

Instrumentenkunde und Akustik

Digitale Musikinstrumente

Prof. Dr. Christoph Seibert

IMWI Institut für Musikinformatik
und Musikwissenschaft



Was ist ein Digitales Musikinstrument?

„Digital musical instrument (DMI) is a class of artistic, tangible, interactive objects intended to articulate sound by means of gestural control. Unlike their acoustic counterparts, which follow physical constraints, DMIs' control input is decoupled from the sound output. As an intermediate layer connecting these two modules, there is the mapping strategy.“

Vgl. Miranda und Wanderley (2006)

Wichtige Aspekte:

- greifbare, interaktive Objekte
- Klanggestaltung durch Gesten
- *Input* (Kontrolldaten) und *Output* (Klang) sind voneinander entkoppelt und müssen erst durch ein *Mapping* miteinander verknüpft werden.

Was ist ein Digitales Musikinstrument?

Wichtige Aspekte:

- greifbare, interaktive Objekte
- Klanggestaltung durch Gesten
- Input (Kontrolldaten) und Output (Klang) sind voneinander entkoppelt und müssen erst durch ein Mapping miteinander verknüpft werden.

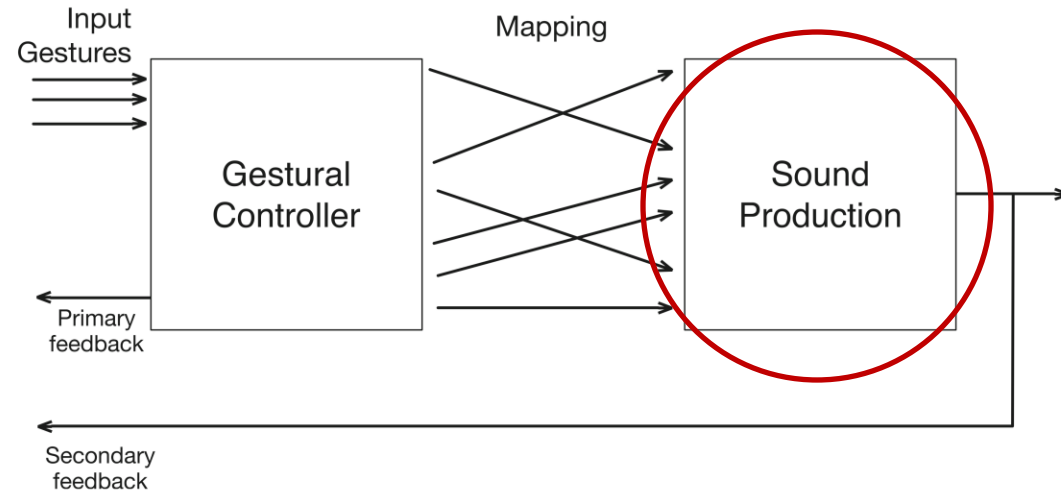
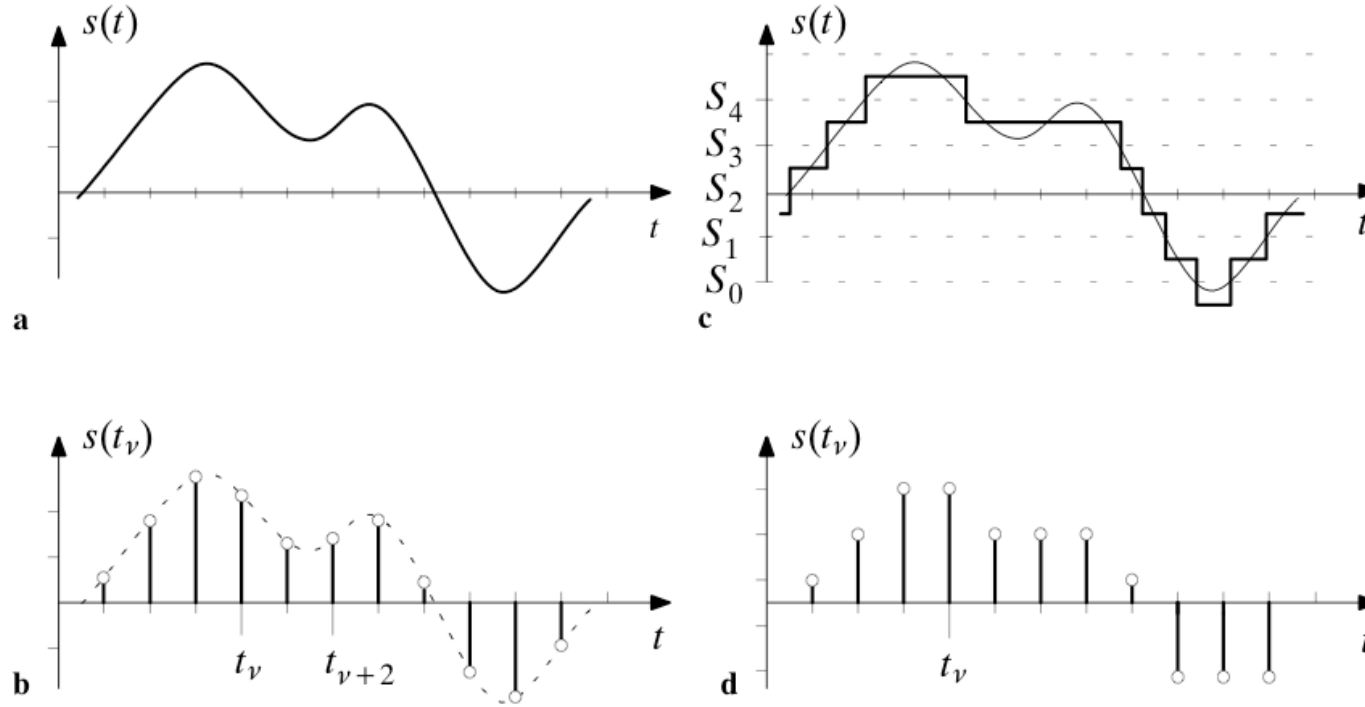


Abb.: Vgl. Miranda und Wanderley (2006)

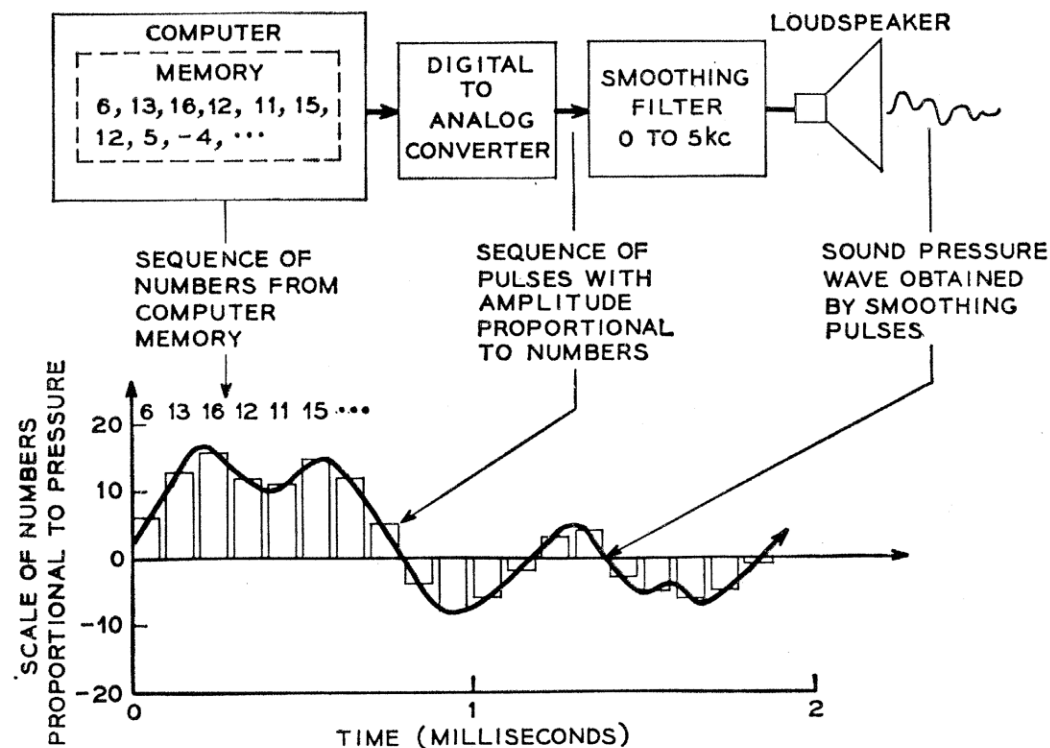
Digitale Signale



Signalarten:

