein Körper mit Masse m und Ruhelage 0
    bewegt sich auf einer Geraden g,
    d.h., hat zum Zeitpunkt t die Koordinate $y(t)$

- die Rückstellkraft (bei Pendel: durch Schwerkraft, bei schwingender Saite: durch Elastizität) ist $F = -k \cdot y$.

  Notation: das ist eine Gl. zw. Funktionen (der Zeit)!

- mathematische Beschreibung
  - Geschwindigkeit $v = y'$, Beschleunigung $a = v' = y''$
  - nach Ansatz ist $a = F/m = -(k/m) \cdot y$
  - y ist Lsg. der Differentialgleichung $-(k/m)y = y''$

Numerische Näherungslösung der Dgl.

- gegeben k, m, bestimme Funktion y mit $-(k/m)y = y''$
- numerische Näherungslösung durch Simulation:

  ersetze Differentialgleichung durch Differenzengleichung

  wähle y_0 (initiale Auslenkung), $\Delta > 0$ (Zeitschritt),

  bestimme Folgen $y_0, y_1, \ldots, v_0 = 0, v_1, \ldots, a_0, a_1, \ldots$

  mit $a_i = -(k/m)y_i$, $v_{i+1} = v_i + \Delta a_i$, $y_{i+1} = y_i + \Delta v_i$
- genaueres in VL Numerik,

  z.B.: *Stabilität* besser, wenn $y_{i+1} = y_i + \Delta v_{i+1}$

Implementierung der numerischen Sim.

- Zustandstyp: $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ (Ort $\times$ Geschwindigkeit),

  Zustandsfolge mit `iterate :: (a -> a) -> a -> [a]`

```
let { d = 0.1 } in iterate
  (\ (y,v) ->
     let { a = negate y
         ; vn = v + d * a ; yn = y + d * vn
     } in (yn,vn))
  (1,0)
```

- anzeigen: `https://hackage.haskell.org/package/gnuplot` (Henning Thielemann), WAV ausgeben: `https://hackage.haskell.org/package/WAVE` (Bart Massey)

Exakte Lösung der Dgl.

- gegeben k, m, bestimme Funktion y mit $-(k/m)y = y''$
- genaueres siehe VL Analysis, z.B. Ansatz von y als
  - Potenzreihe $y = \sum_{k\in\mathbb{N}} c_k x^k$, Koeffizientenvergleich von linker und rechter Seite der Dgl.
  - Linearkombination von anderen Basisfunktionen (anstatt Potenzen)
- wenn man Glück hat, oder die numerische Lösung gesehen hat:

  Ansatz $y(t) = \cos(f \cdot t)$
- wir erhalten die *reine harmonische Schwingung*

Schwingung einer Saite

- …aus vielen Massepunkten, u : Ort $\times$ Zeit $\to$ Auslenkung
- Elastizität des Materials wirkt in jedem Punkt

  als Kraft in Richtung beider Nachbarn
- Differenzengl., diskret: $y''_k = (y_{k-1} - y_k) + (y_{k+1} - y_k)$

  math. Modell, kontinuierlich: $d^2u/(dt)^2 = c \cdot d^2u/(dx)^2$,

  Randbedingungen $u(0,t) = u(1,t) = 0$, $u(x,0) = 0$
- Ansatz $u(x,t) = f(x) \cdot g(t)$, es gibt mehrere Lösungen
- Dgl. ist linear: jede Summe von Lösungen ist Lösung
- Hermann Helmholtz: Vorl. über die mathematischen Prinzpien der Akustik, Leipzig 1898 `https://archive.org/details/vorlesungenber03helmuoft`

Anpassung und Anwendung

- diese Modell ist Energie-erhaltend

  tatsächlich wird aber Energie abgegeben (1.über das Medium an den Sensor, 2. durch Reibung im schwingenden Körper als Wärme an die Umgebung)

- Modellierung der *Dämpfung* z.B. durch Reibungskraft proportional zu Geschwindigkeit $F_R = r \cdot v = r \cdot y'$

  Aufstellen und Simulation der Dgl. in Übung.

- mit diesem Modell können wir beschreiben:
  - Klang einer Saite (Gitarre, Klavier, Cembalo)
    (nicht Geige)
  - Klang eines Trommelfells (Fußtrommel, nicht Snare)

Beispiel: Mbira (Daumenklavier)

- Zungen aus Holz oder Metall auf Resonanzkörper

- Hörbeispiele: Stella Chiweshi: *Chigamba*,

  Konono No. 1: *Konono Wa Wa*

Beispiel: schwingende Metallstäbe

- Spielzeug-„klavier“  

- Fender-Rhodes-Piano (1965–1984) `https://www.fenderrhodes.com/org/manual/toc.html`

  Hörbeispiele: Miles Davis: *Spanish Key* 1969,

  Steely Dan: *Babylon Sisters* 1980

- Vibraphon (Metallstäbe, Resonanzröhren mit beweglicher Abdeckung)

  Hörbeispiele: Tortoise: *Ry Cooder* 1994,

  Claudia Quintet: *September 20 Soterious Lakshmi* 2013

Weitere period. Schwingungen f. Instrumente

- Wirkung der Dämpfung kann durch regelmäßige Energiezufuhr ausgeschaltet werden ($\Rightarrow$ angeregte Schwingung) z.B. das Anstoßen einer Schaukel

- Geige:

  Bewegung des Bogens führt der Saite Energie zu

  regelmäßige Unterbrechung durch Kontaktverlust Bogen–Saite bei zu starker Auslenkung

- Blasinstrumente:

  Anblasen führt der schwingenden Luftmenge Energie zu

  regelmäßige Unterbrechung durch Blatt (Oboe, Saxofon), Lippen (Trompete) oder Luftsäule selbst (Orgel, Flöte)

Beispiele

- Querflöte: Bobbi Humphrey *Harlem River Drive* 1973

- Saxophon: John Coltrane, *A Love Supreme*, 1965

- Posaune: Conrad und Johannes Bauer *Dialog 1* 1995

- Posaune, Mundharmonika (?)

