

## Liste der noch zu erledigenden Punkte

# Zusammenfassung

Die hardwarenahe Programmiersprache VHDL ist in der heutigen Zeit ein wichtiger Bestandteil der digitalen Signalverarbeitung. Die Projektarbeit befasst sich mit zwei Themen von VHDL:

- Das Erforschen zweier hardwarenahen Fehlerquellen, *glitches* und *metastability*, und
- das Entwickeln eines *midi interfaces*, bei dem die Entwicklung von einer *textbasierten testbench* begleitet wird.

Im Fokus der VHDL-Arbeit steht das künstlich Herbeiführen von *glitches*. Dies gelingt mit einem Cyclone II-FPGA in dem Pfade einzelner Signale künstlich verlängert sind. Dadurch treffen Werte verzögert ein und der asynchrone *decoder* verarbeitet falsche Werte. Es gelangen falsche Signale auf die Leitung, sogenannte *glitch*.

Um einen metastabilen Zustand in einem System zu provozieren, sind zwei VHDL-Logik-Blöcke unterschiedlich getaktet. Kein Takt wird als Vielfaches des anderen implementiert. Das Ausgangssignal des ersten Logik-Blocks wird als asynchron Impuls auf den zweiten Logik-Block geführt. Dekodiert die *finite state machine* keinen definierten Zustand, ist das System in einen undefinierten Zustand gefallen. Metastabilität trifft ein.

Der zweiten Teil der Projektarbeit entwickelt *midi interface*, das Polyphonie detektiert. Die textbasierte *testbench* begleitet die Entwicklung des *midi controller*. Das *midi interface* detektiert die *status bytes* NOTE ON, NOTE OFF und POLYPHONY und die VHDL-Einheit *polyphony* out gibt 10 gedrückte Noten parallel aus.

# Abstract

??? ou ou englisch.... mhhhhmmmmmmmm

# Vorwort

Meine Motivation ist das vertiefte Kennenlernen der Sprache VHDL. Diese hardwarenahe Sprache beinhaltet mit der kombinatorischen Logik und der auch nicht-sequentiellen Prozessverarbeitung Eigenheiten, mit denen ich vertraut werden will.

Der erste Teil der Projektarbeit, das Provozieren von Signalfehlern, lässt mich in die asynchrone Signalverarbeitung einblicken und wird meinen VHDL-Coderstil nachhaltig prägen. Im zweiten Teil, dem Entwickeln eines *midi interfaces* lerne ich ein Protokoll zu durchleuchten. Besonders interessant ist die textbasierte *testbench*, welche die Implementation auf Herz und Nieren testet.

Ich möchte Prof. Hans-Joachim Gelke Dank aussprechen. Er lernt mich viel über kombinatorische Logik. Ebenfalls möchte ich Dr. Matthias Rosenthal danken, der die Arbeit und den Entwicklungsprozess mitträgt.

Aus meiner Sicht ist diese Arbeit vor allem für Software Ingenieure interessant, da sie einen Einblick in die hardwarenahe Programmierung gibt.

Ich freue mich auf kommende VHDL-Projekte.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1. Ausgangslage . . . . .	7
1.2. Aufgabenstellung . . . . .	7
<b>2. Glitches</b>	<b>8</b>
2.1. Glitches in der Digitalen Signalverarbeitung . . . . .	8
2.2. Ursache für Glitches . . . . .	8
2.3. Glitches durch Pfadverzögerung . . . . .	9
2.4. Resultat . . . . .	11
<b>3. Metastabilität</b>	<b>12</b>
3.1. Metastabiler Zustand . . . . .	12
3.2. Ursache von Metastabilität . . . . .	12
3.3. Metastabilität erzeugen . . . . .	13
3.3.1. Konzept . . . . .	13
3.3.2. Umsetzung . . . . .	14
3.4. Resultat Metastabilität provozieren . . . . .	15
<b>4. Testbench</b>	<b>18</b>
4.1. Device Under Test . . . . .	18
4.2. Struktur der Input-Datei . . . . .	18
4.3. Aufstellen der Fehler . . . . .	19
4.3.1. Einzelne Noten testen . . . . .	19
4.4. Code Testbench . . . . .	21
4.4.1. Erstellen eines Package . . . . .	21
4.4.2. Prozessoptimierung . . . . .	21
4.5. Ergebnisse Simulation . . . . .	21
4.5.1. Block Midi Control . . . . .	22
4.5.2. Block Polyphonie Out . . . . .	22
<b>5. MIDI Steuerung</b>	<b>23</b>
5.1. Einteilen der Blöcke und definieren der Schnittstellen . . . . .	23
5.2. Das MIDI Kommunikationsprotokoll . . . . .	24
5.2.1. MIDI Daten Typen . . . . .	24
5.2.2. Zwei MIDI Note Modes . . . . .	25
5.3. Umsetzung "midi controlBlock . . . . .	25
5.4. Umsetzung "polyphonie outBlock . . . . .	28
<b>6. Diskussion und Ausblick</b>	<b>29</b>
<b>7. Verzeichnis</b>	<b>30</b>
7.1. Literatur . . . . .	30
7.2. Glossar . . . . .	30
<b>A. Offizielle Aufgabenstellung</b>	<b>I</b>
<b>B. Aufgabenspezifikation für den zweiten Teil</b>	<b>II</b>
<b>C. Konzept Keyboard Dekoder</b>	<b>III</b>

<b>D. Konzept Polyphonie</b>	<b>IV</b>
<b>E. CD mit Projektdateien</b>	<b>V</b>
<b>F. Top Synthesizer</b>	<b>VI</b>
<b>G. In- und Outputdatei der textbasierte Testbench</b>	<b>VII</b>

# 1. Einleitung

## 1.1. Ausgangslage

Für den ersten Teil der Arbeit, die Timing Artefakte *glitch* und *metastability* zu demonstrieren, gibt es wenige Referenzprojekte. Da die Zustände ungewollt sind, finden sie als Fehlerquellen Erwähnung in der Literatur [5], [6], [7]. Nur ein Dokument ist gefunden, das die Erzeugung von *metastability* behandelt [8]. Aus diesem Grund sich der Nachweis der Timing Artefakte auf Anregungen und der Erfahrung von Prof. Hans-Joachim Gelke.

Im zweiten Teil geht es um den Aufbau eines *midi interfaces*. MIDI bedeutet *musical instrument digital interface* und ist ein Standard, der die Beschaffenheit der Hardware wie auch das Kommunikationsprotokoll festlegt [4]. Die MIDI Manufacturers Association dokumentiert die mehrfachen Erweiterungen des MIDI 1.0 Standard [2]. Diese Spezifikationen bildet die Grundlage für den Block *midi control*. Am Institut for Embedded Systems besteht ein *midi uart top*-Block in VHDL von Armin Weiss. In dieser Projektarbeit zu entwickeln sind die zwei Einheiten *midi control* und *polyphony out*. Und anschliessend diese Blocks in das bestehende Synthesizer-Projekt einzubauen. Bei beiden Blocks basiert die Entwicklung auf einer textbasierten *testbench*.

Jeder zu entwickelnde Block wird mit einer textbasierten *testbench* getestet.

## 1.2. Aufgabenstellung

Die offizielle Aufgabenstellung befindet sich im Anhang A.

- Erzeugung von Glitches mit einem Zähler und nachgeschaltetem Dekoder. Sichtbarmachung der Glitches mit einem Oszilloskop. Betätigen des asynchronen Resets vom Decoder aus.
- Provozieren und sichtbarmachung von metastabilen Zuständen. Hierfür kann z.B. eine Schaltung mit zwei asynchronen externen Takten aufgebaut werden.

Nach der Fertigstellen des ersten Teils, wird die Aufgabenstellung für den zweiten Teil präzisiert (siehe Anhang B).

- Midi Interface for Keyboard für Polyphonie nach Konzept von gelk
  - o 10 Frequenz Control Ausgänge zur Steuerung der Tonhöhe des Generators
  - o 10 On/Off Ausgänge Ton on/off
  - o UART wird geliefert von gelk
  - o VHDL wird von Grund auf neu erstellt.
- 10 DDS implementieren und mit Mischer mischen
- Script basierte Testbench. Testbench erzeugt serielle Midi Daten, so wie sie auf dem DIN Stecker vorkommen (logisch)
- Testbench liest eine Testscript Datei ein, in welcher die Tastendrücke eines Keyboards abgebildet werden können. Midi Poliphony Spec muss durch die Testbench unterstützt werden können. Velocity muss nicht unterstützt werden.
- Kein VHDL code ohne Testbench.
- Block level testbench. Unit Tests.

## 2. Glitches

### 2.1. Glitche in der Digitalen Signalverarbeitung

In der Digitalen Signalverarbeitung ist glitch ein bekannter Fehler, den William I. Fletscher folgendermassen beschreibt: "Als *glitch* wird eine ungewollte, flüchtige "Signalspitze" bezeichnet, die Zähler aufwärts zählt, Register löscht oder einen ungewollten Prozess startet." [6]

Abbildung 2.1 zeigt zwei *glitches* in einem Ausgangssignal.



Abbildung 2.1.: Zwei Glitches im Ausgangssignal

### 2.2. Ursache für Glitches

Der Auslöser sind ungleichzeitig eintreffende Signale, die durch

- 1.) unterschiedlich lange Signalpfade,
- 2.) unterschiedliche Durchlaufverzögerungen der vorangehenden Flip-Flops oder
- 3.) unterschiedliche Logik-Zeiten

entstehen, und die in ein **asynchrones** Bauteil geführt werden. Der Dekoder im asynchronen Bauteil entschlüsselt dadurch kurzfristig einen falschen Wert.

Abbildung 2.2 zeigt ein leicht verzögertes (getaktetes) enable-Signal zu einem anders verzögerten (getakteten) Flip-Flop-Eingangssignal Q. Der Ausgang des Flip-Flops weist kurzzeitig Glitches auf.

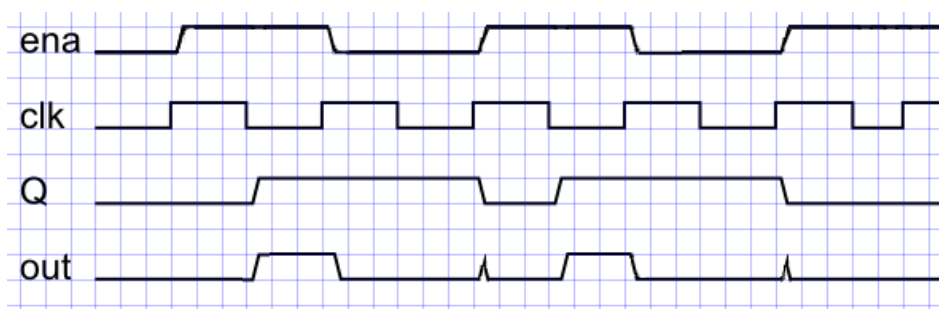


Abbildung 2.2.: Asynchrone Eingangssignale führen zu Glitches



## 2.3. Glitches durch Pfadverzögerung

### Konzept

Ein asynchroner Zähler erhält verzögerte Bitwerte. Zählt man binär auf 15, so kann sich beim Übergang von der Zahl 11 zu 12, die falsche Zahl 15, ergeben, sofern die zwei höheren Bits der Zahl 11 verzögert ankommen (siehe Abbildung 2.3).