- a zeitkontinuierlich und wertkontinuierlich (analog)
- b zeitdiskret und wertkontinuierlich
- c zeitkontinuierlich und wertdiskret
- d zeitdiskret und wertdiskret (digital)

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung



(Abb. Matthews 1963, 554)

Für Experimente wurde aufgrund der schnelleren Berechenbarkeit eine Samplingfrequenz von 10 kHz verwendet. Entsprechend hat das Rekonstruktions-Filter (hier „smoothing filter“) einen Durchlassbereich von 0 bis 5 kHz (hier „kc“ für *kilocycles per second*).

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

Geburtsstunde der Computermusik in den 50er Jahren

Problem 1:

Wie können die zu berechnenden Klänge mittels verständlicher Arbeitsanweisungen definiert werden (d.h. durch *musikalische* Parameter statt durch 30000 Zahlenwerte pro Sekunde)?



Abb.: Max Matthews vor einem IBM 7094

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

Geburtsstunde der Computermusik in den 50er Jahren

Problem 1:

Wie können die zu berechnenden Klänge mittels verständlicher Arbeitsanweisungen definiert werden (d.h. durch *musikalische* Parameter statt durch 30000 Zahlenwerte pro Sekunde)?

Lösung 1:

Entwicklung von speziellen Musik-Programmiersprachen, die etwa Schwingungsformen (Dreiecksschwingung, s. Music I und Music II) oder zu „Instrumenten“ kombinierbare Elemente (Oszillatoren, Hüllkurvengeneratoren) bereitstellen.

→ Unit generator (ab Music III, 1960)



Abb.: Max Matthews vor einem IBM 7094

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

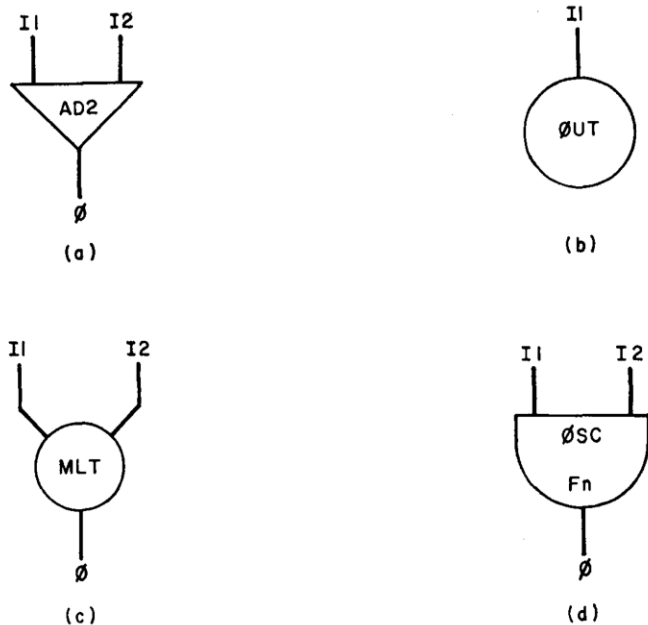


Fig. 28. Four simple unit generators: (a) AD2; (b) ØUT; (c) MLT; (d) ØSC.

(Abb. Matthews 1969, 48)

Vier einfache *unit generator*:

- (a) AD2: Addition von zwei Werten [I1 und I2]
- (b) ØUT: Transferiert berechneten Output in I-O-Blöcke für die Digital-Analog-Umsetzung
- (c) MLT: Multiplikation von zwei Werten [I1 und I2]
- (d) ØSC: Oszillator mit den Parametern Amplitude [I1], Frequenz [I2] und Wellenform [Fn]

Unit generator-Konzept in aktuellen Programmierumgebungen:
 UGen (SuperCollider), Opcode (CSound),
 object (Max/MSP)

(Zur Funktionsweise entsprechender Oszillatoren siehe Wavetable-Synthesis.)

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

Geburtsstunde der Computermusik in den 50er Jahren

Problem 1:

Wie können die zu berechnenden Klänge mittels verständlicher Arbeitsanweisungen definiert werden (d.h. durch *musikalische* Parameter statt durch 30000 Zahlen pro Sekunde)?



Abb.: Max Matthews vor einem IBM 7094

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

Geburtsstunde der Computermusik in den 50er Jahren

Problem 1:

Wie können die zu berechnenden Klänge mittels verständlicher Arbeitsanweisungen definiert werden (d.h. durch *musikalische* Parameter statt durch 30000 Zahlen pro Sekunde)?

Lösung 2:

Unterscheidung zwischen

- Definition des „Instruments“, d.h. der Klanggeneratoren (*orchestra-file*)
- Spielanweisung, d.h. der dynamischen Kontrolle der Klanggeneratoren (*score-file*)



Abb.: Max Matthews vor einem IBM 7094

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

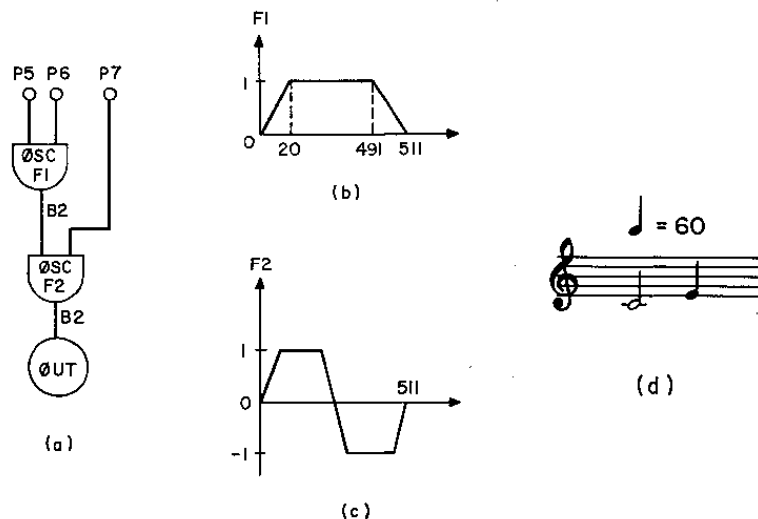
Operation code	Instrument No.	Starting time (sec)	Duration (sec)	Loudness (arbitrary units)	Frequency (cy/sec)	Periodic vibrato		Random vibrato	
						Amplitude (cy/sec)	Frequency (cy/sec)	Amplitude (cy/sec)	Bandwidth (cy/sec)
Play	1	0.0	0.25	1	466	0	0	7.0	6
Play	1	.5	.25	3	698	0	0	10.5	7
Play	1	1.0	.125	5	698	0	0	10.5	7.5
Play	1	1.5	.125	7	698	0	0	10.5	8
Play	1	2.0	.25	9	932	0	0	14.0	8.5
Play	1	2.25	.125	10	784	0	0	11.7	9
Play	2	0.5	.50	1	116.5	1.7	6	0	0
Play	2	1.5	.25	5	156	2.3	7	0	0
Play	2	2.0	.125	10	233	3.5	8	0	0



Prinzip-Darstellung eines *score-files* und entsprechende Partitur-Darstellung.

