

# PA15\_gelk\_1 Polyphonic DDS Synthesizer mit MIDI Steuerung

---

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE  
WISSENSCHAFTEN

INSTITUTE OF EMBEDDED SYSTEMS

Autoren                      Katrin Bächli

Hauptbetreuer

Nebenbetreuer

Datum                      12. Dezember 2015

**Kontakt Adresse**

c/o Inst. of Embedded Systems (InES)  
Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften  
Technikumstrasse 22  
CH-8401 Winterthur

Tel.: +41 (0)58 934 75 25

Fax.: +41 (0)58 935 75 25

E-Mail: [katrin.baechli@zhaw.ch](mailto:katrin.baechli@zhaw.ch)

Homepage: <http://www.ines.zhaw.ch>

## Liste der noch zu erledigenden Punkte

besseres Bild def Glitch . . . . .	9
Bild anpassen . . . . .	11
Bild Asynchronem Zähler besser beschreiben . . . . .	11
Bild FF1 verzögert, FF2 schneller . . . . .	11
korrektes Wort ?(Concourent Assignment) . . . . .	12
Timeanalyse für FF . . . . .	13
einsetzen setup zeit gemäss glossar für .. . . .	16

# Zusammenfassung

Der erste Teil der Projektarbeit befasst sich mit zwei Herausforderungen der hardwarenahen Sprache VHDL.

Als Erstes werden sogenannte *glitches*, ungewollte Signalspitzen, künstlich herbeigeführt. Dies geschieht, in dem man die Signalpfade über externes Routing verlängert und dadurch der logische Wert verzögert beim nächsten Bauteil, einem *decoder*, eintrifft. Wird der *decoder* asynchron betrieben, so verarbeitet dieser kurzzeitig falsche Werte, was in einem *glitch* sichtbar gemacht wird.

Als Zweites wird in einer Schaltung ein metastabiler Zustand provoziert. Damit dies erreicht wird, muss die *hold* - oder die *setup time* eines Flip-Flops verletzt werden. Erzeugt wird die Metastabilität durch unterschiedliches Takten zweier Logiken. Der Ausgang der ersten *clock domain* wird als asynchron Impuls auf eine *finite state machine* einer anderen *clock domain* geführt. Die *finite state machine* fällt nach kürzester Zeit in einen undefinierten Zustand, einen Zustand, den sie nicht implementiert hat.

Der zweiten Teil der Projektarbeit beinhaltet das Entwickeln eines polyphonen *midi interface* für das Synthesizer-Projektes der Vorlesung Digitaltechnik II. Gemäss dem MIDI 1.0 Standard wird ein Controller implementiert, der auch das Drücken mehrerer Tasten zuverlässig detektiert. Um die Entwicklung effizient zu gestalten, wird von Beginn weg mit einer textbasierten *testbench* gearbeitet. Für die Ausgabe der maximal 10 gleichzeitig ertönenden Noten wird ein zweiter Block für das Händeln der ein und aus der einzelnen Noten geschrieben. Beide Blocks sind eingehend mit der *testbench* getestet und deren Verhalten gut dokumentiert.

(weglassen ??? Erst am Schluss nennen.... ) Als offener Punkt besteht die Implementation des *midi interfaces* in das bestehende Synthesizer-Projekt. Die Schnittstellen sind im Anhang festgehalten und die notwendigen 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.

# Abstract

??? ou ou englisch.... mhhhhmmmmmmmm

# Vorwort

an Alexey: Bitte hier auf inhaltliche Richtigkeit prüfen. Brauche es erst am Do korrekt ...

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 Umgehen lernen wollte.

In der Projektarbeit waren es exakt diese Punkte, mit denen ich viel Zeit durch Debuggen verbrachte. Doch gerade so, ist mir nun diese Art der Programmierung vertrauter geworden und ich freue mich, auf kommende VHDL-Projekte.

Ich möchte Prof. Hans-Joachim Gelke meinen Dank aussprechen. Er legte den Fokus immer wieder auf die kombinatorische Logik und die Konsequenz des Codes, für das Umsetzen in der Hardware. Ebenfalls möchte ich Dr. Matthias Rosenthal danken, der diskret im Hintergrund die Arbeit mittrug und den Entwicklungsprozess mittrug.