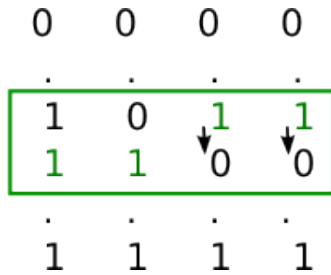


Abbildung 2.3.: Binärwerte des asynchronen Zählers

Die Verzögerung der zwei Bits, wird über Routing umgesetzt.

### Implementation

Die Hardware ist das altera board De2 mit dem FPGA Cyclone II. Kompiliert wird das Projekt mit Quartus 13.0sp, der ältesten Quartus-Version, die den Cyclone II unterstützt.

Die *Pfadverlängerung* wird über das Routing über die GPIO-Pins des Headers 1 gemacht (siehe Abbildung 2.6). Dekodiert die asynchrone Logik die Zahl 15, wird das Reset-Signal an den Zähler gesendet und der Zähler beginnt wieder von 0 an zu zählen. Produziert der Dekoder zur falschen Zeit einen Reset, so ist dies eine Fehlkodierung: ein *glitch*.

Das RTL-Diagramm des asynchronen Zählers sieht wie folgt aus:

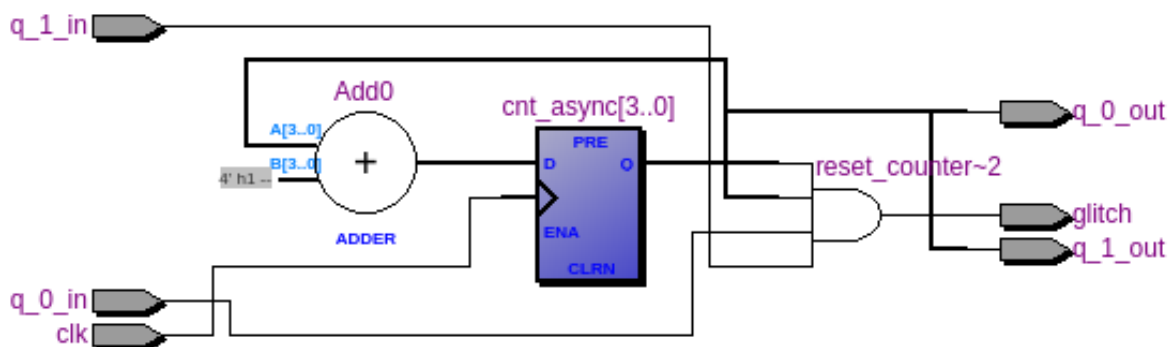


Abbildung 2.4.: Asynchroner Zähler mit Routing erzeugt Glitch

Um die Lösung gegen *glitches* aufzuzeigen, wird dem asynchronen Zähler zur Synchronisation ein Flip-Flop nachgeschaltet. Dadurch werden die asynchronen Zustände übersehen.

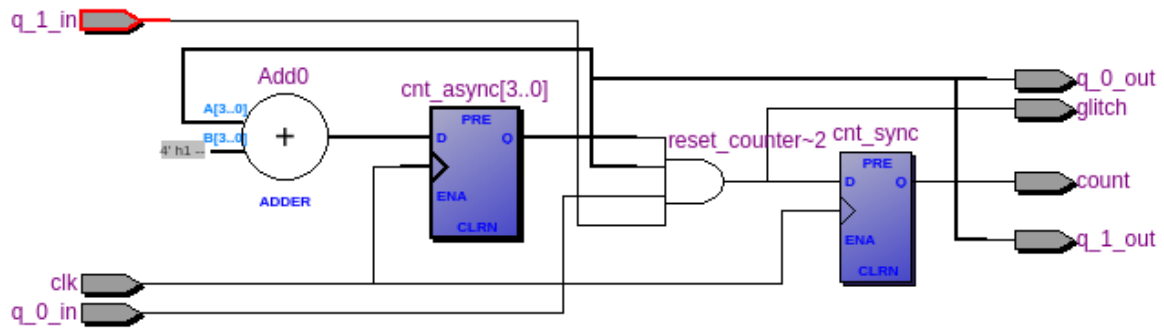


Abbildung 2.5.: Glitch-Zähler und synchroner Zähler dazu

Die Reset-Signale des asynchronen Zählers wie die des synchronisierten Zählers werden an die GPIO Headers ausgegeben, ebenso der Systemtakt. In der Abbildung 2.6) wird das Signal des asynchronen Zählers als Glitch und das Signal des synchronisierten Zählers als Count benannt. In der GPIO-Pinbelegung sieht man auch die Nutzung der zwei oberen Pin-Reihen für das Routing (benannt mit Routing OUT, IN). Der Systemtakt wird als CLK ausgegeben.

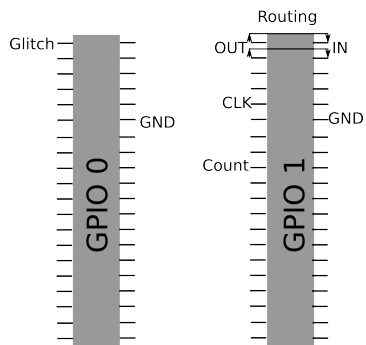


Abbildung 2.6.: GPIO Anschlüsse

## 2.4. Resultat

Der Reset des asynchronen Zählers (CH 1), der synchronisierte Reset (CH 2) und der Systemtakt (CH 3) werden am KO ausgegeben. Durch die Synchronisation wird der Wert um 1 Periode (= 20 ns) verzögert.

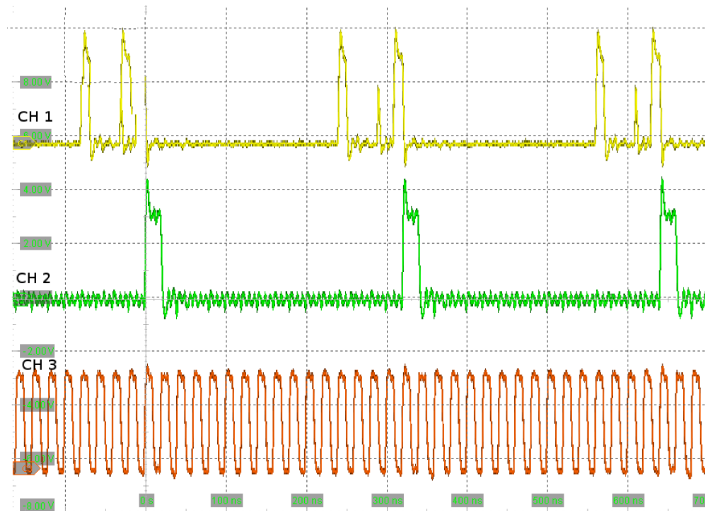


Abbildung 2.7.: Glitch (gelb), Zähler (grün) und Takt (orange)

Das *glitch* trifft in der im Übergang von der 11 zur 12 Periode (= 240 ns) regelmässig auf. Dies ist das zu erwartende Ergebnis. Ein kurzzeitiges asynchrones Verhalten findet sich auch im Übergang von der 13 zur 14 Periode. Dies ist wenn der binäre Wert 1101 auf 1101 wechselt. Da die zwei niederwertigen Bits verzögert sind, ist das dekodierte des Wertes 1111 plausibel.

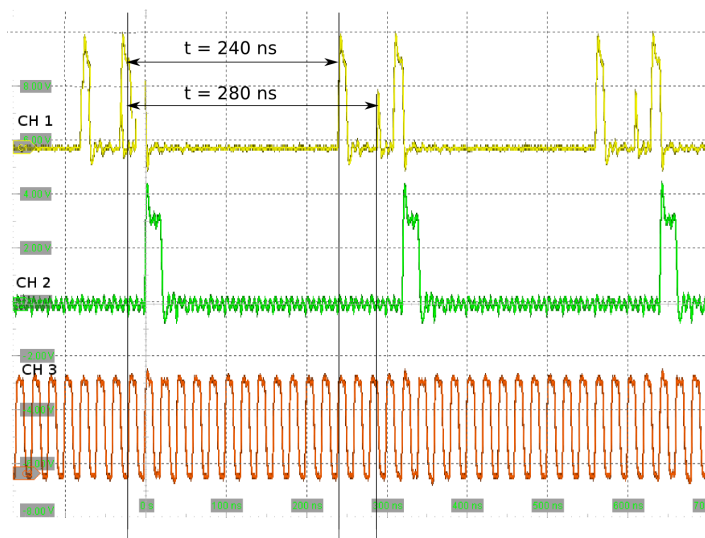


Abbildung 2.8.: Zeitanalyse Glitches

## 3. Metastabilität

### 3.1. Metastabiler Zustand

Metastabilität bedeutet, dass der Ausgang eines Flip-Flops nicht dem Eingang entsprechen *muss*. In einem metastabilen Zustand kann ein Ausgang korrekt sein, muss aber nicht. Im Idealfall wählt ein Flip-Flop seinen Ausgangswert selbst (siehe Abbildung ?? oberes Signal). Im schlechten Fall “hängt” sich das Flip-Flop “auf” und toggelt permanent zwischen ‘0’ und ‘1’ (Abbildung ?? unteres Signal).

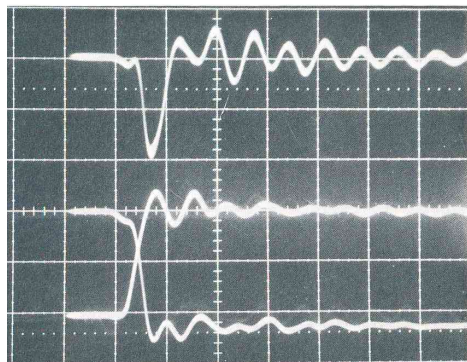


Abbildung 3.1.: Metastabilität schlimmster Fall [7]

### 3.2. Ursache von Metastabilität

Die Ursache unsicherer Ausgangswerte liegen darin, dass das Inputsignal eines Flip-Flops zur falschen Zeit wechselt.

”If data inputs to a flip-flop are changing at the instant of the clock pulse, a problem known as *metastability* may occur. In the metastable case, the flip-flop does not settle in to a stable state” [5]

”If the amplitude of the runt pulse is *exactly the threshold level of the SET input of the output cell*, the cell will be driven to its metastable state. The metastable state is the condition that is roughly defined as “half SET and half RESET” [7]

Trifft der anzulegende Wert zu spät ein wird die *setup time*) verletzt und wird der Signalwert zu früh entwendet, verletzt die *hold time*). Metastabilität kann vermieden werden, wenn diese zwei Zeiten strikt eingehalten werden:

”Metastabilit is avoided by holding the information stable before and after the clock pulse for a set period of time, called the setup time for the data line an the hold time for the control line.” [5]

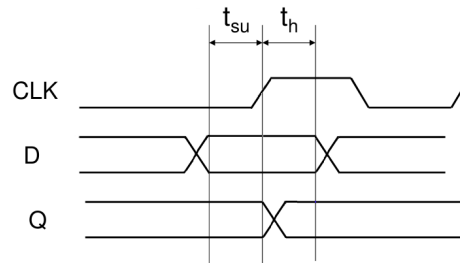


Abbildung 3.2.: Einhalten der Datenzeiten

Um Metastabilität zu vermeiden, sollte die Logik möglichst klein, die Bauteile beieinander und der Systemtakt an die längste Pfadzeit angepasst werden. Der maximal erlaubte Systemtakt kann in quartus mit dem Timequest Time Analyser abgefragt werden.

### 3.3. Metastabilität erzeugen

#### 3.3.1. Konzept

Aufgebaut wird ein System mit zwei *clock domains*. Eine *clock domain*, Gebiet 1, beinhaltet einen Zähler, der an das Gebiet 2 asynchrone Impulse sendet. Gebiet 2 verarbeitet diese Impulse in einer *finite state machine*. Bei korrekter Funktionsweise wechselt die *fsm* zwischen den definierten *states*. Funktioniert sie falsch, fällt die *fsm* in einen *state*, den sie nicht implementiert hat.