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

54 CHAPTER TWO



Instrument mit Ein- und Ausschwingvorgang

- (a) Blockschaltbild
- (b) Hüllkurve
- (c) Wellenform
- (d) Resultierende Tonfolge

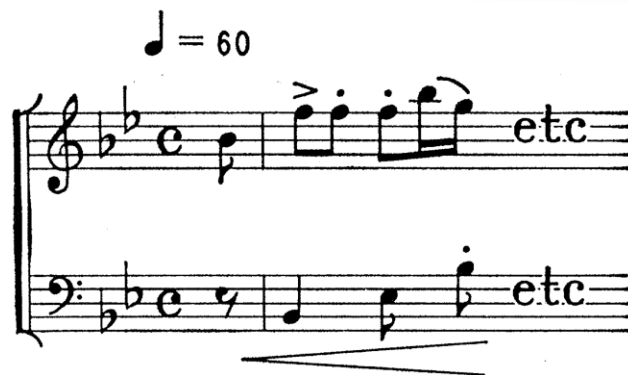
Orchestra-file: Definition des Instruments

```
1 INS 0 1 ;
2 OSC P5 P6 B2 F1 P30 ;
3 OSC B2 P7 B2 F2 P29 ;
4 OUT B2 B1 ;
```

Score-file: Definition der Hüllkurven-Funktion, der Wellenform des Oszillators und der Tonfolge

Digitale Klangsynthese: Historische Entwicklung

Operation code	Instrument No.	Starting time (sec)	Duration (sec)	Loudness (arbitrary units)	Frequency (cy/sec)	Periodic vibrato		Random vibrato	
						Amplitude (cy/sec)	Frequency (cy/sec)	Amplitude (cy/sec)	Bandwidth (cy/sec)
Play	1	0.0	0.25	1	466	0	0	7.0	6
Play	1	.5	.25	3	698	0	0	10.5	7
Play	1	1.0	.125	5	698	0	0	10.5	7.5
Play	1	1.5	.125	7	698	0	0	10.5	8
Play	1	2.0	.25	9	932	0	0	14.0	8.5
Play	1	2.25	.125	10	784	0	0	11.7	9
Play	2	0.5	.50	1	116.5	1.7	6	0	0
Play	2	1.5	.25	5	156	2.3	7	0	0
Play	2	2.0	.125	10	233	3.5	8	0	0



Problematische Aspekte der Kontrolle über score-files

- nicht-hierarchische Liste von Ereignissen
- Tonhöhe werden durch Frequenzwerte definiert
- Keine Strukturen höherer Ordnung (z.B. Phrasen, Stimmen)

→ unbequem für die kompositorische Praxis

Operation code	Instrument No.	Starting time (sec)	Duration (sec)	Loudness (arbitrary units)	Frequency (cy/sec)	Periodic vibrato		Random vibrato	
						Amplitude (cy/sec)	Frequency (cy/sec)	Amplitude (cy/sec)	Bandwidth (cy/sec)
Play	1	0.0	0.25	1	466	0	0	7.0	6
Play	1	.5	.25	3	698	0	0	10.5	7
Play	1	1.0	.125	5	698	0	0	10.5	7.5
Play	1	1.5	.125	7	698	0	0	10.5	8
Play	1	2.0	.25	9	932	0	0	14.0	8.5
Play	1	2.25	.125	10	784	0	0	11.7	9
Play	2	0.5	.50	1	116.5	1.7	6	0	0
Play	2	1.5	.25	5	156	2.3	7	0	0
Play	2	2.0	.125	10	233	3.5	8	0	0



Musik | Computer | Mensch

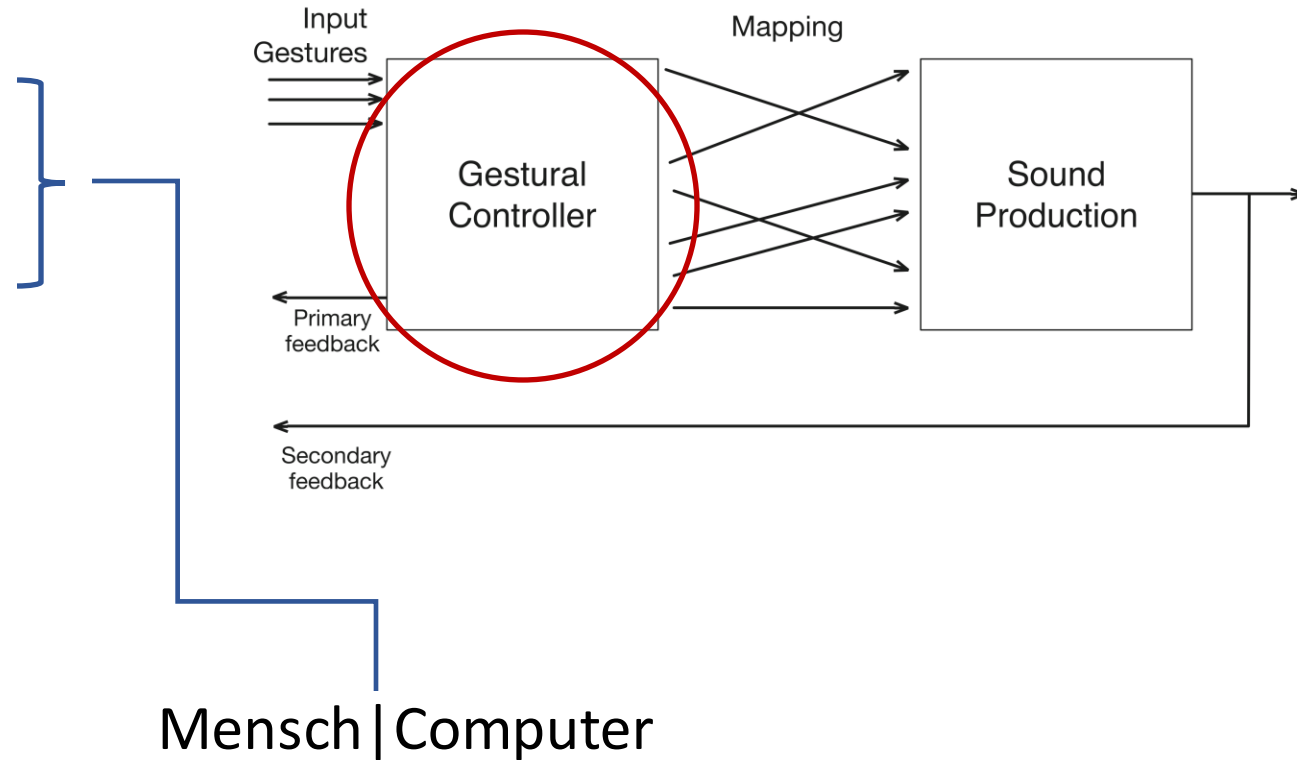
$\text{♩} = 60$



Abb.: Max Matthews mit seinem Radio-Baton, etwa 1984

Was ist ein Digitales Musikinstrument?