Ich denke, dass diese Arbeit vor allem für Software Ingenieure interessant ist, da sie einen groben Einblick in die hardwarenahe Programmierung erhalten.

(Name ???) (Ort???) (Datum ??)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1. Ausgangslage . . . . .	7
1.2. Zielsetzung Aufgabenstellung Anforderungen . . . . .	7
<b>2. glitches</b>	<b>9</b>
2.1. Definition Glitches . . . . .	9
2.2. Ursache für Glitches . . . . .	9
2.2.1. Asynchroner Input . . . . .	9
2.2.2. Nachteil getakteter Prozesse . . . . .	10
2.3. Glitches erzeugen . . . . .	10
2.3.1. Glitches Aufgrund von Bauteiltoleranzen . . . . .	10
2.3.2. Glitches Aufgrund von Pfadverzögerung . . . . .	11
2.4. Resultat Glitches provozieren . . . . .	12
2.4.1. Erzeugen über Bauteiltoleranzen . . . . .	12
2.4.2. Erzeugen über Routing . . . . .	13
<b>3. Metastabilität</b>	<b>14</b>
3.1. Definition Metastabilität . . . . .	14
3.2. Ursache von Metastabilität . . . . .	14
3.3. Metastabilität erzeugen . . . . .	15
3.3.1. Ansatz . . . . .	15
3.3.2. Implementation . . . . .	16
3.4. Resultat Metastabilität provozieren . . . . .	16
<b>4. MIDI Steuerung</b>	<b>17</b>
4.1. Einteilen der Blöcke und definieren der Schnittstellen . . . . .	17
4.2. Das MIDI Kommunikationsprotokoll . . . . .	18
4.2.1. <i>status bytes</i> . . . . .	18
4.2.2. <i>data bytes</i> . . . . .	18
4.2.3. Ungültige Bytes . . . . .	18
4.3. Umsetzung "midi controlBlock" . . . . .	18
4.4. Umsetzung "polyphonie outBlock" . . . . .	21
<b>5. Polyphonie</b>	<b>22</b>
5.1. Midi Spezifikation . . . . .	23
5.2. Umsetzung . . . . .	23
5.2.1. software nahe . . . . .	23
<b>6. testbench</b>	<b>24</b>
6.1. unit test midi control . . . . .	24
6.2. unit test midi interface . . . . .	24
<b>7. Resultate der Projektarbeit</b>	<b>25</b>
7.1. Generieren von Glitches . . . . .	25
7.2. Zustand von Metastabilität provozieren . . . . .	25
7.3. MIDI Controller entwickeln . . . . .	25
7.4. Polyphonie Block . . . . .	25
7.5. DDS Generatoren basierend auf Frequenzmodulation entwickeln . . . . .	25
7.6. Textbasierte Testbench für alle entwickelten Blocks . . . . .	25

<b>8. Diskussion und Ausblick</b>	<b>26</b>
<b>9. Verzeichnis</b>	<b>27</b>
9.1. Literatur . . . . .	27
9.2. Glossar . . . . .	27
<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>



# 1. Einleitung

Nennt bestehende Arbeiten zu diesem Thema (Literaturrecherche)

Stand der Technik: Bisherige Lösungen des Problems und deren Grenzen

## 1.1. Ausgangslage

Für den ersten Teil der Arbeit, die zwei ungewollten Effekte von *glitch* und einem metastabilen Zustand herzustellen gibt es selbsterklärend wenige Referenzprojekte. Beide Zustände sind nicht gewollt und finden als solche wohl oft Erwähnung in der Literatur [3] [4] [5], doch wie man diese Zustände provoziert, scheint bis auf eine gefundene [6], nicht von Interesse zu sein. Aus diesem Grund bestehen die ersten zwei Schritte vorwiegend aus eigenen Überlegungen, bzw. aus der Erfahrung von Prof. Hans-Joachim Gelke und seinen Anregungen.