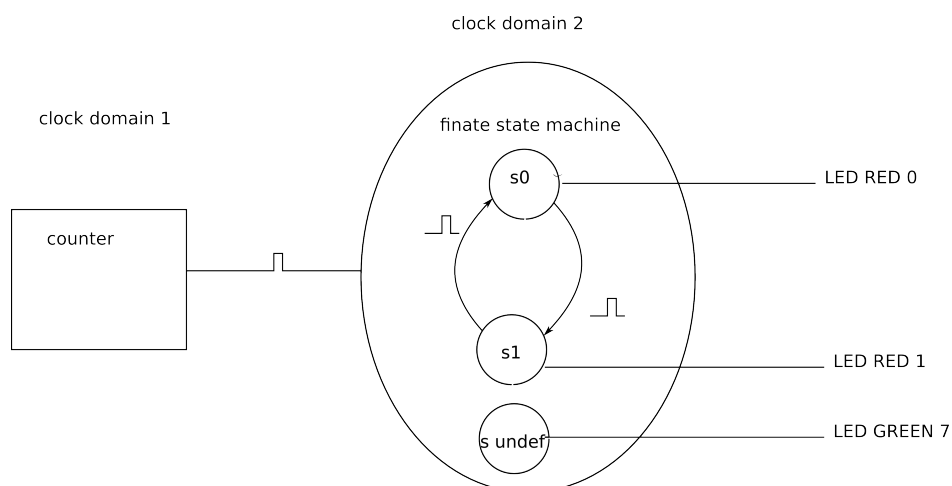


Abbildung 3.3.: Konzept Metastabilität nachweisen

### 3.3.2. Umsetzung

Als Hardware wird das altera development board De2 genommen und mit der Software quartus 13osp0 gearbeitet. Die die zwei Takte nicht Vielfache voneinander sein dürfen, wurde für den Zähler ein Takt von 27 MHz und für die *fsm* ein Takt von 50 MHz. Der Takt des Zählers ist leicht schneller als die Hälfte der *fsm* und schiebt sich vorwärts (siehe Abbildung 3.4). Das Verletzen der *setup time* ist eine Frage der Zeit.

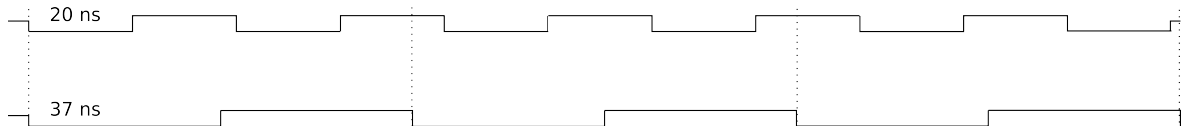


Abbildung 3.4.: Die zwei Taktzeiten

Die Zustandsüberprüfung erfolgt über das Ausgeben des aktuellen Zustands auf den zwei roten LEDs.

- Zustand = s0  
Rote LED 0 ist an
- Zustand = s1  
Rote LED 1 ist an
- Zustand = *OTHERS*  
Grüne LED 17 ist an

Funktioniert die *fsm*, blinken die zwei roten LEDs abwechselungsweise. Fällt die *fsm* in einen undefinierten Zustand, leuchtet die grüne LED. Um die Ursache der Metastabilität, das Verletzen der *setup time* zu verhindern, wird eine optionale Synchronisation durch Switch 17 eingebaut. Ist Switch 17 auf '1', wird der Puls der *clock domain* 27 MHz durch ein Flip-Flop auf 50 MHz synchronisiert.

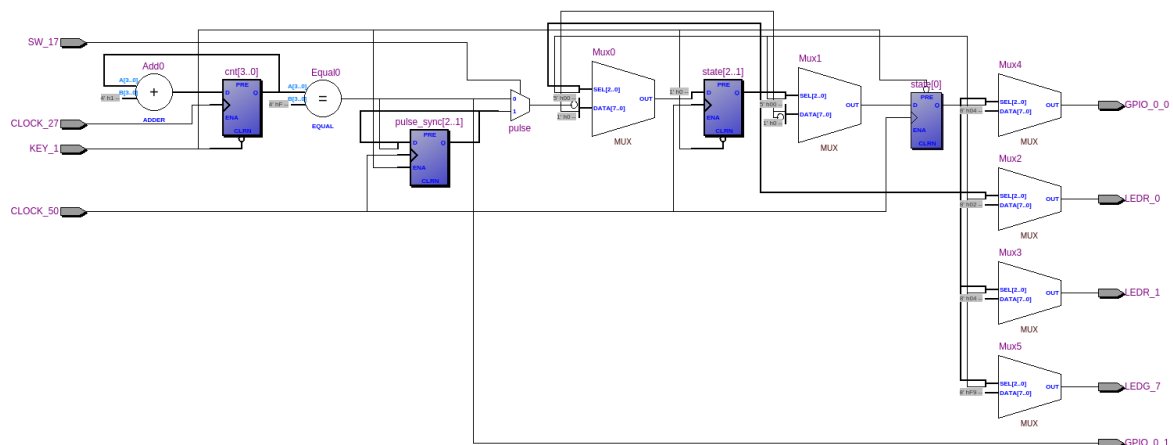


Abbildung 3.5.: RTL mit Synchronisations-Switch

### 3.4. Resultat Metastabilität provozieren

Das Resultat ist, dass das Board unmittelbar nach Einstellen in den metastabilen Zustand fällt und die grüne LED leuchtet. Wird Reset gedrückt, folgt ein kurzes Aufblinken der zwei roten LEDs und wieder die grüne LED.

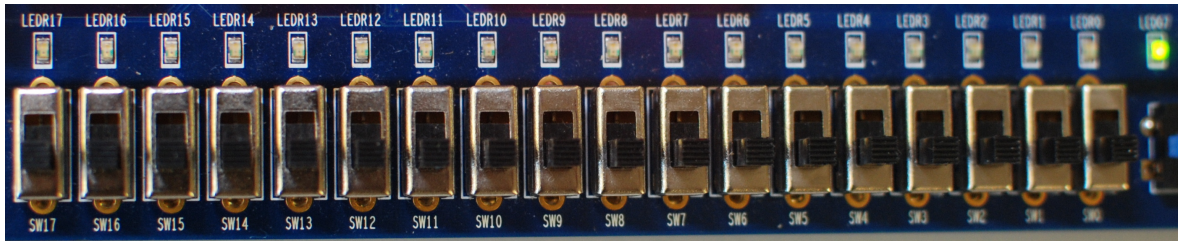


Abbildung 3.6.: Metastabiler Zustand

Wird die Synchronisations-Schaltung betätigt, leuchten beide roten LEDs auf. Die *fsm* wechselt zwischen den states *s0* und *s1* hin und her. Das Verbleiben in den zwei definierten Zuständen *s0* und *s1* funktioniert auch nach einem Tag noch.

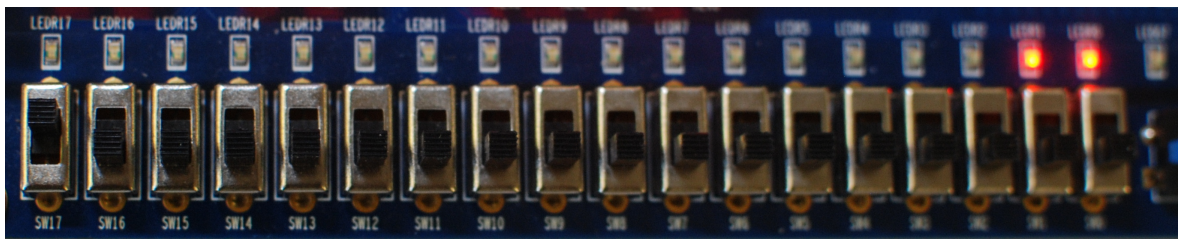


Abbildung 3.7.: Switchschalter ON: Rote LEDs leuchten

Wird das Wechseln zwischen den zwei states am KO ausgegeben, so erkennt man, da - weil der Takt 27 MHz kein Bruchteil von 50 Mhz - kein wiederkehrendes Muster der Wechsel zwischen den zwei Zuständen auftritt.

CH 1 = Rote LED CH 2 = Synchronisierter Puls

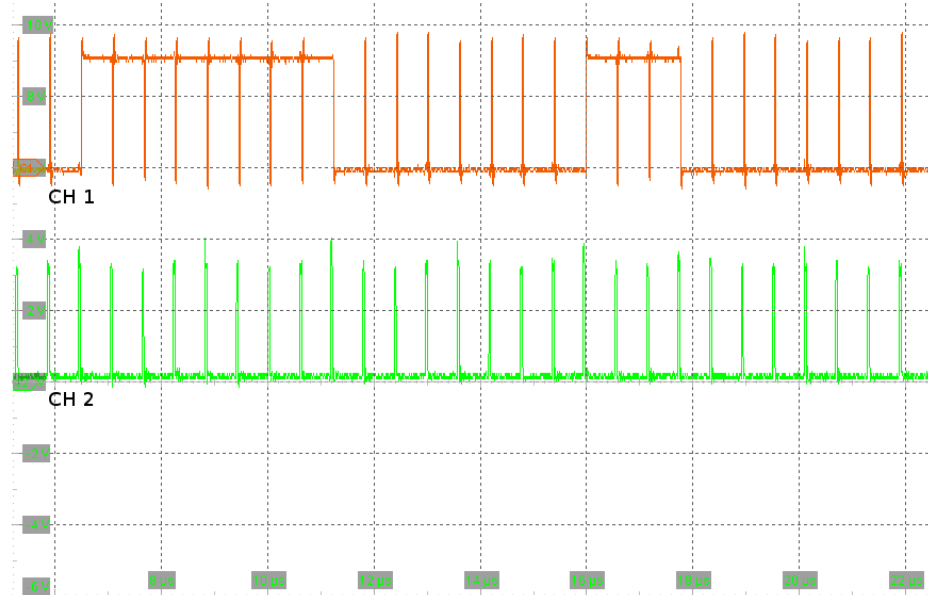


Abbildung 3.8.: Unregelmässiger Wechsel zwischen Zustand s0 und Zustand s1

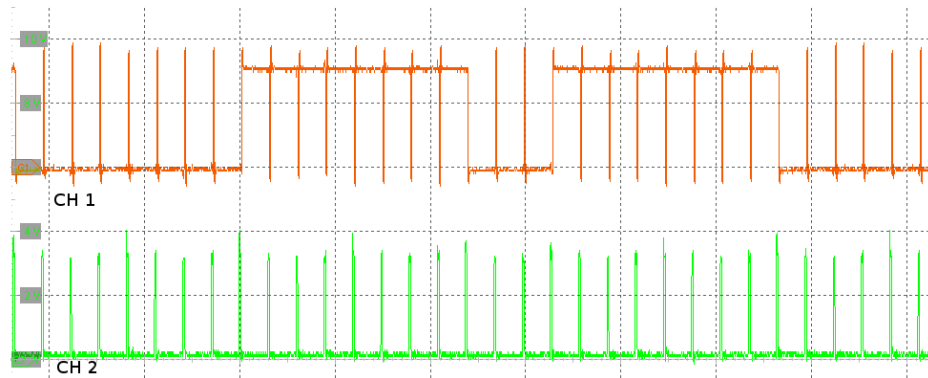


Abbildung 3.9.: Unregelmässiger Wechsel zwischen Zustand s0 und Zustand s1



Im Zustand der Metastabilität sind die Pulse nicht synchronisier und die rote LED geht nicht an.