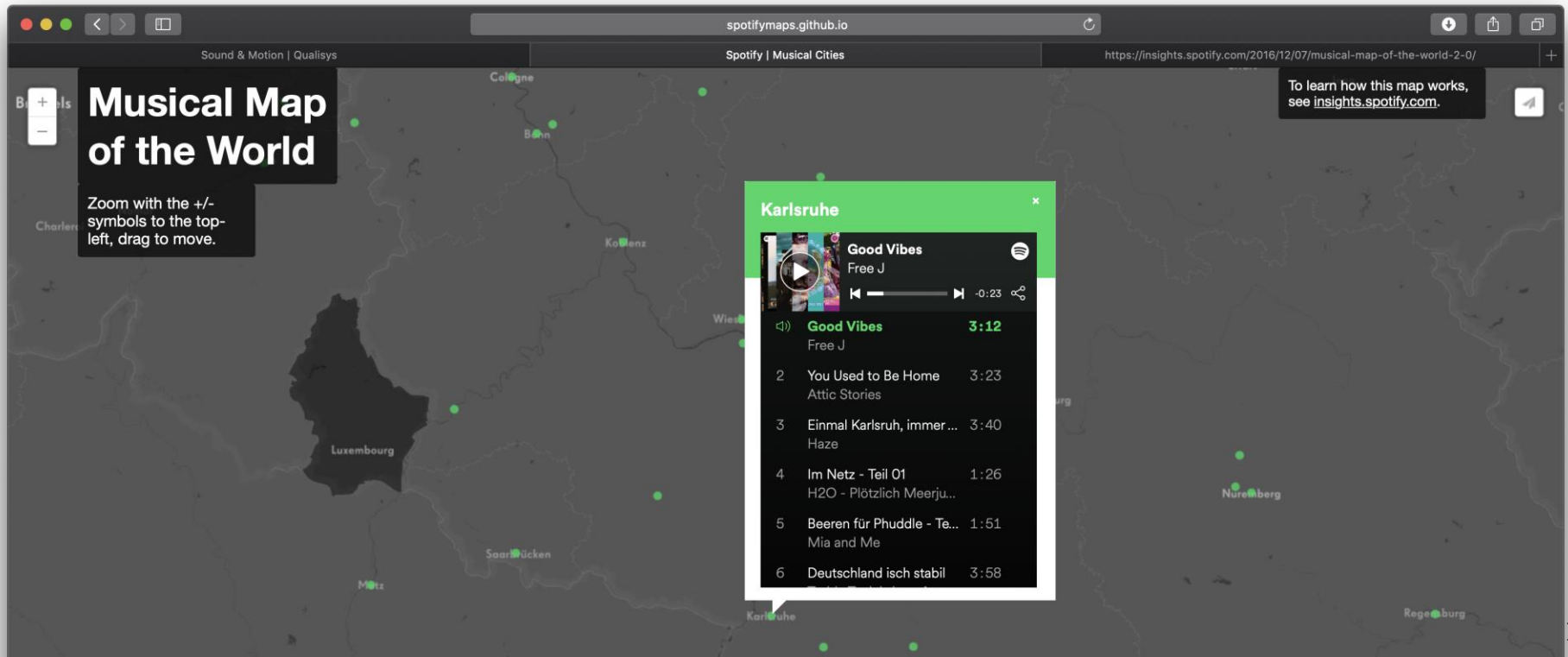
- Nutzer:innendaten
- Bewegungsdaten
- Physiologische Daten
- Interaktionsdaten



Nutzer:innendaten

Alle Daten die im Zuge der Nutzung einer Anwendung anfallen (z.B. Spotify: Wer hört was zu zu welcher Zeit an welchem Ort?)

Beispiel 1: Spotify's Audiographic Map – The Sound of Karlsruhe



Verhaltens- und Bewegungsdaten

Analyseverfahren:

- Sensorbasierte Verfahren
Intertialsensoren zur Erfassung von Beschleunigung, Lage, etc. werden direkt am Körper angebracht
- Markerbasierte Verfahren
Kombination aus passiven oder aktiven Markern und Infrarot-Kamera-System
- Videobasierte Analyseverfahren
z.B. Frame-Differencing-Verfahren, Optischer Fluss

Verhaltens- und Bewegungsdaten

Beispiel: Erfassung der Körperbewegung mittels eines markerbasierten Verfahrens

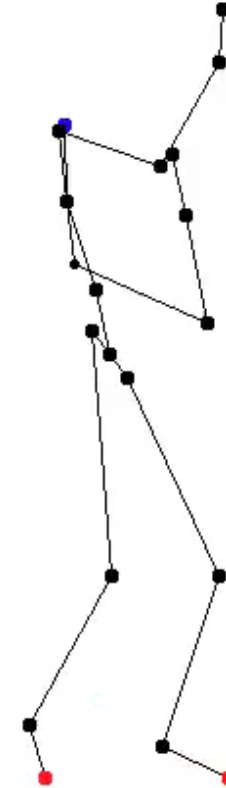
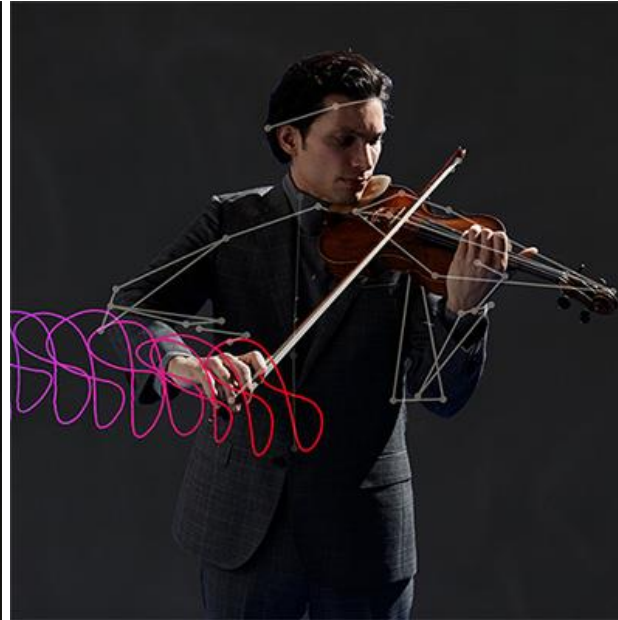
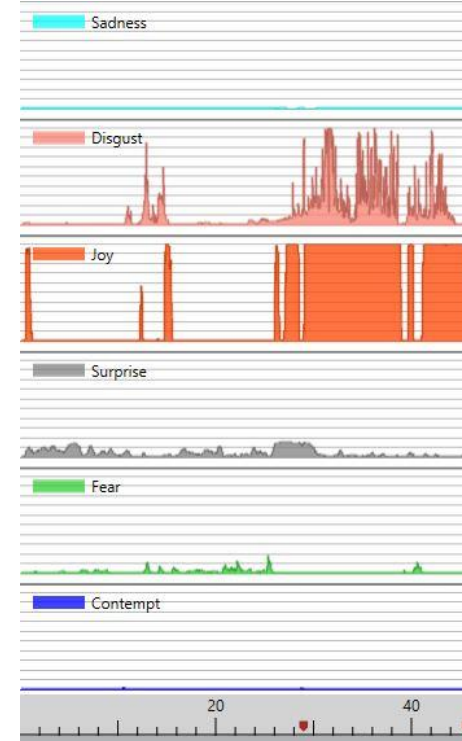
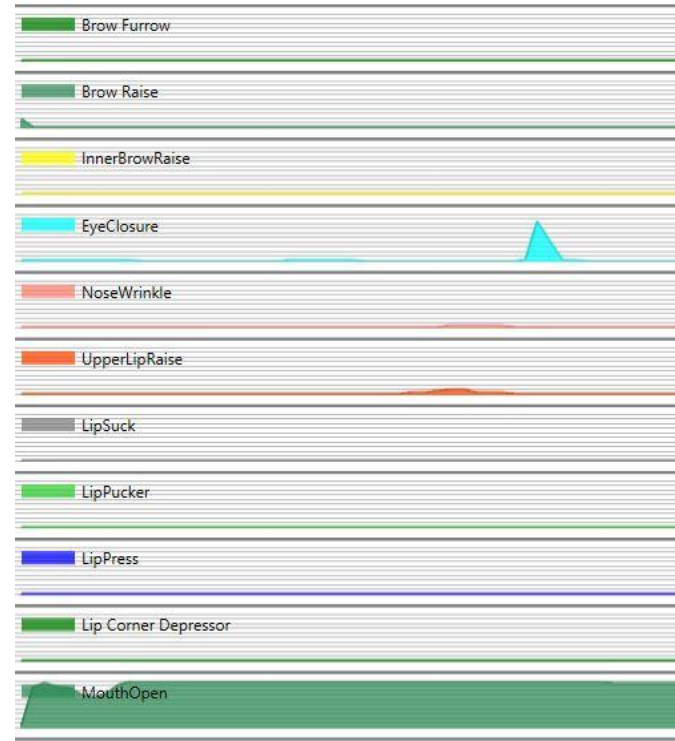


Abb. links: Alexander Lunt bei der Performance von *Modi*
rechts: Visualisierung von Bewegungsdaten (Quelle: Qualysis)

Burger et al. (2013). Influences of rhythm- and timbre-related musical features on characteristics of music-induced movement.