Im zweiten Teil geht es um den Aufbau eines *midi interfaces*. MIDI bedeutet *musical instrument digital interface* und ist ein Standard, der sowohl die genaue Beschaffenheit der erforderlichen Hardware wie auch das Kommunikationsprotokoll der zu übermittelnden Daten festlegt [2]. Die MIDI Manufacturers Association dokumentiert die mehrfachen Erweiterungen des MIDI 1.0 Standard [1]. Diese Spezifikationen sind relevant in der Entwicklung des Blocks *midi control*.

Am Institut for Embedded Systems bestand bereits die MIDI UART von Armin Weiss. Diese detektiert die empfangenen Bytes und sendet ein valid-Flag, wenn das Byte korrekt ist. Das Byte wird als logic Vektor übermittelt. In dieser Projektarbeit zu entwickeln sind deshalb die zwei Einheiten *midi control* und *polyphony out*. Und anschliessend diese Blocks in das bestehende Synthesizer-Projekt einzubauen.

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

## 1.2. Zielsetzung Aufgabenstellung Anforderungen

Die offizielle Aufgabenstellung befindet sich im Anhang A unter refsect.aufgabenstellung. Alle Zitate beziehen sich auf diesen Text.

Von Anfang an war die Projektarbeit in zwei Teile geteilt:

Im ersten Teil sollten "Timing Artefakte demonstriert werden", die zu einem für einen vertieften Verständnis der digitalen Design Grundlagen führen. Ein Ansatz, wie ein glitch detektiert und ein metastabiler Zustand aufgebaut werden kann ist gegeben:

- "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."

Der Fokus des zweiten Teils liegt im Projektausschrieb bei der Entwicklung vielfältiger Klangfarben für das Synthesizer-Projekt:

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."

Da die Entwicklung des ersten Teils länger dauerte, als vorausgedacht, wurde zu Beginn des zweiten Teils die neuen Anforderungen besprochen, da absehbar wurde, dass alle Anforderungen nicht realistisch sind (siehe Anhang B)

Gemäss der Spezifikation des zweiten Teiles sind die nächsten Schritte:

- "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."Im Anhang C und D finden sich die vorgegebene Umsetzung

des *midi interfaces*. Auf der CD befindet sich das Synthesizer-Referenz-Projekt, in welches das *midi interface* eingebaut wird.

## 2. glitches

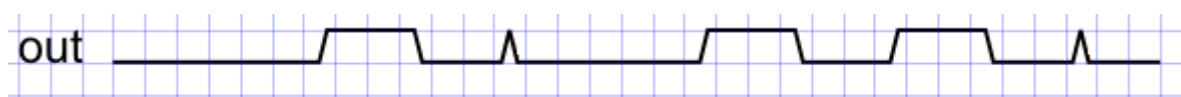
### 2.1. Definition Glitches

Im technischen Bereich bedeutet gemäss Cambridge Dictionaire ein *glitch*, eine ungewollte, flüchtige Signalspitze, die ein Fehlverhalten im System verursacht. Im Anhang befindet sich der Originaltext wie auch noch eine weitere Defintion aus dem englischen Sprachraum.

In der digitalen Signalverarbeitung ist das Glitch ein bekannter Begriff und wird dort unter anderem leicht sarkastisch beschrieben:

*"Als "Glitch" wird eine ungewollte, flüchtige "Signalspitze" bezeichnet, die Zähler aufwärts zählt, Register löscht oder einen ungewollten Prozess startet."* [4]

Am intuitivsten ist die bildliche Darstellung des soeben beschriebenen Fehlverhaltens (Abbildung 2.1). In dieser Signalabfolge treten zwei mal Glitches auf, die eigentlich nicht dort hingehören.



besseres Bild  
def Glitch

Abbildung 2.1.: Glitch-Signalspitzen

Auf den ersten Blick scheinen solch temporäre Spannungsspitzen nicht zu stören. Doch wenn man Pech hat, sind Glitches der Auslöser für Abstürze oder zumindest für ein Fehlverhalten eines Gerätes. Aus diesem Grund, wird nun der Ursache dieser Spitzen nachgegangen.