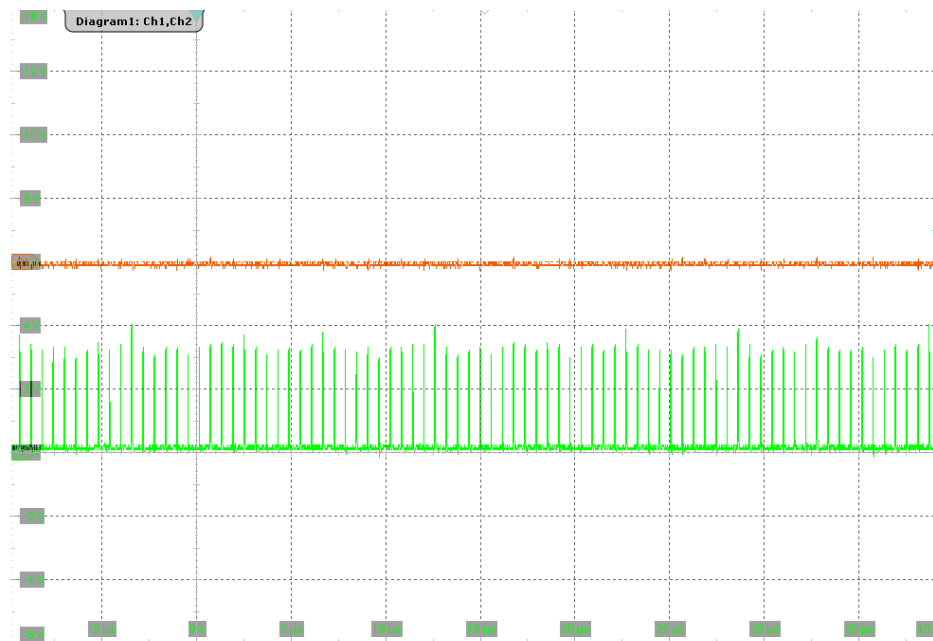


Abbildung 3.10.: Metastabiler Zustand

## 4. Testbench

*Test Driven Development* bedeutet, dass vor oder parallel zur Entwicklung einer *unit* (im Folgenden Block genannt) der *unit-test* entwickelt wird [3]. Beim textbasierten Testen stammen die Befehle aus einer Input-Datei, und die Ergebnisse werden in einer Datei abgelegt.

### 4.1. Device Under Test

Das Device Under Test (DUT) ist das midi interface. Das Ziel ist, dass das MIDI-Signal in den Block geführt wird und am Ausgang 10 Notenvektoren mit je 8 Notenbits und einem Bit, das besagt, ob die Note an oder ab ist.

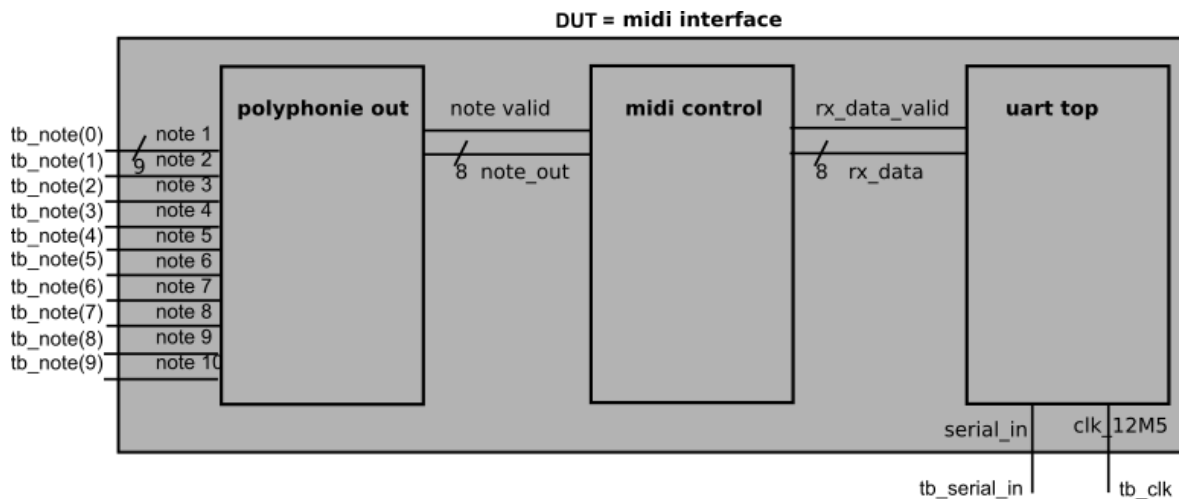


Abbildung 4.1.: Blockschaltbild Device under Test

Die *testbench* wird mit Daten der Input-Datei gespeisen. Die Endversion der Input-Datei und der Testbericht liegen im Anhang G. In den Unterkapiteln wird der Aufbau der Input-Datei, das Entwickeln der Test-Fälle, und die Umsetzung im VHDL-Code beschrieben.

### 4.2. Struktur der Input-Datei

Die Test-Datei ist zeilenweise strukturiert.

#### Verarbeitungsmodus

Jede Zeile beginnt mit dem Verarbeitungsmodus. Bei der Input-Datei besteht der Verarbeitungsmodus aus fünf Buchstaben.

```
reset  00  00  ..
singl  90  27  ..
polyp  71  55  ..
```

### Tokenstruktur

Nach dem Verarbeitungsmodus folgen die Daten. Jede Zeile hat gleichviele Datenpakete (Tokens). Die *testbench* ordnet jedem Datenpaket innerhalb der Zeile eine Bedeutung zu. Je nach Verarbeitungsmodus ist die Bedeutung der Token anders.

Die *testbench midi interface* an den zwei MIDI Datentypen, die im Unterkapitel 5.2.1 detailliert beschrieben sind. Die Tokenstruktur leitet sich aus der Datenreihenfolge im *polyphony mode* und im *single mode* ab (siehe 5.2.2). In der nachfolgenden zwei Token-Beispielen bezieht sich die obere Zeile auf den *polyphony mode* und die untere auf den *single mode*.

In der *testbench midi interface* haben Tokens folgende Bedeutung:

mode_p	Note	Velocity	Note	Velocity	Note	Velocity	Note	Velocity	Anzahl Noten
mode_s	Dummy	Status	Note	Status	Note	Status	Note	Dummy	Dummy

Dummy wird gesetzt, um die Verarbeitungsstruktur zu vereinfachen. Jeder Dummywert wird beim Einlesen verworfen.

## 4.3. Aufstellen der Fehler

Die ersten Zeilen, die ersetzt durch ausgefeiltere Datenstrukturen, hatten nur 3 Token und testeten die Grundfunktionen.

```
single mode note an/ab
singl 90 27
singl 90 27
```

```
polyphone note an/ab
polyp 71 55
polyp 71 00
```

Bei der Polyphonie ist notwendig, dass die einzelene Note unabhängig von den anderen Noten an oder ab bleibt. Die Test-Reihe wird deshalb auf 4 Noten ausgedehnt.

### 4.3.1. Einzelne Noten testen

#### Testfälle

Getestet sind auch Kombinationen unter den Fällen, die aus Übersichtlichkeit nicht alle aufgeschrieben werden.

- Einzelne Note an, Geschwindigkeits Byte folgt
- Einzelne Note an, Geschwindigkeits Byte folgt nicht
- Einzelne Note ab
- Einzelne Note an, direkt nach Reset
- Einzelne Note an, selbe Note nochmals an

- Einzelne Note an, wenn in *polyphonie mode*
- Einzelne Note an, nach ungültigem status byte
- Einzelne Note an, andere Note an, erste Note ab
- Einzelne Note an, diverse andere Noten setzen, erst bei nächster Zeile erste Note ab

Zu jedem Testfall wird auf der nächsten Zeile das zu erwartende Resultat vorgegeben. Die *testbench* prüft die ausgegebene Notenwerte am Ausgang des midi interfaces mit den vorgegebenen Werten.

#### Beispielzeile

singl	55	90	27	80	27	90	05	00	00
check	00	00	27	00	00	00	05	00	00

Die Sequenz bedeutet Note 27 an (0x90), dann ab (0x80) der Note 27 und am Schluss an Note 05.

Überprüft (check) wird, ob am Ausgang die Noten 27 und 05 anliegen.

Im *single mode* ist die Geschwindigkeit für das An- oder Abstellen der Note nicht relevant und wird deshalb nicht als Befehl eingelesen. Die *testbench* hängt nach jeder Note einen Dummy-Geschwindigkeitswert von 0x55 an.

## Polyphonie testen

### Testfälle

In der Polyphony können mehrere Noten hintereinander an- und nur einzelne davon wieder abgestellt werden.

- Polyphoniestatus setzen, einzelne Note an
- Polyphoniestatus setzen, mehrere Note an
- Polyphoniestatus setzen, mehrere Note über mehrere Zeilen verteilt an
- Polyphoniestatus setzen, Note an, die bereit in Register ist
- Polyphoniestatus setzen, Note an, andere Note an, erste Note aus, dritte Note an
- Polyphoniestatus setzen, dritte Note aus, erste Note an, erste Note an
- Polyphoniestatus setzen, singel Note an status setzen, Note ohne Geschwindigkeit senden
- Polyphoniestatus setzen, falsches Statusbyte senden, Note an, Note aus,
- Polyphoniestatus setzen, Reset, Note setzen
- Polyphoniestatus setzen, 10 Noten an
- Polyphoniestatus setzen, 10 Noten in Register, eine ist aus. Neue Note an senden

#### Beispielzeile

polyp	71	55	02	55	33	55	08	00	00
check	71	00	02	00	33	00	00	00	03

In der Sequenz wird die Note 71, dann die Noten 02 und 33. Danach wird die Note 08 abgestellt. Die *testbench* prüft am Ausgang, ob die Noten 71, 02 und 33 an sind.

Im Verarbeitungsmodus Polyphonie sendet die *testbench* das *status byte* "10100000" (0xA0)

## 4.4. Code Testbench

Die automatisierte Datenverarbeitung erzeugt viele Werte (10 Noten mit je 9 Werten). Um einzelne Bits effizient zu setzen oder zu überprüfen, wird der Code einem *refactoring* unterzogen.

Im Gegensatz zum hardwarenahen Code der VHDL-Blocks, bei denen arrays und loop explizit vermieden wurden, baute die *testbench* bewusst auf softwarenahe Strukturen auf.

### 4.4.1. Erstellen eines Package

- Werte der *status bytes* als Konstanten
- Ein- und Ausgänge als arrays
- Tokenstruktur als record

Bsp. Tokenstruktur

```

-- define midi_data
type t_midi_data is record
    token_note : std_logic_vector(7 downto 0);
    token_attribut : std_logic_vector(7 downto 0);
end record;

type t_midi_data_array is array (0 to 3) of t_midi_data;

-- define token structure
type t_token_line is record
    token_cmd : string(1 to 5);
    t_midi_data : t_midi_data_array;
    token_number : std_logic_vector(7 downto 0);
end record;

-- array with note structure (input/output)
type t_note_array is array (0 to 9) of std_logic_vector(8 downto 0);

```

### 4.4.2. Prozessoptimierung

Um die einzelnen Bits in den arrays zu setzen, braucht es in der Ablaufstruktur Optimierungen.