  Lee Perry *Heavy Rainford* 2019 (Prod. Adrian Sherwood)

- Melodica (angeblasene Metallzungen, vgl. Triola)

  Augustus Pablo *King Tubbys Meets The Rockers Uptown* 1974,

  vgl. David Katz: *A beginner's guide to Augustus Pablo* Fact Magazine, 2015 `https://web.archive.org/web/20230325085740/https://www.rockersinternational` `com/`

Geräusch-Instrumente

- nichtperiodisches Verhalten kann erzeugt werden durch
  - Überlagerung (fast gleichzeitiger Ablauf) sehr vieler unterschiedlicher periodischer Schwingungen

    für zahlreiche (Rhythmus)-Instrumente benutzt, z.B.
    * Maracas (Rumba-Kugel), Kashaka: enthalten viele kleine harte Klangkörper, die aneinanderstoßen
    * Snare (kleine Trommel): mehrere Federn, die gegen Fell der Unterseite schlagen (schnarren)
- nichtperiodische Schwingung eines phys. Systems

  z.B. Doppel-Pendel, Mehr-Körper-System

  keine direkte Anwendung als Instrument bekannt,

  Simulation evtl. für virtuelle Instrumente nützlich

Chaotische Schwingungen

- wenn man das wirklich nur simulieren möchte (nicht physikalisch realisieren)
- dann kann man auch mathematische Modelle *ohne* physikalisches Äquivalent betrachten
- Bsp: Iteration von $f : [0,1] \to [0,1] : x \mapsto 4 \cdot (x - 1/2)^2$

  zeigt aperiodisches (chaotisches) Verhalten
- Bsp: bitweise Manipulation (der Zeit)

  ```
  t * ((t>>12|t>>8)&63&t>>4)
  ```

- ergibt (im Allgemeinen) nur ein Rauschen,

  Grundlage für Simulation andere Klänge (mit Filtern)

- aber im Speziellen: interessante Klänge möglich `https://wurstcaptures.untergrund.net/music/`

Hausaufgaben

1. Wie wird Musikgeschichte zitiert (im Klang und) im Text von: DJ Hell: *Electronic Germany* (2009)

   Wer singt auf *U Can Dance* des gleichen Albums? War früher (viel früher) in welcher Band? Wer hat dort anfangs elektronische Instrumente gespielt? Danach welchen Musikstil erfunden?

   weitere Beispiele für Musikzitate suchen, genau beschreiben, was zitiert wird, wie groß der Abstand ist (zeitlich, inhaltlich) und diskutieren, warum.

2. harmonischen bzw. gekoppelten Oszillator modifizieren: Schwingungen simulieren, Resultate ansehen,

   - periodische
   - gedämpfte (durch Zusatz-Term in harmonischem)
   - chaotische (durch Nichtlinearität in der Kopplung)

   anhören

   - einzeln
   - als Drumkit in Hydrogen

3. die Simulation der Saite verändern:

   das Beispiel aus Helmholtz § 39 Fig. 7 realisieren (Zupfen der Saite nicht in der Mitte), Resultat mit Fig. 11 vergleichen

   § 42 realisieren (belastete Saite: ein Punkt hat andere Masse)

4. kleine Bit-Musikstücke (Beispiel: `t << (t>>10)`) vollständig analysieren, dann modifizieren.

5. Die Differentialgleichung der harmonischen Schwingungen $y'' = -y$ durch Potenzreihen-Ansatz und Koeffizientenvergleich lösen:

$$\begin{array}{rcl} y & = & c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + \dots \\ y' & = & 1c_1 + 2c_2x + 3c_3x^2 + 4c_4x^3 + \dots \\ y'' & = & 1 \cdot 2 \cdot c_2 + 2 \cdot 3 \cdot c_3x + 3 \cdot 4 \cdot c_4x^2 + \dots \\ -y & = & -c_0 \qquad - c_1x \qquad - c_2x^2 - \dots \end{array}$$

$$c_2 = -\frac{c_0}{1 \cdot 2}, c_3 = -\frac{c_1}{2 \cdot 3}, c_4 = -\frac{c_2}{3 \cdot 4} = \frac{c_0}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4}, \dots$$

- c_0 und c_1 frei wählbar (Bsp: $c_0 = 0, c_1 = 1$)
  weitere Koeffz. dadurch bestimmt (ausrechnen!)
- alles unter den (hier unbewiesen) Annahmen, daß die Dgl. eine Lösung hat und die Potenzreihe konvergiert

3 Klang-Analyse (Grundlagen)

Definition, Motivation

- jede periodische Schwingung kann als gewichtete Summe harmonischer Schwingungen dargestellt werden