Verhaltens- und Bewegungsdaten

Beispiel: videobasierte Analyse des Gesichtsausdrucks



Automatische Kodierung des Gesichtsausdrucks auf Basis des Facial Action Coding System
(hier: Action Units 4 und 15) (Quelle: imotions.com)

Physiologische Daten

- Herzrate und Herzratenvariabilität (Heart Rate HR, Heart Rate Variability HRV)
- Elektrodermale Aktivität (Hautleitwert und Hautleitwiderstand)
- Atmung (Atemfrequenz, Atemtiefe)
- Muskelspannung (Electromyographie EMG)
- ...



Abb. Plux Bitalino PsychoBIT BT

Physiologische Daten

- Herzrate und Herzratenvariabilität (Heart Rate HR, Heart Rate Variability HRV)
- Elektrodermale Aktivität (Hautleitwert und Hautleitwiderstand)
- Atmung (Atemfrequenz, Atemtiefe)
- Muskelspannung (Electromyographie EMG)
- ...



Abb. rechts: Noraxon Ultium EMG-Messsystem;
links: Motion Tracking und EMG.

Physiologische Daten

- Herzrate und Herzratenvariabilität (Heart Rate HR, Heart Rate Variability HRV)
- Elektrodermale Aktivität (Hautleitwert und Hautleitwiderstand)
- Atmung (Atemfrequenz, Atemtiefe)
- Muskelspannung (Electromyographie EMG)
- ...



Abb. oben: Thalmic Labs: Myo Gesture Control Armband;
links: Atau Tanaka mit EMG-Instrument (Tanaka 2019,
148).

Interaktionsdaten

- Verwendung von vorhandenen Nutzer-Schnittstellen (Tastatur, Maus, etc.)
- Erweiterung von z.B. Instrumenten um Sensorik (z.B. Yamaha Computerflügel mit Touchkeys)
- Spezielle Controller für die musikalische performative Praxis (z.B. Eigenharp, Karlax)

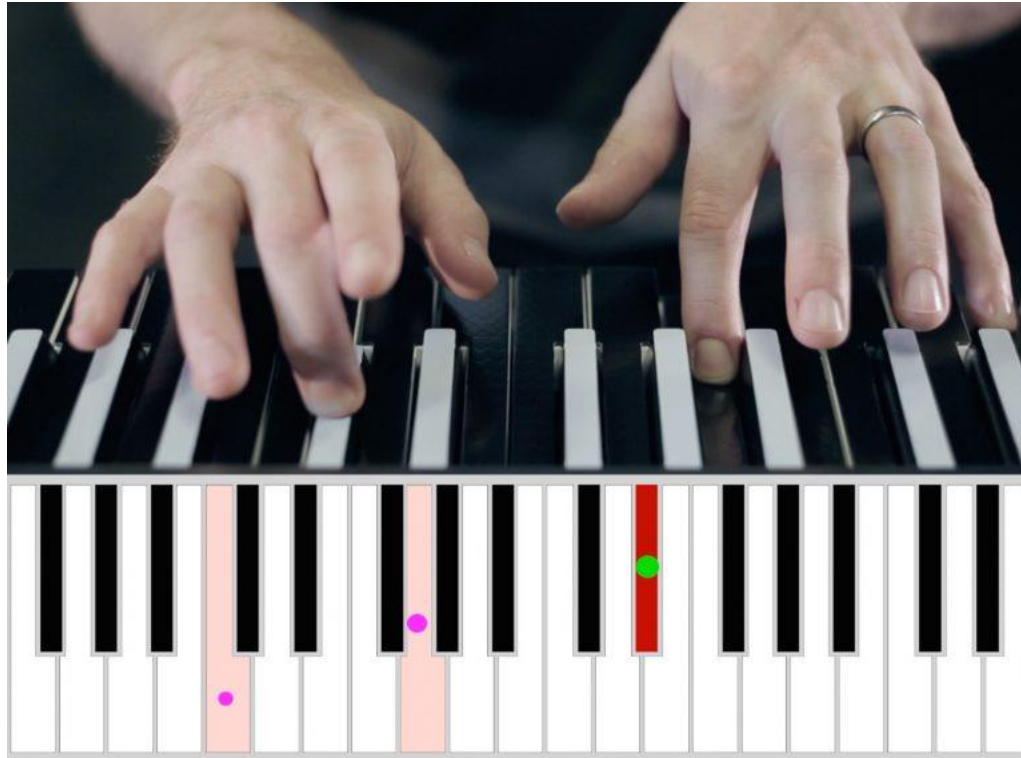


Abb. Touchkeys: ein System mit berührungsempfindlichen Sensoren, die direkt auf die Klaviatur aufgebracht werden, und die Informationen bezüglich der XY-Position und der Kontaktfläche liefern.

<http://touchkeys.co.uk>

Interaktionsdaten

- Verwendung von vorhandenen Nutzer-Schnittstellen (Tastatur, Maus, etc.)
- Erweiterung von z.B. Instrumenten um Sensorik (z.B. Yamaha Computerflügel mit Touchkeys)
- Spezielle Controller für die musikalische performative Praxis (z.B. s. Abb. Eigenharp, Karlax)
→ Nur Controller, kein Musikinstrument!



Abb. oben: da fact Karlax; rechts: Eigenlab Eigenharp Tau



Was ist ein Digitales Musikinstrument?

Wichtige Aspekte:

- greifbare, interaktive Objekte
- Klanggestaltung durch Gesten
- Input (Kontrolldaten) und Output (Klang) sind voneinander entkoppelt und müssen erst durch ein Mapping miteinander verknüpft werden.

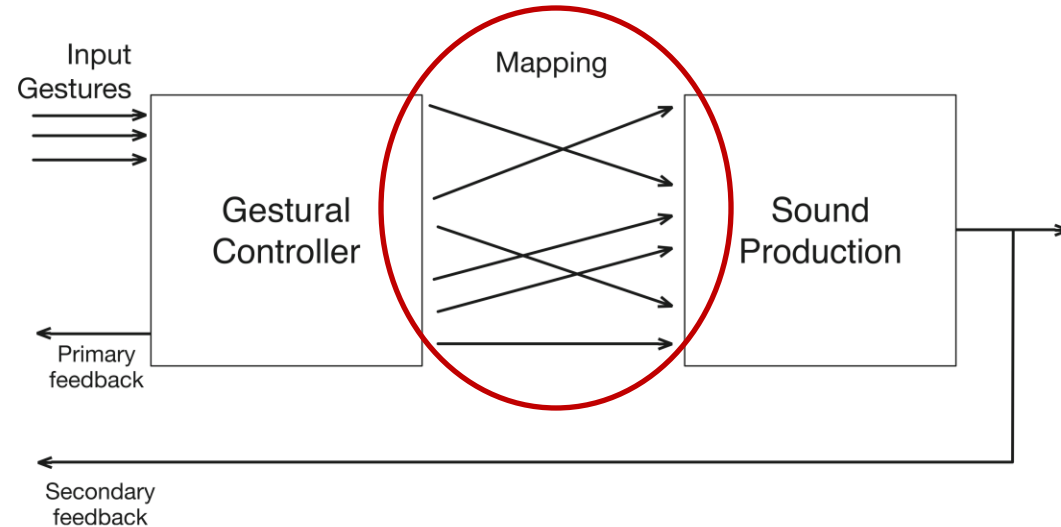
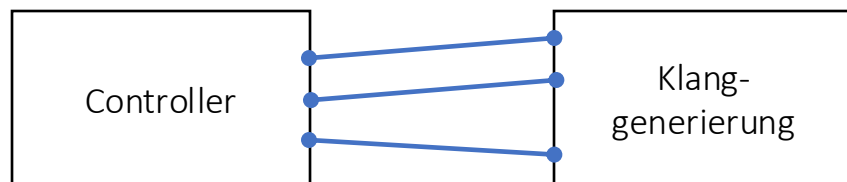


Abb.: Vgl. Miranda und Wanderley (2006)

Mapping

Mappings bzw. Mapping-Strategien sind eine Reihe von Verbindungen zwischen der Gestensteuerung und dem Soundmodul.