- loops iterieren durch die arrays
- Einleseprozess wird vom Verarbeitungsprozess getrennt
- Flags wie `s_read_input_finished` `:= '1'` sichern das parallele Datenverarbeiten

## 4.5. Ergebnisse Simulation

Die Ausgabe der Signale in die Output-Datei bezieht sich auf den Zustand am Ausgang des DUT. Damit auch die beiden internen Blöcke midi control und polyphonie out korrekt funktionieren werden die Signale überprüft. Auch das Verhalten in den Blöcken entspricht den erwarteten Signalverläufen.

### 4.5.1. Block Midi Control

Gemäss der *fsm* durchläuft der *single mode* die Zustände *idle*, *note\_s*, *velocity\_s* und geht dann zurück in den *idle*-Zustand. Das Signal *s\_note\_on* wechselt nach einem *status byte* von (0x90) auf on und nach (0x80) auf ab.

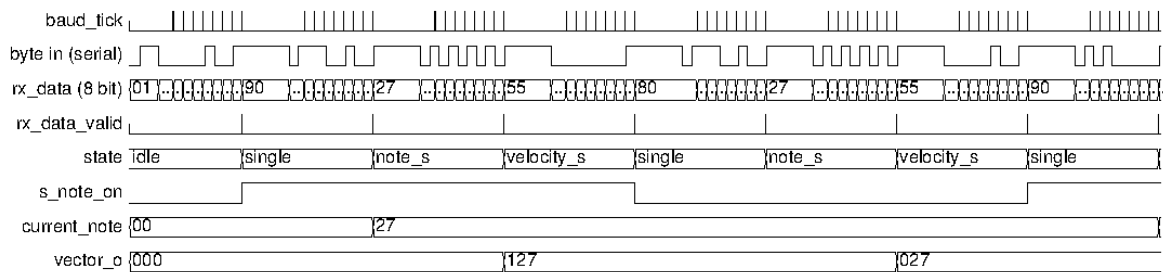


Abbildung 4.2.: Simulation Block Midi Control

Im *polyphony mode* existieren die Zustände *idle*, *note\_v*, *velocity\_v* und verbleibt in diesem Zustand. Nur durch ein *status byte* (oder ungültige *data bytes*) wird der Zustand der Polyphonie verlassen.

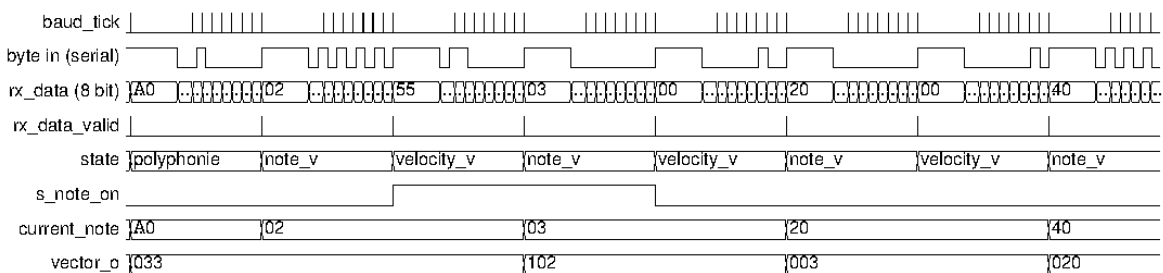


Abbildung 4.3.: Simulation Block Midi Control

### 4.5.2. Block Polyphonie Out

Kriterien in der Polyphonie out sind, dass jede neue Note auf den nächst freien Register-Platz gelegt wird. Zudem soll keine Note zwei Registerplätze belegen. Zudem soll, wenn alle Register-Plätze einen Notenwert haben, die neue Note an einen Registerplatz mit aktuell abgeschaltener Note besetzen. Alle Kriterien sind erfüllt.

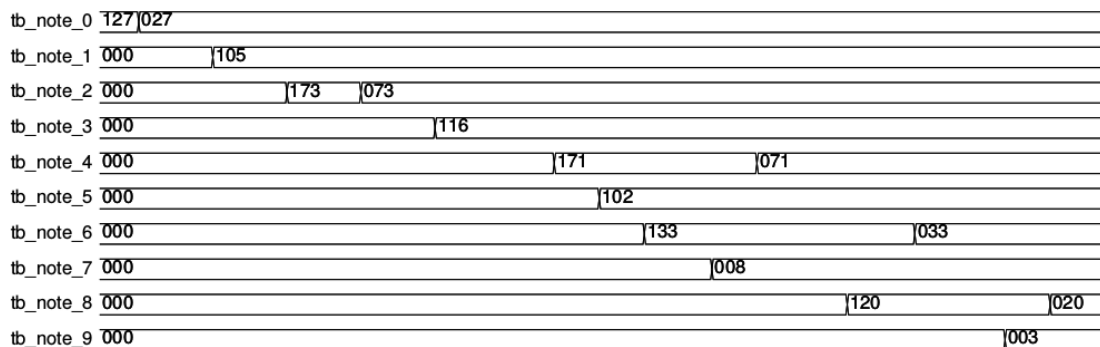


Abbildung 4.4.: Simulation Block Polyphonie Out

## 5. MIDI Steuerung

### 5.1. Einteilen der Blöcke und definieren der Schnittstellen

Als erstes die Zusammenfassung der internen Blöcke. Die zwei entwickelten Blöcke **midi control** und **polyphonie out** sind grau markiert (siehe Abbildung 5.1 ). Gegeben ist der Block **uart top**.

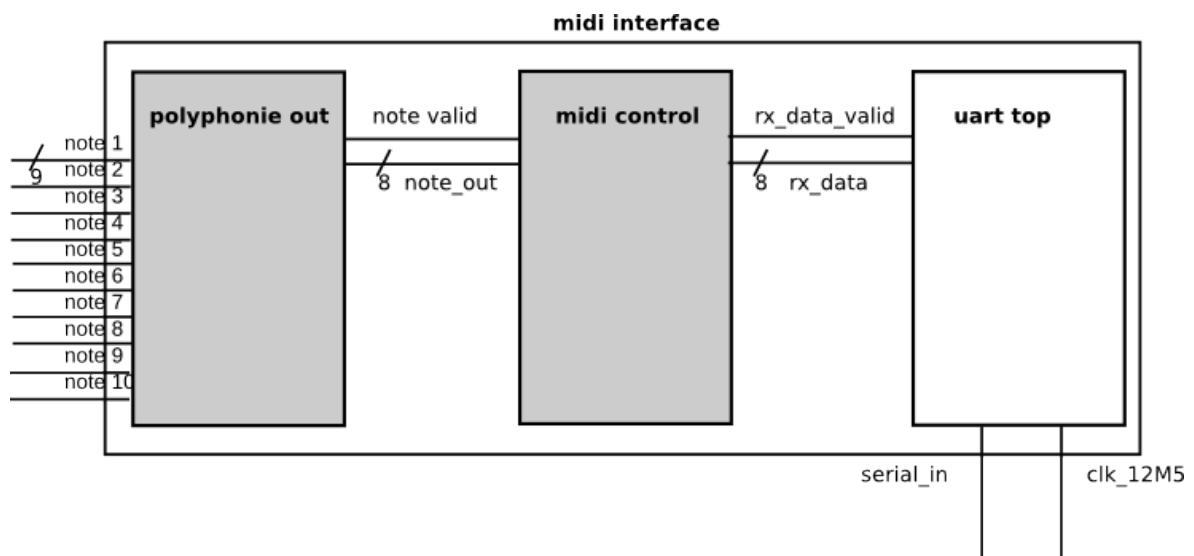


Abbildung 5.1.: Blockschaltbild MIDI Interface

Die Abbildung F.1 (im Anhang F) zeigt, wie das zu entwickelnde MIDI Interface in die bestehenden Blöcke des Synthesizer-Projektes eingebaut wird. Die im Anhang direkt anschliessende Abbildung F.2 zeigt dann die geplante Umsetzung detaillierter.

Als nächstes wird die MIDI 1.0 Spezifikation, erklärt, nach der Block *midi control* aufgebaut ist. Die Umsetzung des *polyphone out*-Blocks bildet den Abschluss dieses Kapitels.

## 5.2. Das MIDI Kommunikationsprotokoll

Werden MIDI Daten übermittelt, so unterscheidet der Standard zwei Typen an Daten ??.

### 5.2.1. MIDI Daten Typen

#### Status Bytes

*Status bytes* sind 8 Bit lang und das MSB ist immer logisch '1'. Die *status bytes* dienen dem Identifizieren der nachfolgenden *data bytes*. Das *status byte* sagt, von welcher Art und mit welcher Datenstruktur die folgenden *data bytes* sein werden.

MIDI behält einen Status so lange, bis ein neues *status byte* folgt. Dieses Verhalten wird als *running status* bezeichnet. Dieses Verhalten ist vor allem für die Polyphonie interessant, da dieser Zustand bleibt und viele *Data Bytes* (im Sinn von Noten) folgen können, ohne dass es eines neuen status bytes bedarf.

#### Data Bytes

Gemäss Spezifikation folgen einem *status byte* exakt ein oder zwei Bytes. Das MSB ist immer logisch '0'. Die Werte können von 0x00 bis 0x7F sein. Das bedeutet, dass MIDI maximal 128 Noten unterscheiden kann.

*Data bytes* können unterschiedliche Informationen erhalten. Im Kontroller sind Notenwerte, Geschwindigkeit des Anschlages relevant

Je nachdem welches *status byte* im Voraus gesetzt wurde, werden die Attribute anders interpretiert. Ist z.B. Polyphonie gesetzt, so bedeutet ein *data byte* mit einer Geschwindigkeit von 0, Note abstellen. Diese und andere Spezifikationen werden detailliert in **Detaillierte Spezifikation** beschrieben.

"Empfänger sollen so konzipiert sein, dass zuerst alle *data bytes* empfangen werden und ein neues *status byte* kommt. Danach werden ungültige Daten verworfen. Einzige Ausnahme ist der *running status*. Bei dem nicht bis zum Ende gewartet wird."??.

#### Ungültige Bytes

"Alle *status bytes*, die nicht implementierte Funktionen enthalten und alle ihnen folgenden *Data Bytes* sollen vom Empfänger verworfen werden."??.

MIDI Geräte sollen ausdrücklich beim Ein- und Abstellen darauf bedacht sein, dass keine undefinierten Bytes gesendet werden??.

Diese Anforderung ist wichtig beim Implementieren der *finite state machine* und der *testbench* (siehe 4.3.1)



### 5.2.2. Zwei MIDI Note Modes

#### single mode

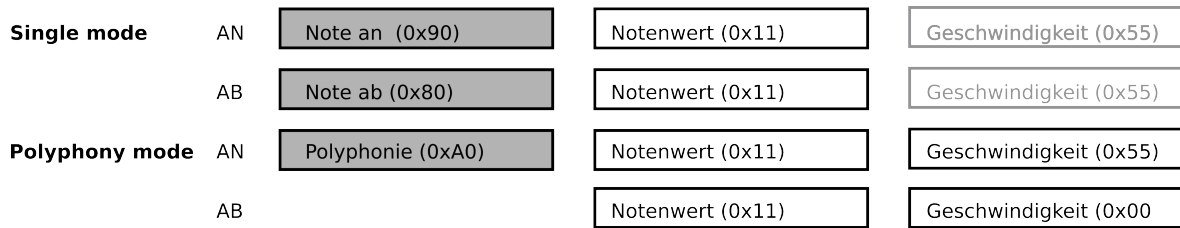


Abbildung 5.2.: Blockschaltbild Device under Test

Im Fall der einzelnen Note passt die Tokenstruktur, die sich am schwierigsten Fall, der Polyphonie orientierte, nicht ganz. Im Gegensatz zur Polyphonie muss bei der einzelnen Note VOR dem Notenwert ein status byte kommen. Damit dies in der Tokenstruktur umsetzbar ist, wird zuerst ein Dummy-Wert (55) zum Verwerfen der *testbench* übergeben. Erst dann folgt das *status byte* und dann, analog zur Polyphony-Struktur folgt die erste Note. Im Nachhinein erscheint mir dieser Aufbau als zu kompliziert und ich würde ein nächstes Mal mehr mode-spezifisch die Datenauswertung gestalten.