  (Jean Fourier, 180?, `http://www-history.mcs.st-and.ac.uk/Biographies/Fourier.html`)

- die Folge dieser Gewichte der Obertöne ist das *Spektrum*, das charaktetisiert die Klang*farbe*

- Änderung des *Wellenform*

  linear (z.B. Filter), nichtlinear (z.B. Verzerrer)

  kann beschrieben werden als Änderung des *Spektrums*,

  diese ist ggf. leichter zu berechnen

Periodische Funktionen

- für $\Omega = [-\pi, \pi]$ betrachte $\mathsf{P} = \{f \mid f : \Omega \to \mathbb{R}\}$.
- P ist *Vektorraum* (Addition, Skalierung) und Hilbert-Raum

- *Skalarprodukt* $\langle f, g\rangle := \int_\Omega f(x)\cdot g(x)\,dx$, Norm $|f| = \sqrt{\langle f, f\rangle}$
- $b_1 = 1, b_2 = \sin(x), b_3 = \cos(x), b_4 = \sin(2x), b_5 = \cos(2x), \ldots$
  bilden eine *orthogonale Basis* für P
  nach geeigneter Skalierung sogar ortho*normal*
- jedes $f \in \mathsf{P}$ eindeutig darstellbar als Linearkombination von Basisvektoren $f = \sum_i \langle f, b_i\rangle/|b_i|^2 \cdot b_i$
- weitere Voraussetzungen sind nötig (damit Integrale und Summen existieren), siehe VL Analysis
- numerisch: approximiere Integral durch Summe

Beispiel: Rechteck-Schwingung

- $\Omega \to \mathbb{R} : t \mapsto \textsf{if } t < 0 \textsf{ then } -1 \textsf{ else if } t = 0 \textsf{ then } 0 \textsf{ else } 1$
  das ist die Signum- (Vorzeichen)-Funktion sign
- $\operatorname{sign}(x) = (4/\pi) \sum_{k \text{ ungerade}} \frac{\sin(kx)}{k}$
  (nur ungerade Oberwellen)

Nebenrechnungen:

- $\cos(kx)$ ist gerade Funktion, $\operatorname{sign}(x)$ ungerade,
  deswegen $\langle \operatorname{sign}(x), \cos(kx)\rangle = 0$
- $\langle \operatorname{sign}(x), \sin(kx)\rangle = 2 \cdot \int_{[0,\pi]} \sin(kx)dx = [-1/k \cdot \cos(kx)]_0^\pi =$
  $\textsf{if } 2|k \textsf{ then } 0 \textsf{ else } 4/k$

Beispiel: Sägezahn-Schwingung

- $f : \Omega \to \mathbb{R} : x \mapsto x$
- numerische Bestimmung der Fourier-Koeffizienten

```
let k = 4 ; d = 0.01
in sum $ map (\x -> d * x * sin (k*x))
         [ negate pi, negate pi + d .. pi ]
==> -1.570723326585521
```

- Vermutung $f = -\frac{2}{\pi}\sum_{k\geq 1}\frac{(-1)^k}{k}\sin(kx)$ (alle Oberwellen)

Spektren von Audiosignalen

- Spektrum eines Signals f kann so bestimmt werden:
- teile Signal in Zeit-Intervalle (z.B. $\Delta = 1/10$ s),

  $f_i : [-\Delta, \Delta] \to \mathbb{R} : t \mapsto f(i\Delta + t)$
- wähle Frequenz-Werte $k_1, k_2, \ldots$
- bestimme Koeffizienten der Freq k_j zur Zeit $i\Delta$ als $\langle f_i, k_j\rangle$
- Anzeige z.B. in `vlc`: Audio $\to$ Visualisations $\to$ Spectrum
- es gibt schnellere Algorithmen

  (diskrete Fourier-Transformation)
- das Ohr bestimmt die Fourier-Koeffizienten durch Resonanz in der Schnecke (Cochlea), Frequenz-Auflösung ist ca. 3 Hz bei 1 kHz

Programme zur Spektral-Analyse

- Chris Cannam, Christian Landone, and Mark Sandler: *Sonic Visualiser: An Open Source Application for Viewing, Analysing, and Annotating Music Audio Files,* in Proceedings of the ACM Multimedia 2010 International Conference.

  `https://sonicvisualiser.org/`
- Anwendungsbeispiel:

  Aphex Twin, $\Delta M_i^{-1} = -\alpha\Sigma D_i[\eta]Fj_i[\eta-1] + F\mathrm{ext}_i[\eta^{-1}]$,

  Album: Windowlicker, 1999.

  hergestellt mit Metasynth (Eric Wenger, Edward Spiegel, 1999) `http://www.uisoftware.com/MetaSynth/`,

Zeit-Dehnung

- wenn man ein Audio-Signal $f :\to \mathbb{R}$ zeitlich dehnt
  (Bsp: $g(x) = f(s \cdot x)$ mit $s = 1/2$),
  dann ändert man damit die Frequenzen.
- Zeit-Dehnung *ohne* Frequenz-Änderung:
  $\text{Signal}_1 \overset{\text{Spektral-Analyse}}{\longrightarrow} \text{Spektrogramm}_1 \overset{\text{Zeit-Dehnung}}{\longrightarrow} \text{Spektrogramm}_2 \overset{\text{Spektral-Synthese}}{\longrightarrow} \text{Signal}_2$
- Audio-Kompressoren MP3, AAC haben bereits solche Signalkette, mit *Kompression* (Bitbreiten-Reduktion) statt *Zeit-Dehnung*, diese kann leicht hinzugefügt werden
- Bsp: 7038634357 (Neo Gibson): *Barry White Stretched Out And Reworked* 2022
  `https://www.nts.live/shows/guests/episodes/7038634357-19th-october-2022`