- Implizites Mapping: Verbindungen zwischen Eingangs- und Ausgangsmodulen werden durch einen Prozess definiert (z.B. maschinelles Lernen, neuronale Netze). → „Black Box“
- Explizites Mapping: Der Benutzer definiert explizit die Beziehung zwischen Eingabe und Ausgabe, indem er zwei Variablensätze analytisch oder grafisch miteinander verbindet

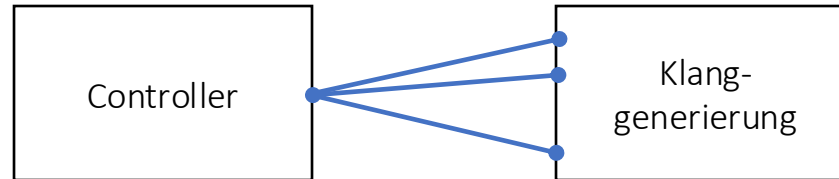


One-to-one: Beziehung, bei der jede unabhängige Gestensteuerung mit einem musikalischen Ausgangsparameter verbunden ist.

Mapping

Mappings bzw. Mapping-Strategien sind eine Reihe von Verbindungen zwischen der Gestensteuerung Steuerung und dem Soundmodul.

- Implizites Mapping: Verbindungen zwischen Eingangs- und Ausgangsmodulen werden durch einen Prozess definiert (z.B. maschinelles Lernen, neuronale Netze). → „Black Box“
- Explizites Mapping: Der Benutzer definiert explizit die Beziehung zwischen Eingabe und Ausgabe, indem er zwei Variablensätze analytisch oder grafisch miteinander verbindet

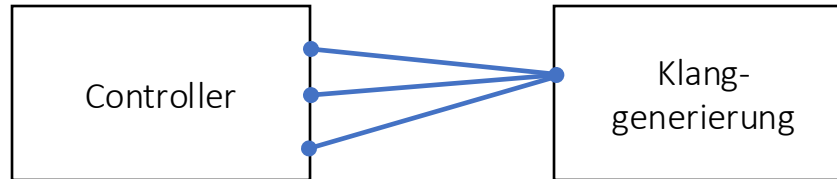


One-to-many (divergentes Mapping): Beziehung, bei der ein Eingabeparameter gleichzeitig mehr als einen musikalischen Parameter steuert.

Mapping

Mappings bzw. Mapping-Strategien sind eine Reihe von Verbindungen zwischen der Gestensteuerung Steuerung und dem Soundmodul.

- Implizites Mapping: Verbindungen zwischen Eingangs- und Ausgangsmodulen werden durch einen Prozess definiert (z.B. maschinelles Lernen, neuronale Netze). → „Black Box“
- Explizites Mapping: Der Benutzer definiert explizit die Beziehung zwischen Eingabe und Ausgabe, indem er zwei Variablensätze analytisch oder grafisch miteinander verbindet



Many-to-one (konvergentes Mapping): Beziehung, bei der mehr als ein Eingangsparameter Parameter mit nur einem Klangparameter verbunden ist.

Was ist ein Digitales Musikinstrument?

Verschiedene Arten von Feedback:

- Auditiv
- Haptisch
- Vibro-taktil
- Visuell
- Elektrische Muskelstimulation

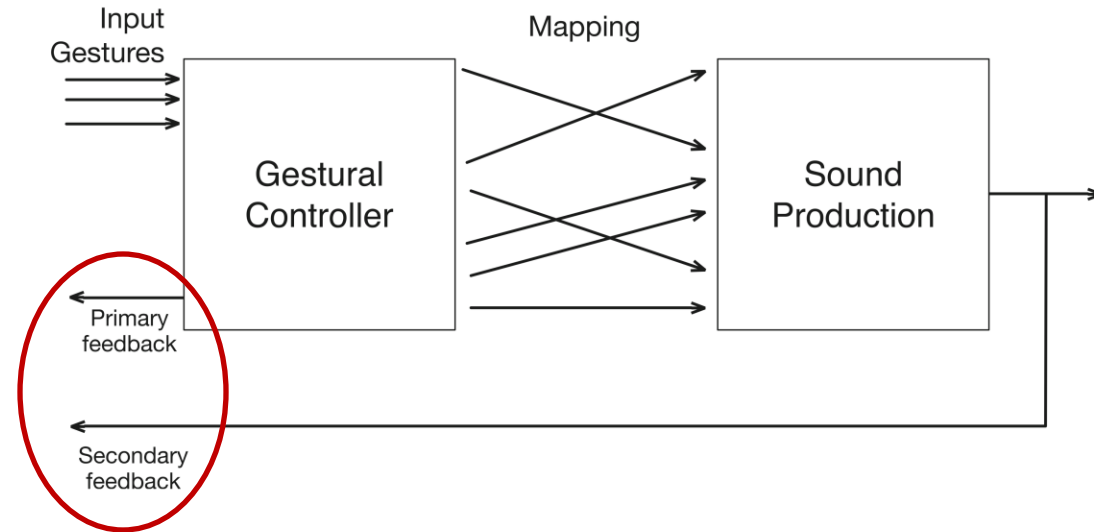


Abb.: Vgl. Miranda und Wanderley (2006)

Einsatz von Aktuatoren, elektrischer Muskelstimulation

Beispiel: Michaela Davies, *Duty* (2014), Musikstimulation durch Reizstrom



<https://vimeo.com/126445669>



Michaela Davies, *Untitled* for Cyborg String Quartet (2013)

Digitale Musikinstrumente

Klassifikation Digitaler Musikinstrumente (nach Miranda und Wanderley 2006)

- Augmented musical instruments: akustische Instrumente, die um Sensorik ergänzt wurden und damit die Kontrollmöglichkeiten innerhalb des instrumentenspezifischen Gestenrepertoires erweitern (z.B. Flügel mit Touchkeys, s.o.).