#### polyphony mode

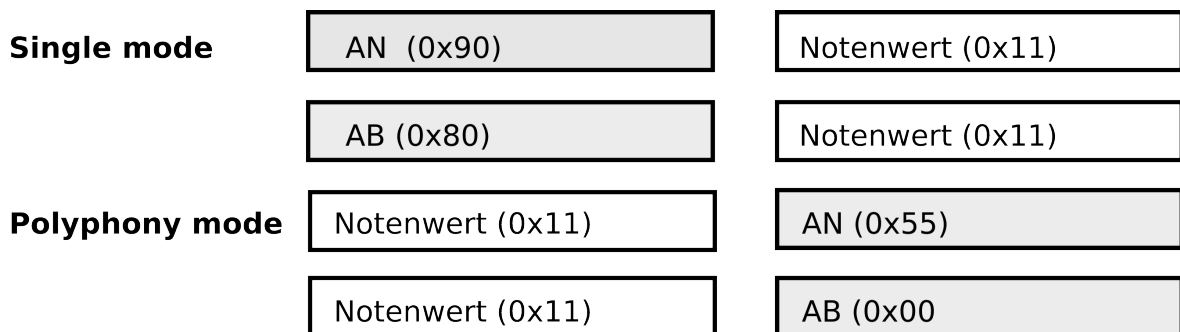


Abbildung 5.3.: Blockschaltbild Device under Test

Danach werden die Token gemäss der Polyphonie-Spezifikation interpretiert: Die *data bytes* wechseln sich ständig mit dem Notenwert und der dazugehörenden Geschwindigkeit ab. Hier in der Testdatei hält die erste Note den Wert 71 und wird gefolgt von irgendeiner Geschwindigkeit (hier Dummy-Wert 55), usw.. Kommt ein Geschwindigkeitswert von 0, so bedeutet dies, dass die Note abgestellt wird. Danach werden die Token gemäss der Polyphonie-Spezifikation interpretiert: Die *data bytes* wechseln sich ständig mit dem Notenwert und der dazugehörenden Geschwindigkeit ab.

## 5.3. Umsetzung "midi controlBlock

Ausgehend von der Spezifikation sind drei Eckpunkte für die *finite state machine* zu berücksichtigen:

1. Unterscheiden von *status byte* und *data byte*
2. Unterschiedliche Interpretation der *data bytes* abhängig vom *status byte*.

### 3. Verwerfen aller falschen *status byte* oder *data bytes*

Zu beachten in der Verarbeitung der Daten ist, dass im *single mode* zuerst gesagt wird, ob eine Note an oder ab und diese Reihenfolge im *polyphony mode* gerade umgekehrt ist: zuerst kommt die Note, dann die Angabe, ob sie an oder ab ist.

Aus diesen Anforderungen ergab sich folgende *finite state machine*:

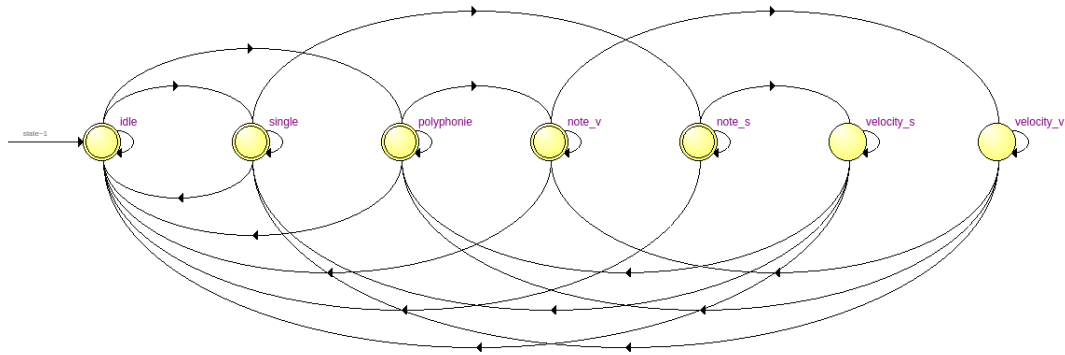


Abbildung 5.4.: fsm Übergänge

Alle drei Anforderungen sind implementiert:

Vor jedem *data byte* muss zuerst ein *status byte* eingegangen sein. Die *finite state machine* fragt im *idle* Zustand nur nach den *status bytes*. So weisen die oberen Nibbel mit den Werten "1001" für NOTE AN und "1000" für NOTE AUS auf den *single mode* hin und der Wert "1010" auf den *polyphony mode*. Nach diesen *status bytes* erwartet die *finite state machine* *data bytes*.

Die unterschiedliche Reihenfolge von Noten-Byte und Angaben zu an oder ab, wurde statusabhängig umgesetzt:

Im *single mode* wird das vierte Bit des *status nibbel* zum Setzen von AN und AB verwendet. Im *polyphony mode* wird das zweite *data byte*, das üblicherweise die Geschwindigkeit der Note bestimmt, für das Setzen von AN und AUS genommen. Ist der Wert der Geschwindigkeit gleich NULL, dann soll in diesem Zustand die Note als AUS gelten.

Gut sichtbar ist, dass die *finite state machine* bei ungültigen *bytes*, die Daten verwirft und in den *idle* Zustand zurückgeht.

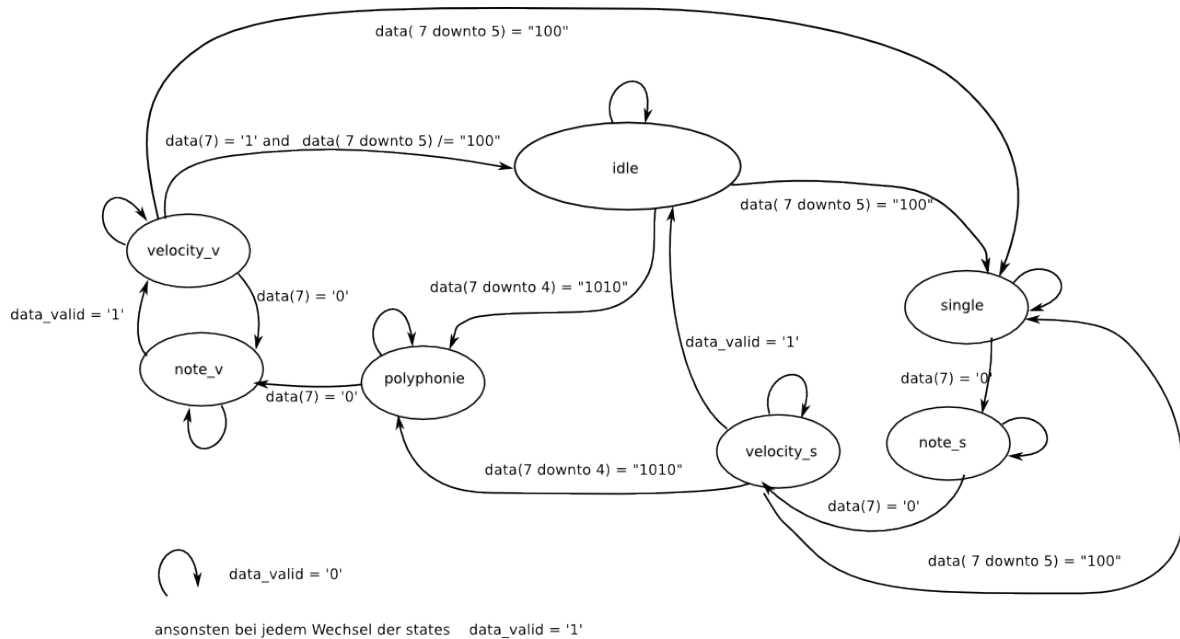


Abbildung 5.5.: fsm Übergangsbedingungen

Die Umsetzung der *fsm* sieht man in der Simulation in den zweit unteren Abbildungen gut. Nach dem Zustand *idle* folgt das *status byte* "single" (Abbildung 5.6) oder "polyphonie" (Abbildung 5.7)

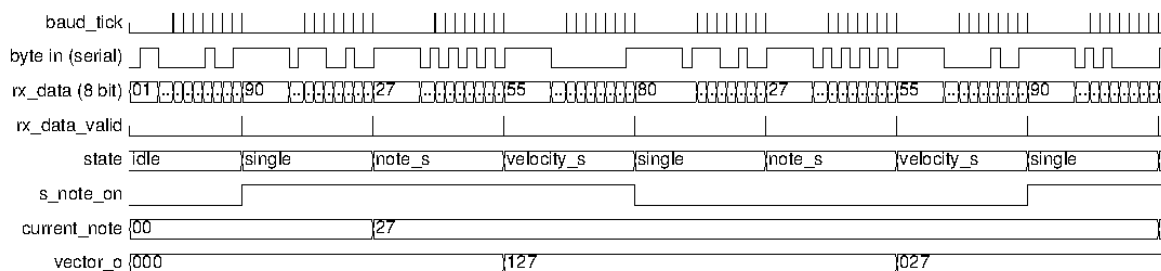


Abbildung 5.6.: fsm für single mode

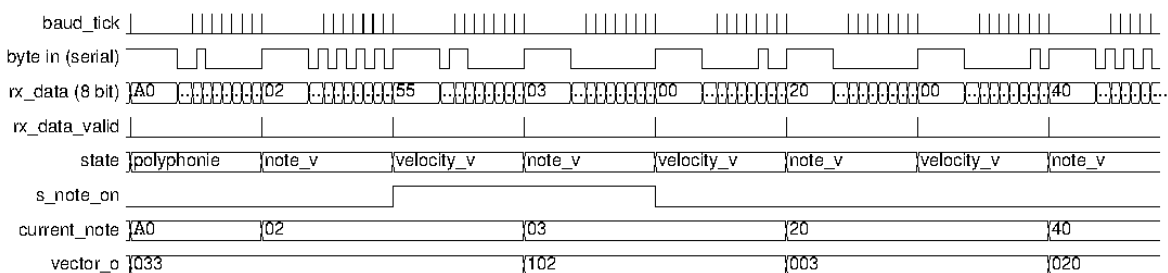


Abbildung 5.7.: fsm im polyphony mode

Die Simulation wurde mit möglichen Fehlübertragungen angereichert, damit man sieht, ob der *midi control* weiter korrekt funktioniert. Eine detaillierte Beschreibung zum Aufbau der Simulation befindet sich im Kapitel **testbench**.

## **5.4. Umsetzung "polyphonie outBlock**

## 6. Diskussion und Ausblick

Bespricht die erzielten Ergebnisse bezüglich ihrer ERwartbarkeit, Aussagekraft und Relevanz  
Interpretation und Validierung der Resultate  
Rückblick auf Aufgabenstellung: erreicht nicht erreicht

Legt dar, wie die Resultate weiterhin genutzt werden können  
an sie angeschlossen werden kann

Als offener Punkt besteht die Implementation des *midi interfaces* in das bestehende Synthesizer-Projekt. Die Schnittstellen sind im Anhang festgehalten und die notewnigen Implementationsschritte, wie das Ausweiten des bestehenden DDS auf 10 DDS sind im Projekt als Blöcke eingebaut. Aus zeitlichen Gründen konnte dieser letzte Schritt nicht mehr während der Projektarbeit zu Ende gebracht werden.