Spektren von Klängen/Instrumenten

- harmonische Schwingung: keine Oberwellen,
  kommt in der Natur selten vor und ist für Musikinstrumente auch gar nicht erwünscht:
  Oberwellen ergeben interessantere Klänge,
  die auch variiert werden können
- Bsp: Gitarre: Anschlagen nahe dem Steg: viele Oberwellen, zur Saitenmitte: weniger.
- Bsp. Schlagzeug (Trommel, Tom): Anschlag Mitte/Rand
- Bsp: Orgel: offene und gedackte Pfeifen, siehe dazu Kalähne 1913 (Hausaufgabe)

Aufgaben

1. In *Autobahn* (Kraftwerk) fährt bei ca. 1:49 ein Auto am Hörer vorbei. Wie schnell?
   (Hinweis: Frequenzen mit sonic-visualier bestimmen, Doppler-Effekt verwenden)
2. wie unterscheiden sich Spektren der Luftschwingungen in offenen von einseitig geschlossenen Röhren? nach: Alfred Kalähne: *Grundzuge der mathematisch-physikalischen Akustik*, Leipzig 1913, `https://archive.org/details/grundzgedermath01kalgoog`

3. Fourier-Koeffizienten einer Rechteck-, Sägezahn-, Dreiecks-Schwingung bestimmen:

    - Skalarprodukte symbolisch oder numerisch bestimmen
    - Wellenform in WAVE-Datei schreiben und Spektrum analysieren (`sonic-visualiser`)

4. Bestimmen Sie für das Signal *Rechteck* $+$ *2 mal Sägezahn*

    - die Wellenform
    - die Fourier-Koeffzienten (unter Verwendung der im Skript angegebenen Koeffz. der einzelnen Signale)

5. Software zu diskreter (und schneller) Fourier-Transformation: `https://git.imn.htwk-leipzig.de/waldmann/computer-mu/-/tree/master/dft?ref_type=heads`

   Invertierbarkeit der Transformation ausprobieren.

   Vergleichen Sie Klangeindruck bei Rasterung (geringe Bitbreite) für originale Wellenform mit gleicher Rasterung für Fourier-Koeffizienten.

   Realisieren Sie ähnliches Experiment (schlechte MP3-Kodierung) durch Wahl einer (geringen) Bitbreite für `ffmpeg`.

6. bei verschiedenen Musikalienhändlern kann man Audio-Dateien in verschiedenen Formaten kaufen, u.a. flac (verlustfreie Kompression) und ogg (verlustbehaftet). Ist flac immer besser als ogg? Das kommt darauf an, was der Künstler abgeliefert hat. Wenn man Pech hat, war das ein schlechtes mp3 und der Händler hat alles weitere daraus mit `ffmpeg` ausgerechnet. An Beispielen überprüfen— und hoffentlich widerlegen! Kurz-Ausschnitte von Test-Dateien im Repo. Schon das Kurz-Schneiden ist nicht trivial, es soll wirklich nur schneiden und nicht neu kodieren.

7. (evtl.) hörbare Audio-Wasserzeichen? Matt Montag, `https://www.mattmontag.com/music/universals-audible-watermark`, 2013

4 Elektrische Oszillatoren und Filter

Plan

- bisher: mechanische Schwingungen
  - Bsp: Massepunkt/Feder,
  - Anwendung: akustische Musikinstrumente
    Bsp: Saiten, Membrane, Luftsäulen
- jetzt: elektrische Schwingungen (und Filter)
  - Bsp: Oszillator (LC), Tiefpaß (RC)
  - Anwendungen: diese VL: Filter, nachfolgende:
    - Analog-Synthesizer (Robert Moog 64, Don Buchla 63)
    - Simulation von A.-S. (csound, Barry Vercoe, 1985)
  - Ziele: 1. möglichst exakte Nachbildung (des Akustischen, des Analogen), 2. völlig neuartige Klänge

Elektrische Schaltungen

- Schaltung: gerichteter Graph,
  - Kanten sind Bauelemente
    - ohne Zustand: Widerstände, Verstärker (Transistor)
    - mit Zustand: Kondensator: elektrisches Feld, Spule: magnetisches Feld

- durch jede Kante fließt Strom,
  jeder Knoten hat Potential
- besondere Knoten: Masse (0), Eingabe, Ausgabe

- Zustandsänderung nach Gesetzen der Physik (Elektrik)
- vergleiche: Massepunkte, Trägheits-, Federkräfte
- Schaltung realisiert Operator F von Eingabesignal $g : \Omega \to \mathbb{R}$ zu Ausgabesignal $F(g) : \Omega \to \mathbb{R}$

