

# Computermusik Vorlesung WS 18, 20-24, SS 26

Johannes Waldmann

17. April 2026

– Typeset by FoilTeX –

## 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, Kadenz, Kontrapunkt

– Typeset by FoilTeX –

### 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, Ruheals auch indirekt, Beispiele:
  - Zitat (Parodie) von Elementen anderer Musikwerke:  
Anerkennung (Daft Punk ⇒ Giorgio Moroder),  
Aneignung (F.S.K.), Ablehnung (Punk ⇒ Prog Rock).

– Typeset by FoilTeX –

### 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 Neues
  - 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)

– Typeset by FoilTeX –

### 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)

– Typeset by FoilTeX –

### 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)

– Typeset by FoilTeX –

### 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.

– Typeset by FoilTeX –

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

– Typeset by FoilTeX –

## 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) → 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
```

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.

## 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 Differenzgleichung
  - wähle  $y_0$  (initiale Auslenkung),  $\Delta > 0$  (Zeitschritt), bestimme Folgen  $y_0, y_1, \dots, v_0 = 0, v_1, \dots, a_0, a_1, \dots$  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  $\rightarrow$  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 Prinzipien 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  $f : [0, 1] \rightarrow [0, 1] : x \mapsto 4 \cdot (x - 1/2)^2$  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:  $t \ll (t \gg 10)$ ) vollständig analysieren, dann modifizieren.

## 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 (tidalcycles) 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