## 7. Verzeichnis

### 7.1. Literatur

- [1] Altera. *Cyclone IV Device Handbook*, pages 8–19. San Jose, 2014.
- [2] The MIDI Manufacturers Association. *MIDI 1.0 Detailed Specification*. Los Angeles, 1995.
- [3] Kent Beck. *Test-Driven Development, By Example*, page ix. Addison Wesley Signature, 2013.
- [4] Christian Braut. *Das MIDI-Buch*, page 10. Sybex, 1993.
- [5] John A. Camara. *Engineering Reference Manual*, pages 32–2. Belmont, 2010. About metastability.
- [6] William I. Fletcher. *An Engineering Approach to Digital Design*, page 472. Utah State University, 1980. About glitch.
- [7] William I. Fletcher. *An Engineering Approach to Digital Design*, page 482. Utah State University, 1980. About metastability.
- [8] Sandeep Mandarapu. *Measuring Metastability, Master Project*. Departement of Electrical and Computer Engineering, Southern Illinois University, 2012.
- [9] Dictionary of the English Language. *finite state machine*. American Heritage, 2011.
- [10] Cambridge Dictionaries Online. *glitch, specialized electronics*. 02.11.2015.

### 7.2. Glossar

Das Glossar dient interessierten Software-Entwicklern, die elektrotechnik-spezifischen Worte zu verstehen.

#### **Asynchrone Signale**

Werden Signale in zugewiesen sind sie vorerst ungetaktet, asynchron. Es ist nicht definiert, *wann* exakt das Signal den neuen Wert erhält. Erst wenn ein Signal durch ein Flip-Flop geführt wird, wird es getaktet und seine Signalzuweisung dadurch determinierbar.

#### **Clock Domain**

Ein Bereich der Hardware, der mit demselben Takt läuft.

#### **Controller**

Bezeichnet ein Bauteil, das Eingangssignale gemäss einer Spezifikation verarbeitet und die entsprechenden Ausgangssignale setzt.

#### **Dekoder**

Bezeichnet ein Bauteil, das einen oder mehrere Eingangswert(e) gemäss implementierter Logik in einen Ausgangswert wandelt.

#### **Durchlaufverzögerung**

Wird englisch *propagation delay* genannt und bezeichnet die Zeit, die Daten vom Eingang bis zum Ausgang des Bauteils brauchen.

Die Durchlaufverzögerung beträgt beim Cyclone IV 4 ns [1].

**Finate State Machine (fsm)**

"A model of a computational system, consisting of a set of states, a set of possible inputs, and a rule to map each state to another state, or to itself, for any of the possible inputs." [9]

Auf deutsch "Ein Model in Rechensystemen, das aus einem Satz aus Zuständen, möglichen Eingängen und Regeln wie man von einem Zustand zum nächsten, oder zu sich selbst, für alle möglichen Eingänge gelangt. "

**Flip-Flops**

Grundbaustein der Digitalen Logik. Das Flip-Flop speichert seinen Wert, den es am Eingang erhält am Ausgang.

**Glitch**

Im technischen Bereich bedeutet *glitch* gemäss Cambridge Dictionaire "a sudden unexpected increase in electrical power, especially one that causes a fault in an electronic system " [10],

auf deutsch "eine plötzliche, unerwartete Spannungserhöhung, die insbesondere ein Fehlverhalten im elektronischen System verursacht".

**Hold Time**

Ist die minimale Zeit, in der die Inputdaten *nach* der Taktflanke stabil sein müssen.

Die hold-Zeit beträgt beim Cyclone IV E 0 ns [1].

**Hot Plug**

Bezieht sich auf die Hardware-Umsetzung einer *finate state machine*. Gewöhnlich braucht es für  $2^n$  Zustände n Flip-Flops. Bei Hot Plug braucht es für n Zustände n Flip-Flops, denn jeder neue Zustand wird durch eine '1' am n-ten Flip-Flop detektiert. Alle anderen Flip-Flop-Werte sind auf '0'. Die logische Schaltung für eine *Hot Plug fsm* wird durch den direkten Bezug einer gesetzten '1' zum Zustand einfach.

**Kathodenstrahl Oszilloskop, KO**

Bezeichnet ein elektronisches Messgerät, das ein Signale analog als Spannungen mit deren zeitlichem Verlauf am Bildschirm ausgibt.

**Metastabilität**

Bezeichnet in der digitalen Signalverarbeitung einen unsicheren Zustand. Der Wert des Ausgangssignals ist nicht vorhersehbar, da beim Eingangssignal die Daten zu spät ankommen oder zu früh weggenommen werden.

**Others**

Bezeichnet in einem Swicht-Case in VHDL alle anderen Möglichkeiten, die nicht abgefragt werden. Es dient dem System einen definierten Zustand zu geben, falls etwas Unerwartetes eintrifft.

**Pfadzeit**

Bezeichnet die Zeit, die ein Signal von einem Flip-Flop zum nächsten braucht.

**Refactoring**

Bezeichnet das Überarbeiten eines funktionierenden Codes. Ziele sind, den Code effizienter, verständlicher und sicherer zu gestalten.

**Setup Time**

Minimale Zeit, in der Inputdaten stabil sein müssen *bevor* ein Taktflanke die Daten triggert. Die setup-Zeit beträgt beim Cyclone IV E 10 ns [1]

**State**

Bezeichnet den aktuellen Zustand einer finale state machine.

**Textbasierte Testbench** In VHDL wird die Simulation der Signale in einer Testbench aufgesetzt. In der Testbench werden die Signalanregungen, stimuli, definiert, und die zeitlichen Abläufe unter Signalen. Für eine Testbench ist eine eigene Software notwendig. Eine textbasierte Testbench liest die stimuli aus einem File ein. Zudem können im File die zu erwartenden Ergebnisse definiert sein.

**Token**

Bezeichnen Elemente in einer Reihe von strukturierten Daten.

**Quartus**

IDE von altera zum Kompilieren, Synthesizieren und einbauen von IPs für die altera FPGAs.



# A. Offizielle Aufgabenstellung

## Beschreibung der Projektarbeit Pa15\_gelk\_1

In dieser Projektarbeit sollen Versuche entwickelt werden, die für das Modul DTP2 verwendet werden können. Die Arbeit besteht aus zwei Teilen:

Im ersten Teil der Arbeit sollen Versuche entwickelt werden, mit denen folgende Timing Artefakte demonstriert werden können. Dies soll zum zu einem vertieften Verständnis der digitalen Design Grundlagen führen.

- Erzeugung von Glitches mit einem Zähler und nachgeschaltetem Dekoder. Sichtbarmachung der Glitches mit einem Oszilloskop. Betätigen des asynchronen Resets vom Decoder aus.
- Provozieren und sichtbarmachung von Metastabilen Zuständen. Hierfür kann z.B. eine Schaltung mit zwei asynchronen externen Takten aufgebaut werden.

Im zweiten Teil soll mit dem dem Direct Digital Synthesis Verfahren ein Synthesizer mit vielfältigen Klangfarben entwickelt werden. Damit kann anspruchsvolle digitale Schaltungstechnik umgesetzt werden. Zum Erreichen der Klangvielfalt können mehrere DDS Generatoren gleichzeitig, mit unterschiedlichen Frequenzen und Phasen betrieben werden. Möglich ist auch eine Frequenzmodulation mit einem zweiten Generator oder Ändern des Volumens mit einer Hüllkurve. Die Ansteuerung soll mit Hilfe eines MIDI Interfaces, welches Polyphonie (mehrere Klaviertasten gleichzeitig gedrückt) unterstützt. Die Implementierung soll im FPGA erfolgen. In der Implementierungsphase der Arbeit soll das Timing der FPGA Implementierung genau betrachtet werden.

Am Ende soll eine Referenzimplementierung in Anlehnung an den Yamaha DX7 für das Modul DTP2 entstehen

## B. Aufgabenspezifikation für den zweiten Teil

- Midi Interface for Keyboard für Polyphonie nach Konzept von gelk
  - 10 Frequenz Control Ausgänge zur Steuerung der Tonhöhe des Generators
  - 10 On/Off Ausgänge Ton on/off
  - UART wird geliefert von gelk
  - VHDL wird von Grund auf neu erstellt.
- 10 DDS implementieren und mit Mischer Mischen
- Script basierte Testbench. Testbench erzeugt serielle Midi Dtaen, so wie sie auf dem DIN Stecker vorkommen (logisch)
- Testbench liest eine Testscript Datei ein, in welcher die Tastendrücke eines Keyboards abgebildet werden können. Midi Poliphony Spec muss durch die Testbench unterstützt werden können. Velocity muss nicht unterstützt werden.
- FM Modulation – Tetstbench im Matlab
- Kein VHDL code ohne Testbench.
- Block level testbench. Unit Tests.

Abgrenzung:

- Keine Hüllkurve
- Keine Ausgabe der Velocity aud Midi controller
- Kein Bluetotth

Zeitplan:

- 2.5 Wochen Midi Controller incl. 10 DDS
- 2.5 Wochen FM Synthese

Unterstützung:

- Midi Controller/gelk
- FM-Synthese/rosn

Falls Midi nicht zum geplanten Zeitpunkt fertig wird, wird FM-zurückgestellt. Alle oben genannten Punkte sind Pflicht. Nicht Fertigstellung hat Einfluss auf die Benotung.