Schaltung – Beispiel Tiefpaß

- Schaltung: (0,3) node [left]U_E to [short,i=I,*-] (1,3) to [R,l=R, -*] (4,3) to [C,l=C] (4,1) node [ground] (3,3) to [short,-*] (5,3) node [right] U_A ;
- Widerstand: $U_E - U_A = R \cdot I$
  (siehe auch Kraftwerk: *Ohm Sweet Ohm*, 1975)
- Kondensator: $I = C \cdot \dfrac{dU_A}{dt} = C \cdot U_A'$
- Bsp: $U_E(t) = 1$V, $U_A(0) = 0$ (Kondensator leer)
  $C \cdot U_A' = I = (1 - U_A)/R$, Simulation, exakte Lösung
- Bsp: $U_E(t) = \sin(2\pi f t)$, $U_A(t) =?$
- wirkt als Tiefpaß-Filter: Schwächung hoher Frequenzen

Bemerkung zur Methodik

- (analoge) Schaltungstechnik, seit ≥ 100 Jahren alles wohlbekannt,
- Umformung zur praktischen Berechnung: 1. Analyse harmonischer Schwingungen, 2. Linearkombination.
- Harmonische Schwingungen fester Frequenz
  sind bestimmt durch Betrag r und Phase ϕ,
  dargestellt als *eine* komplexe Zahl $z = r \exp(i\phi) \in \mathbb{C}$
- verwende Kirchhoffsche Regeln f. komplexe Größen
  Bsp: Kondensator mit Kapazität C hat bei Kreisfrequenz ω den komplexen Widerstand (Impedanz) $1/(i\omega C)$,
  Spule mit Induktivität L hat Impedanz $i\omega L$.
- funktioniert, solange alle Bauelemente linear sind (Widerstand hängt nur von Frequenz ab)

Weitere Filter: Hochpaß, Bandpaß

- (0,3) node [left]U_E to [short,i=I,*-] (1,3) to [R,l=R, -*] (4,3) to [L,l=L] (4,1) node [ground] (3,3) to [short,-*] (5,3) node [right] U_A ; , Spule: $U_A = L \cdot \frac{dI}{dt} = L \cdot I'$

  wirkt als *Hochpaß* (tiefe Frequenzen werden geschwächt)

- (0,3) node [left]U_E to [short,i=I,*-] (1,3) to [R,l=R, -*] (4,3) to [L,l=L] (4,1) node [ground] (4,3) to [short,-*] (6,3) to [C,l=C] (6,1) node [ground] (6,3) to [short,-*] (8,3) node [right] U_A ; , wirkt als *Bandpaß*

  (hohe und tiefe f geschwächt, in der Nähe der Resonanzfrequenz weniger)

- Bandpaß mit Rückführung und Verstärkung:

  wirkt als *Oszillator* (schwingt auf Resonanzfrequenz)

Weitere Filter: Allpaß

- lattice filter (d: Gitter- oder Leiter-Filter)

  (0,4) node [left] to [short,*-] (1,4) to [C,l=C] (5,4) to [short,-*] (6,4); (1,4) to [L,l=L] (3,2) to [] (5,0); (0,0) node [left] to [short,*-] (1,0) to [C,l=C] (5,0) to [short,-*] (6,0); (1,0) to [] (3,2) to [L,l=L] (5,4);

- vgl. Julius O. Smith, Physical Audio Signal Processing, W3K Publishing, `https://ccrma.stanford.edu/~jos/pasp/Allpass_Filters.html`

- angewendet im *Phaser*

Klangveränderung durch Filter

- ein Filter ist ein Operator von $(\Omega \to \mathbb{R})$ nach $(\Omega \to \mathbb{R})$

  (eine Funktion der Zeit auf eine Funktion der Zeit,

  d.h., Filter ist Funktion zweiter Ordnung)

- Bsp: der Operator $\mathsf{scale}_s : g \mapsto (x \mapsto s \cdot g(x))$

- Bsp: der Operator $\mathsf{shift}_t : g \mapsto (x \mapsto g(x - t))$

  akustisch ist das ein *Echo*. Mehrere Echos ergeben *Hall*.

  Realisierungen:

- – Tonband-Schleife
  – Federhallstrecke

  typisch für: Gitarrenklang in Surf-Musik (Bsp: Dick Dale), Gesamtklang im (Dub) Reggae (Bsp: Lee Perry)

Klangveränderung durch Filter

- Operator F ist *linear* (L), wenn $\forall a, b \in \mathbb{R}, g, h \in (\Omega \to \mathbb{R}) : F(a \cdot g + b \cdot h) = a \cdot F(g) + b \cdot F(h)$
- F ist *zeit-invariant* (TI), wenn $\forall t \in \mathbb{R} : \mathsf{shift}_t \circ F = F \circ \mathsf{shift}_t$
- Satz: jeder LTI-Filter kann als (Limes einer unendl.) Summe von shift und scale dargestellt werden
- Satz: jeder lineare Filter operiert auch linear auf den Fourier-Koeffizienten.
- Folgerung: Obertöne werden geschwächt oder verstärkt, aber niemals „aus dem Nichts“ erzeugt.

  Das begründet den Wunsch nach nichtlinearen Filtern (Verzerrern).