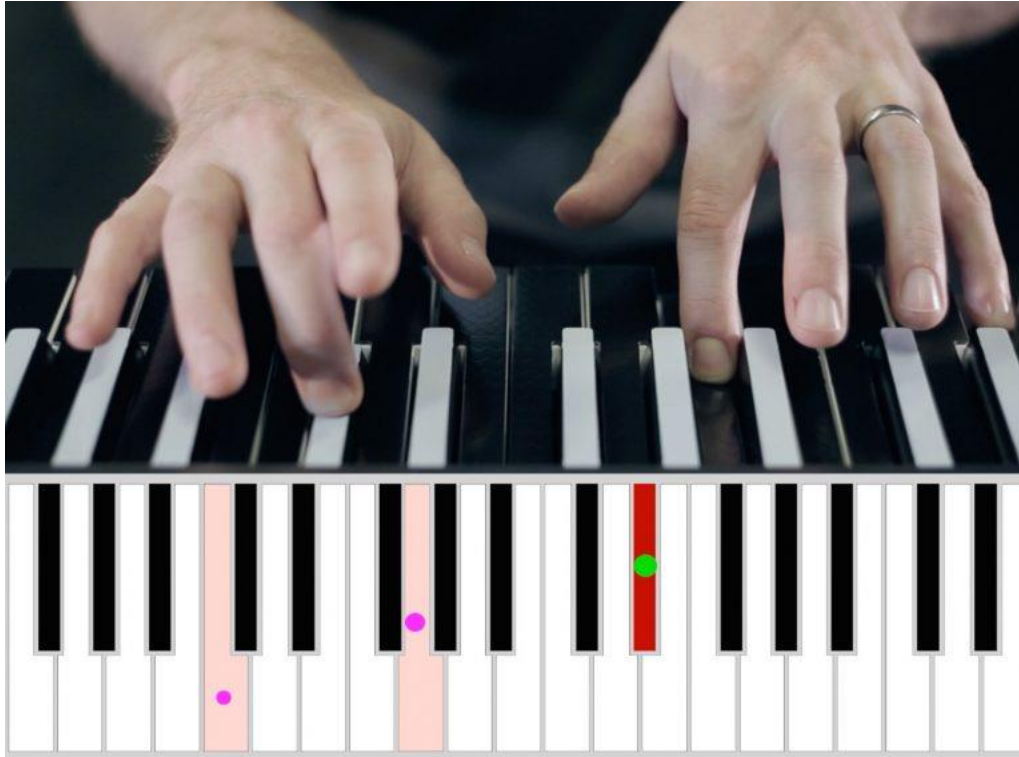


Abb. Touchkeys: ein System mit berührungsempfindlichen Sensoren, die direkt auf die Klaviatur aufgebracht werden, und die Informationen bezüglich der XY-Position und der Kontaktfläche liefern.

<http://touchkeys.co.uk>

Digitale Musikinstrumente

Klassifikation Digitaler Musikinstrumente (nach Miranda und Wanderley 2006)

- Augmented musical instruments: akustische Instrumente, die um Sensorik ergänzt wurden und damit die Kontrollmöglichkeiten innerhalb des instrumentenspezifischen Gestenrepertoires erweitern (z.B. Flügel mit Touchkeys, s.o.).
- Instrument-like gestural controllers: MIDI-Controller, die akustische Instrumente nachahmen. Gegenüber diesen verfügen Sie über ein größeres Repertoire möglicher Klänge bei einer gleichzeitig weniger nuancierten Klangkontrolle (z.B. elektronische Blaswandler wie Akai EWI 5000).



Abb. Blaswandler Akai EWI 5000

Digitale Musikinstrumente

Klassifikation Digitaler Musikinstrumente (nach Miranda und Wanderley 2006)

- Augmented musical instruments: akustische Instrumente, die um Sensorik ergänzt wurden und damit die Kontrollmöglichkeiten innerhalb des instrumentenspezifischen Gestenrepertoires erweitern (z.B. Flügel mit Touchkeys, s.o.).
- Instrument-like gestural controllers: MIDI-Controller, die akustische Instrumente nachahmen. Gegenüber diesen verfügen Sie über ein größeres Repertoire möglicher Klänge bei einer gleichzeitig weniger nuancierten Klangkontrolle (z.B. elektronische Blaswandler wie Akai EWI 5000).
- Instrument-inspired gestural controllers: Controller, die Ähnlichkeiten mit akustischen Musikinstrumenten aufweisen ohne die Absicht zu verfolgen diese zu simulieren (z.B. Soma The Pipe).



Abb. Soma The Pipe

Digitale Musikinstrumente

Klassifikation Digitaler Musikinstrumente (nach Miranda und Wanderley 2006)

- Augmented musical instruments: akustische Instrumente, die um Sensorik ergänzt wurden und damit die Kontrollmöglichkeiten innerhalb des instrumentenspezifischen Gestenrepertoires erweitern (z.B. Flügel mit Touchkeys, s.o.).
- Instrument-like gestural controllers: MIDI-Controller, die akustische Instrumente nachahmen. Gegenüber diesen verfügen Sie über ein größeres Repertoire möglicher Klänge bei einer gleichzeitig weniger nuancierten Klangkontrolle (z.B. elektronische Blaswandler wie Akai EWI 5000).
- Instrument-inspired gestural controllers: Controller, die Ähnlichkeiten mit akustischen Musikinstrumenten aufweisen ohne die Absicht zu verfolgen diese zu simulieren (z.B. Soma The Pipe).
- Alternate gestural controllers: Controller, die keine Ähnlichkeiten zu existierenden Instrumenten aufweisen (z.B. Eigenlab Eigenharp Tau, da fact Karlox)



Abb.: da fact Karlox.



Gestische Controller

Beispiel: Michel Waiswiz, *The Hands*





stein

Was ist ein Digitales Musikinstrument?

Wichtige Aspekte:

- greifbare, interaktive Objekte
- Klanggestaltung durch Gesten
- Input (Kontrolldaten) und Output (Klang) sind voneinander entkoppelt und müssen erst durch ein Mapping miteinander verknüpft werden.

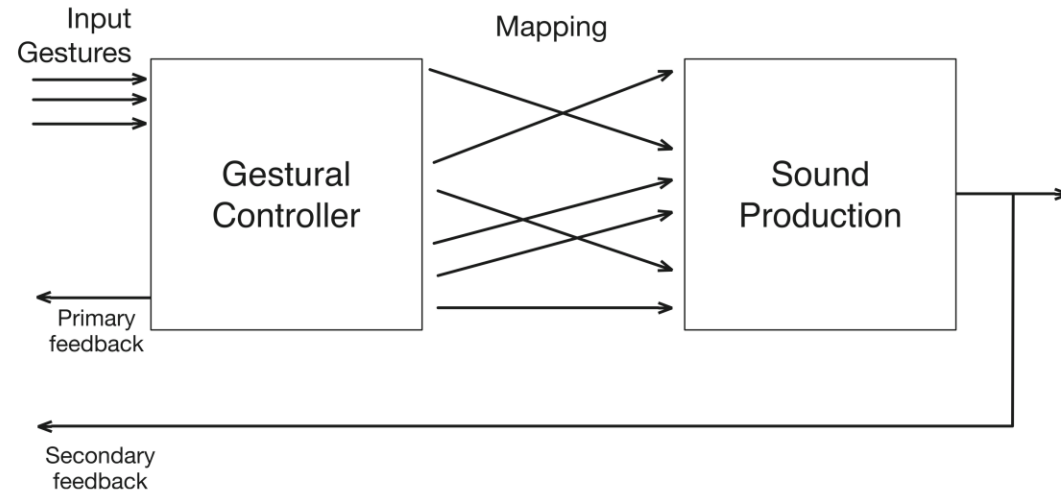


Abb.: Vgl. Miranda und Wanderley (2006)

Interaktion – *Guidelines for Digital Instrument Design*

(Hunt und Wanderley 2000; Malloch et al. 2019)

- Require energy for amplitude
- Two hands are better
- Use complex mappings—changes to one parameter should inflect others
- Control timbre in a non-direct manner

Interaktion – *Guidelines for Digital Instrument Design*

(Hunt und Wanderley 2000; Malloch et al. 2019)

- Require energy for amplitude
- Two hands are better
- Use complex mappings—changes to one parameter should inflect others
- Control timbre in a non-direct manner
- Match integrality and separability of controls
- Consider the speed of interaction when choosing inputs
- Support personal strategies and representations
- Use multiple parallel representations

Anwendung in der Forschung

Bsp.: Forschung und Lehre (DigEx_3D)