### 2.2. Ursache für Glitches

Der Auslöser der flüchtigen Spannungsspitzen sind asynchrone Inputs vor einem asynchronen Bauteil oder verzögerte Signale. Trifft z. B. vor einem Dekoder von vier Leitungen, das Signal einer Leitung zu spät an, entschlüsselt der Dekoder kurzfristig einen falschen Wert. Obwohl die Störung nur kurz ist, übermittelt ein asynchroner den falschen Wert direkt an seinen Ausgang.

#### 2.2.1. Asynchroner Input

Das ungleichzeitige Eintreffen von Signalen kann z.B. durch lange Signalpfade (Leitungen), unterschiedliche Durchlaufverzögerungen der vorangehenden Flip-Flops oder unterschiedliche Logik-Zeiten entstehen. Grundsätzlich gelten alle nicht-getakteten Prozesse als potenzielles Risiko für Glitches, da man bei ungetakteten Prozessen nicht weiss, wie lange sie dauern.

### 2.2.2. Nachteil getakteter Prozesse

Jeder getaktete Prozess verzögert die Verarbeitung. Aus diesem Grund wird abgewogen, wo Prozesse getaktet und wo sie asynchron getätigt werden. In VHDL gibt es viele asynchrone Vorgänge (wie ungetaktete Prozesse oder Singalzuweisungen), deshalb ist es vorteilhaft, wenn das Risiko asynchroner Prozesse bekannt ist.

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.

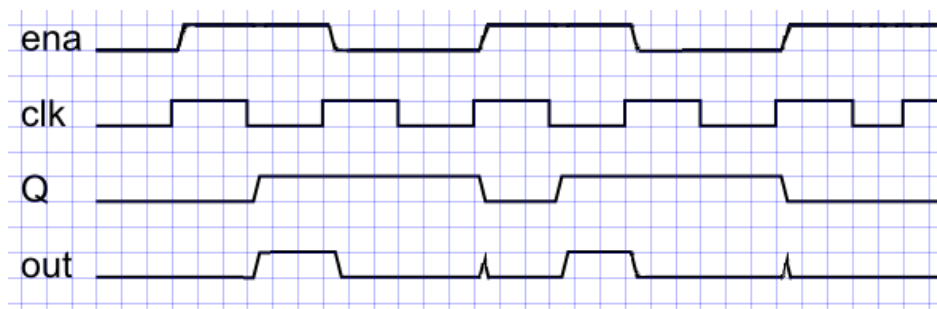


Abbildung 2.2.: Mögliches Bsp. für Glitches

## 2.3. Glitches erzeugen

Was in Glitch ist, ist relativ einfach zu beschreiben. Ein Glitch jedoch mit moderner Digitaltechnik zu erzeugen, erweist sich als etwas schwerer. Hier zwei Ansätze, die getestet werden.

### 2.3.1. Glitches Aufgrund von Bauteiltoleranzen

Der erste Ansatz ist, ein Zähler aus vier Flipflops mit asynchronem Dekoder zu implementieren.

#### Konzept

Die Erwartung ist, dass aufgrund der *Bauteiltoleranzen* der Flip-Flops die vier Ausgänge an den Flip-Flops nicht gleichzeitig ihren Wert übermitteln. Die einen sind leicht schneller, die anderen leicht verzögert. Dadurch ergibt sich kurzzeitig am asynchronen Dekoder einen falschen Wert. Damit ein abnormaler Wert in einem Zähler erkannt wird, sendet der Dekoder bei der Zahl 7 einen Peak. Ohne Glitch entschlüsselt der Dekoder in regelmässigen Abständen von 160 ns diese Zahl. Aufgrund der Flip-Flop-Bauteiltoleranzen ist ein kurzzeitiges Dekodieren einer 7 *ausserhalb der Periode T* zu erwarten.