Filter in der Musik-Praxis (Fender Amp)

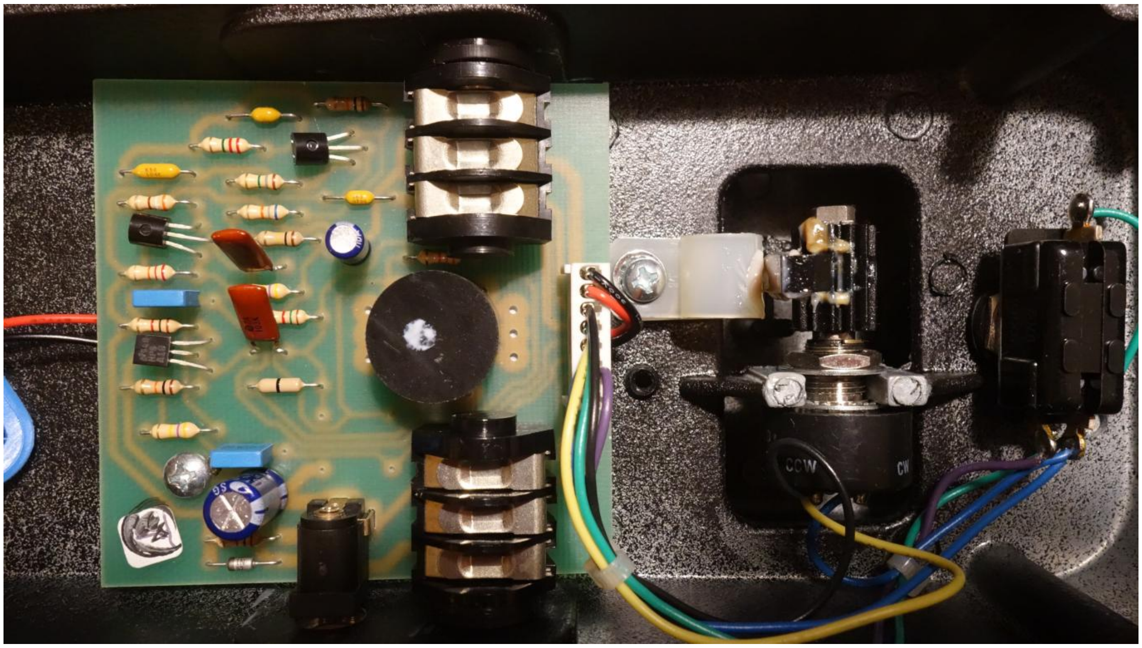
- Lautstärke (Volume): scale_s
- period. Lautstärkeänderung (Tremolo) (Speed, Intensity)

  ist linear, aber nicht zeit-invariant
- Federhall (Reverb): $\sum_{d \in D} \mathsf{shift}_d$, linear, zeit-invariant

- Tiefpaß (Bass), Hochpaß (Treble)

Filter in der Musik-Praxis (Wah)

- Dunlop Crybaby GCB95



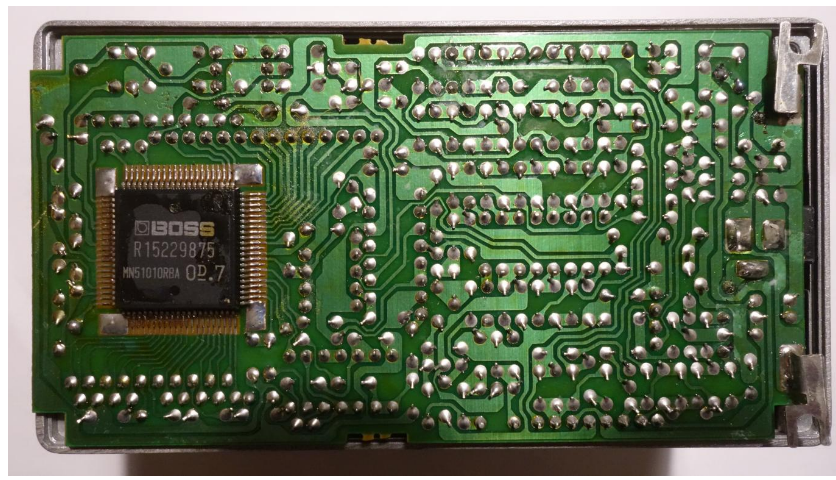
`https://www.electrosmash.com/crybaby-gcb-95`

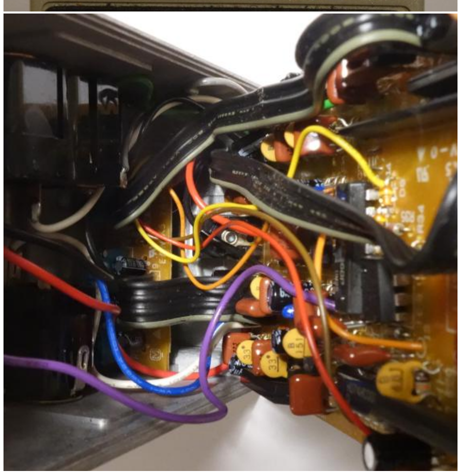
- Bandpaß mit einstellbarer Resonanz-Frequenz

- Fußwippe (Pedal) $\to$ Zahnstange $\to$ Dreh-Potentiometer
- vgl. später: spannungsgesteuerte Filter (VCF)

Filter in der Musik-Praxis (Echo)

- Boss Digital Delay (DD 3, ab 1986)