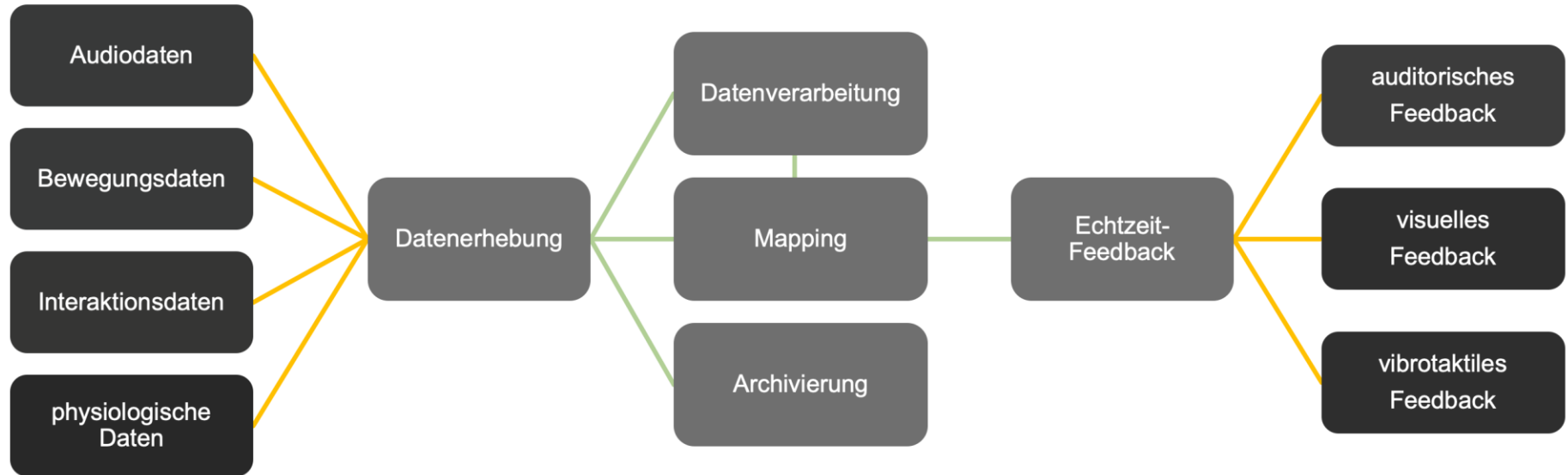


Abb. Komponenten im künstlerisch-wissenschaftlichen Forschungsprojekt DigEx_3D

DigEx_3D ist ein künstlerisch-wissenschaftliches Forschungs- und Vermittlungsprojekt. Im Rahmen dieses Projektes sollen durch eine innovative Zusammenführung neuester Technologien der Bereiche Augmented Reality, 3D-Audio, Motion Capturing und physiologische Datenerfassung Echtzeit-Feedback-Systeme entwickelt werden, mithilfe derer Studierende und Lehrende der künstlerischen Studiengänge ihre Musizierpraxis auf eine neuartige Art und Weise erfahren können. Im Mittelpunkt stehen dabei Aspekte musikalischer Expressivität und musikalischer Performanz.

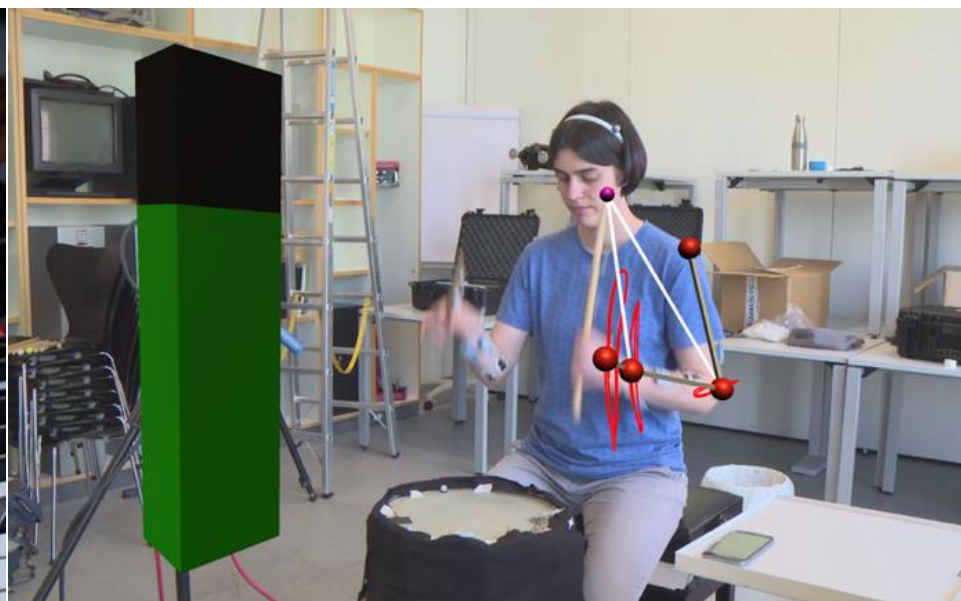


Abb. 1 (links): Multisensorische Erfassung von Performanzdaten der Pianistin Arabella Pare mit Motion Capture, Elektromyographie und Computerflügel mit berührungsempfindlichen Tastsensoren, Foto: Patrick Borgeat; Abb. 2 (rechts): Visuelle Echtzeit-Repräsentation der prozessierten Performanzdaten der Schlagzeugerin Leonie Klein: die Muskel- und Gelenksteifigkeit des Unterarms und Handgelenks werden als Balken in den Raum projiziert. Die Übende versucht, diesen Balken live zu minimieren, um dadurch intuitiv eine lockere Spieltechnik zu erreichen, Abbildung: Patrick Borgeat.

- Baalman, M. (2022). *Composing Interactions. An Artist's Guide to Building Expressive Interactive Systems*. V2 publishing.
- Bovermann, T., de Campo, A., Egermann, H., Hardjowirogo, S. I., & Weinzierl, S. (Hrsg.)(2017). *Musical instruments in the 21st century*. Singapore: Springer.
- Brown, D., Nash, C., & Mitchell, T. (2018). Simple mappings, expressive movement: a qualitative investigation into the end-user mapping design of experienced mid-air musicians. *Digital Creativity*, 29(2-3), 129-148.
- Hunt, A., & Wanderley, M. M. (2002). Mapping performer parameters to synthesis engines. *Organised sound*, 7(2), 97.
- Jensenius, A. R., & Lyons, M. J. (Hrsg.) (2017). *A nime reader: Fifteen years of new interfaces for musical expression*. Springer.
- Jensenius, A. R. (2022). *Sound Actions: Conceptualizing Musical Instruments*. MIT Press. (open access)
https://www.uio.no/ritmo/english/people/management/alexanje/research/sound-actions/sound-actions_jensenius-2022.pdf
- Malloch, J., Garcia, J., Wanderley, M. M., Mackay, W. E., Beaudouin-Lafon, M., & Huot, S. (2019). A Design Workbench for Interactive Music Systems. In: Simon Holland; Tom Mudd; Katie Wilkie McKenna; Andrew McPherson; Marcelo M. Wanderley (Hrsg.) *New Directions in Music and Human Computer Interaction*. Cham, Switzerland: Springer, 23-40.
- Magnusson, T. (2019). *Sonic writing: technologies of material, symbolic, and signal inscriptions*. Bloomsbury Academic.
- Miranda, E. R., & Wanderley, M. M. (2006). *New digital musical instruments: control and interaction beyond the keyboard*. AR Editions, Inc..
- Tanaka, Atau (2019). Embodied Musical Interaction. In: Simon Holland; Tom Mudd; Katie Wilkie McKenna; Andrew McPherson and Marcelo Wanderley, (Hrsg.). *New Directions in Music and Human Computer Interaction*. Cham, Switzerland: Springer, 135-154.
<https://research.spotify.com/publications>
<https://spotifymaps.github.io/musicalcities/>
<https://developer.spotify.com/documentation/web-api/reference/tracks/get-audio-features/>