## C. Konzept Keyboard Dekoder

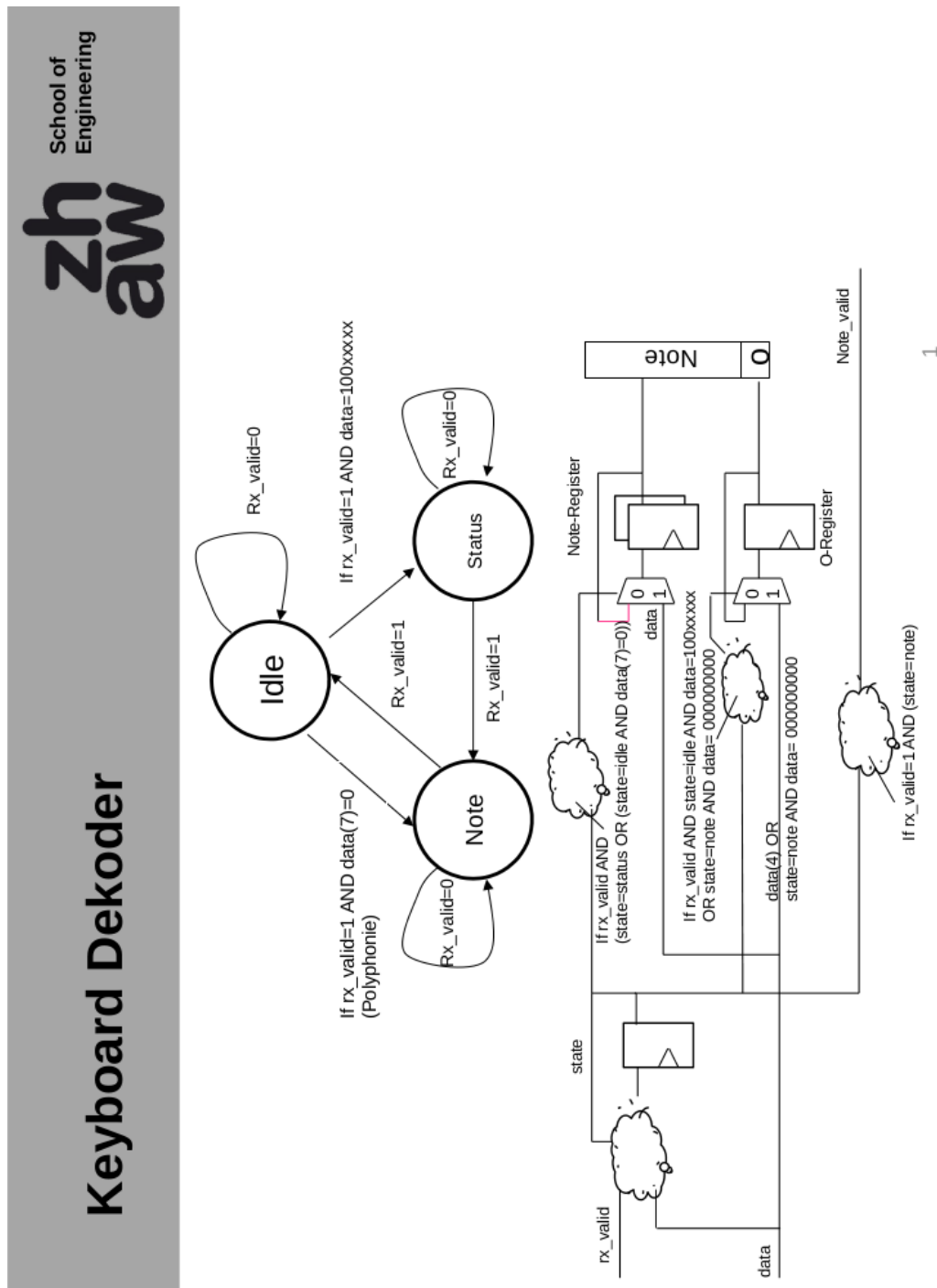
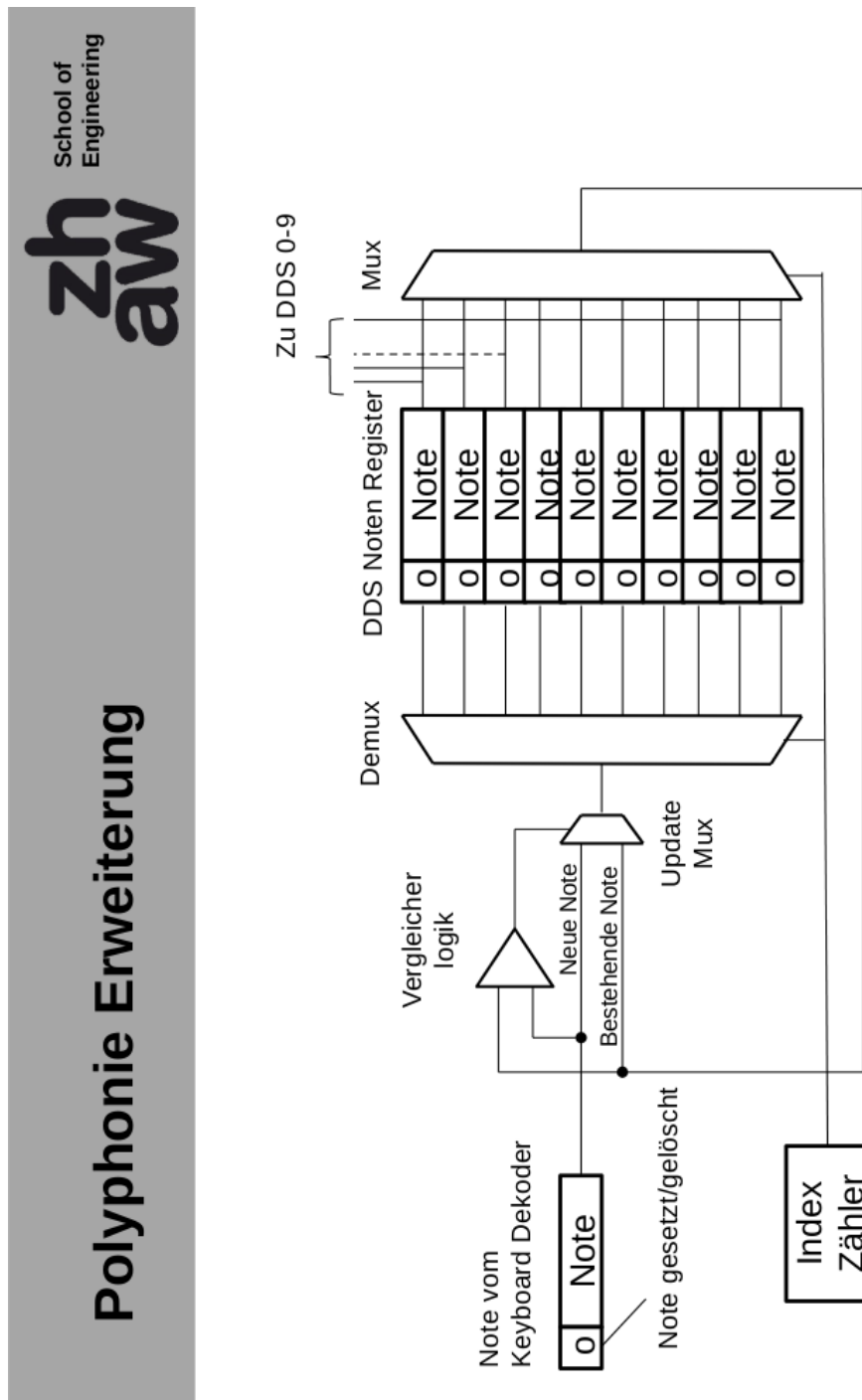


Abbildung C.1.: Midi Controller Spezifikation

## D. Konzept Polyphonie



2

Abbildung D.1.: Spezifikation Polyphonie-Block

## **E. CD mit Projektdateien**

# F. Top Synthesizer

In die bestehenden Blöcke und Signale wird das MIDI Interface wie folgt eingebaut:

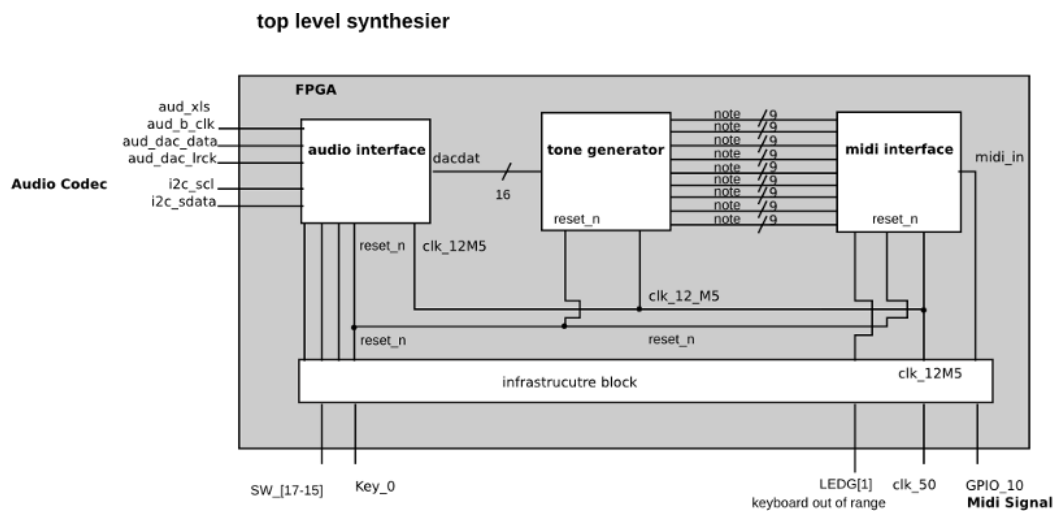


Abbildung F.1.: Top Synthesizer mit MIDI Interface: Blockschaltbild

Hier ist das Konzept der Umsetzung des MIDI Interface detaillierter beschrieben:

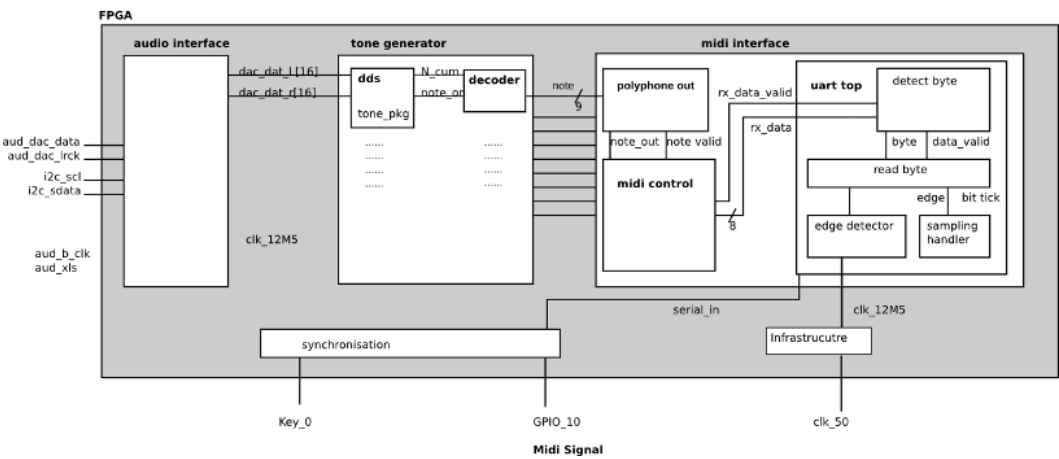


Abbildung F.2.: Top Synthesizer mit MIDI Interface: Detailansicht

## G. In- und Outputdatei der textbasierte Testbench

### Datei mit Testbefehlen für die Testbench

```
reset 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
check 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
singl 55 90 27 80 27 90 05 00 00 00
check 00 00 27 00 00 00 05 00 00 00
singl 55 90 73 80 73 90 16 00 00 00
check 00 00 00 00 00 00 16 00 00 00
polyp 71 55 02 55 33 55 08 00 00 00
check 71 02 33 00 00 00 00 00 03 00
polyp 71 00 16 55 20 55 33 00 00 00
check 00 00 16 00 20 00 00 00 04 00
polyp 02 55 03 00 20 00 40 55 00 00
check 02 00 16 00 40 00 00 00 03 00
```

### Das Testergebnis in der Datei

Automatically generated outputfile

---

Read file with commands in

---

```
reset
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
Read attribut: 00
Read note number: 00
```

```
check
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
Read attribut: 00
Read note:00
```

Read attribut: 00  
Read note number: 00

singl  
Read note:55  
Read attribut: 90  
Read note:27  
Read attribut: 80  
Read note:27  
Read attribut: 90  
Read note:05  
Read attribut: 00  
Read note number: 01

check  
Read note:00  
Read attribut: 00  
Read note:27  
Read attribut: 00  
Read note:00  
Read attribut: 00  
Read note:05  
Read attribut: 00  
Read note number: 01

... etc

polyp  
Read note:02  
Read attribut: 55  
Read note:03  
Read attribut: 00  
Read note:20  
Read attribut: 00  
Read note:40  
Read attribut: 55  
Read note number: 03

check  
Read note:02  
Read attribut: 00  
Read note:16  
Read attribut: 00  
Read note:40  
Read attribut: 00  
Read note:00  
Read attribut: 00  
Read note number: 03

Number of read lines from file: 12  
Finished read whole file

---



---