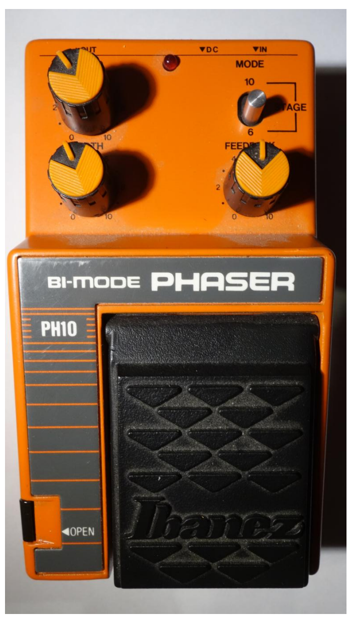


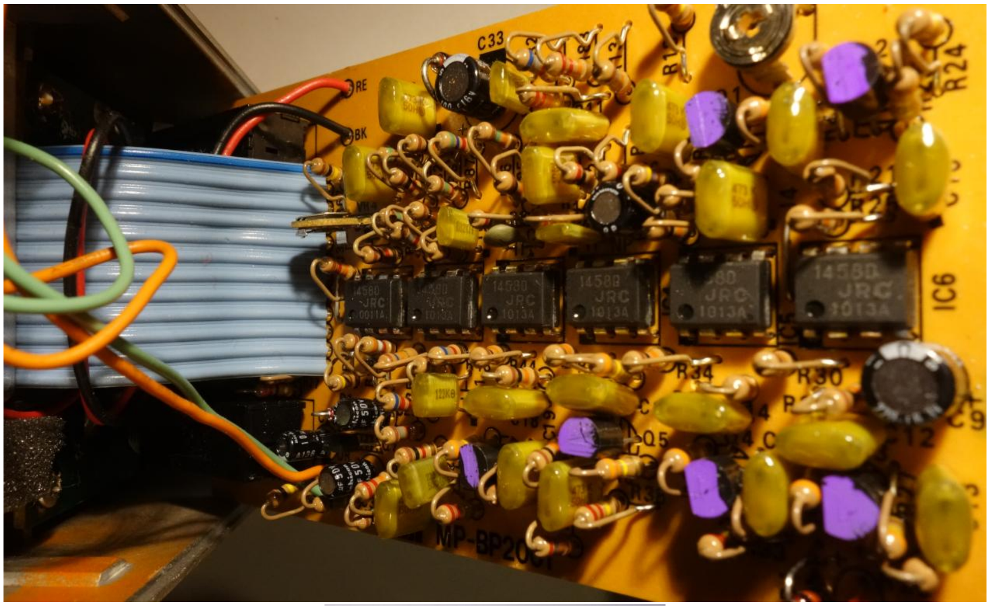
- erstes Delay-Fußpedal DD 2, 1983 `https://www.hobby-hour.com/electronics/s/dd2-delay.php`
- Echo-Zeit max. 800 ms. Samplebreite 12 bit. Ü: Taktbreite 12.5 μs ... 50 μs. Wieviel Bit werden gespeichert?
- vgl. später: Chorus (= spannungsgest. Delay), Flanger

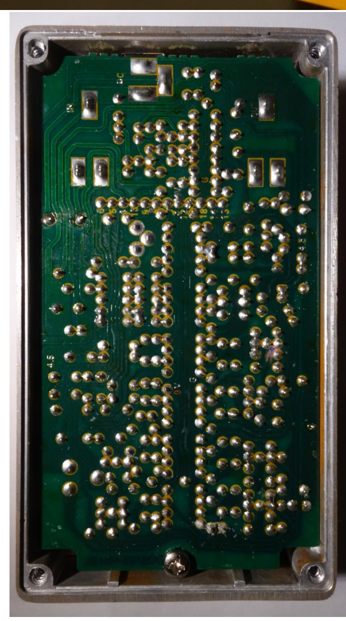
Chorus, Flanger

- Flanger: $f + \mathsf{shift}_d(f)$,
  ursprünglich realisiert durch zwei Tonbandmaschinen
  für f, für $\mathsf{shift}_d(f)$, dabei d durch Bremsen des Bandes
- Chorus: $f \mapsto f + \sum_k \mathsf{shift}_{d_k}(f)$ mit $d_k = \epsilon \cdot \sin(\omega_k t)$, kleine ω_k
  (mehrere leicht unterschiedliche Stimmen in einem Chor)
- bei elektronischer Realisierung:
  auch mit Rückführung des Ausgangssignales
- Ibanez Swell Flanger `https://mirosol.kapsi.fi/2015/05/ibanez-sf10-swell-flanger/`
  mit analoger Speicherkette MN3207 `https://zeptobars.com/en/read/MN3207-1024-stage-`

Phaser

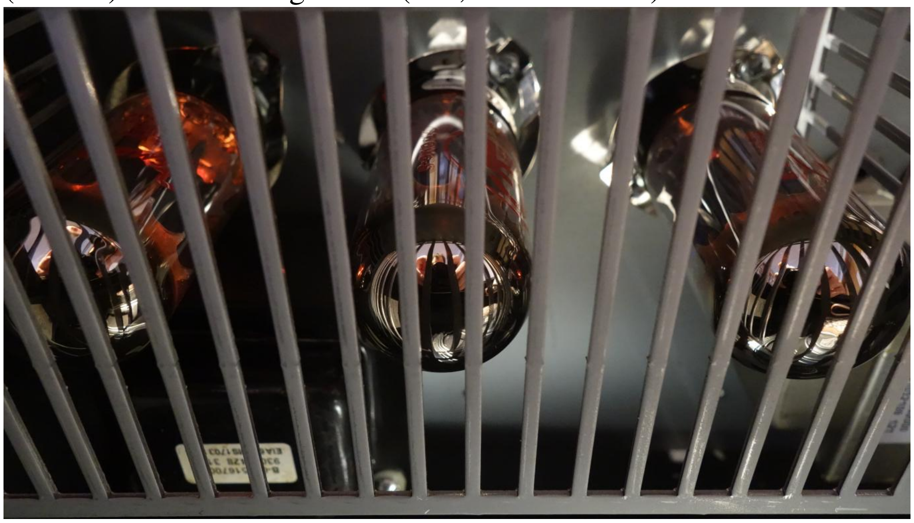
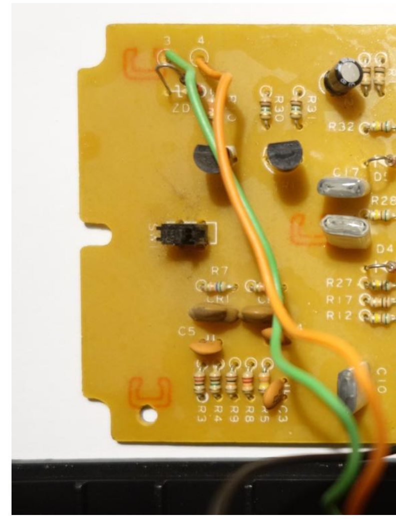






- Ibanez PH 10 (ca. 1990), `https://mirosol.kapsi.fi/2014/02/ibanez-ph10-bi-mode-pha`
- Phaser: $f \mapsto f + \mathsf{Allpass}^k(f)$, $\mathsf{Allpass}(f)$: erhält Amplituden, verschiebt Phasen (frequenz-abhängig)
- R. G. Keen: *The technology of Phase Shifters and Flangers* 1999, `http://www.geofex.com/Article_Folders/phasers/phase.html`

Nichtlineare Filter (Verzerrer)

- (Röhren)Verstärker: eigentlich (laut, aber trotzdem) linear
   
- Betrieb außerhalb des linearen Bereiches: technisch möglich und musikalisch interessant (Jimi Hendrix, 1966)
- damit auch Bedarf nach extremen und einstellbaren nichtlinearen Bauteilen (Vorverstärker, Verzerrer)
- sowie Simulation durch Transistoren (preiswert, robust)
  (aber: ist anderes physikalisches Prinzip, klingt anders)
  Abb. rechts: Ibanez TS5 Tubescreamer, ca. 1992

Übungsaufgaben

- Schaltkreis-Simulation `https://git.imn.htwk-leipzig.de/waldmann/circuit`,

  Bauen Sie einen Allpaß (lattice filter), auch Kette von solchen (= Phaser), betrachten Sie Impulsantwort, verwenden Sie mit `effect` auf Audio-Datei (siehe unten)

- mit Hydrogen und Rakarrack (oder Guitarix) Aspekte des Schlagzeugs (Rhythmus, Sound) nachbauen:

  Vivien Goldman (und New Age Steppers): *Private Armies Dub* (1981)

  (Produzent: Adrian Sherwood, vgl. *Bugaloo* (2003, video)

- Phaser: für eine Sägezahnschwingung f: bestimmen Sie Auslenkung und Spektrum des Signals $f + \mathsf{scale}_{-1}(\mathsf{shift}_d(f))$ abhängig von Parameter $d \in [0, \pi]$.

- Echo, Hall, Flanger selbst implementieren:

  WAVE-Datei lesen, bearbeiten (verzögern und ggf. rückkoppeln), schreiben

  anwenden auf: Sinus, Rechteck, Rauschen

  siehe `https://gitlab.dit.htwk-leipzig.de/johannes.waldmann/effect`

- voriges mit dieser Implementierung vergleichen (Steve Harris) `https://github.com/swh/ladspa/blob/master/phasers_1217.xml` (oder andere Open-Source)

- Echo, Hall, Flanger mit `sox`:

  - weißes Rauschen erzeugen

    ```
    sox -n noise.wav synth 2 noise
    ```

  - zu zeitversetzem Signal (um 300 Samples) addieren

    ```
    sox -M noise.wav noise.wav out.wav delay 300s 0s remix 1,2
    ```

  - mit sonic-visualizer Spektrum betrachten und erklären

5 Plan (vorläufig)

- KW 15 Einleitung
- KW 16 Geräusch und Klang
- KW 17 (Spektral)Analyse von Klängen
- KW 18 (in Ü) Elektrische Oszillatoren und Filter
- KW 19 Spannungs-gesteuerte Osz. und Filter
- KW 21 Programme für Klänge (csound-expression)
- KW 22 Töne (Skalen), Harmonien
- KW 23 (Algebraische) Komposition (haskore, Euterpea)
- KW 24 Performing with Patterns of Time (tidalcyles)

  bis KW 25: Anmeldung der Abschlußprojekte
- KW 25 Kombination von Mustern d. Fkt. höh. Ordnung
- KW 26 Rhythmus, Breaks, Samples
- KW 27 Algorithmische, stochastische Komposition
- KW 28 Zusammenfassung, Ausblick