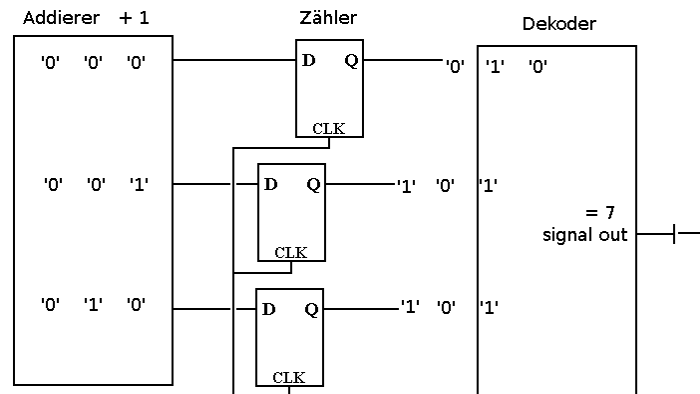


Abbildung 2.3.: Ausnutzen der Bauteilverzögerung

### Implementation

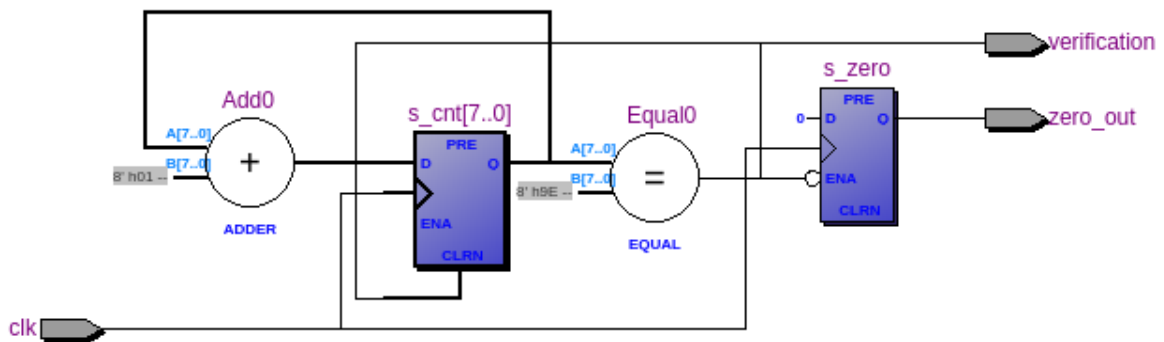


Abbildung 2.4.: RTL Zähler mit asynchronem Dekoder

Um die gewollten Zahlenwerte von den Glitches zu unterscheiden, wird das asynchrone Signal getaktet. Dadurch erscheint der korrekte Zählwert mit einer Taktverzögerung. Die Periode ist 20 ns (CLK = 50 MHz).

### 2.3.2. Glitches Aufgrund von Pfadverzögerung

Der zweite Ansatz ist die gesuchte Bauteilverzögerungen über längere Signalfade zu simulieren. Der Dekoder des Zählers bleibt asynchron.

#### Konzept

Dekodiert wird die Zahl 15. Durch intelligentes Routing (FF 1 wird verzögert, FF 2 wird beschleunigt) wird der Zustand der Zahl 11 forciert.

## Implementation

Cyclone II, Board De2. Quartus 13.0sp.

Die Pfadverlängerung wird über das Routing über die GPIO-Pins des Headers 1 gemacht (siehe Abbildung 2.6). Die obersten vier Doppel-Pins erhalten eine "Brücke", sodass das Signal links ausgegeben und rechts wieder eingespiessen wird.

Signalverkürzung ist eine direkte Signalzuweisung .

korrektes We  
?(Concouren  
Assignment)

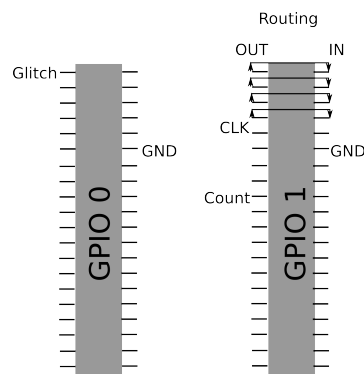


Abbildung 2.5.: GPIO Anschlüsse

Auf dem KO wird das asynchrone Glitch-Signal und das synchrone Zählersignal neben dem Takt ausgegeben. Weil der Zähler synchronisiert wurde, ist der Wert 1 Periode (= 20 ns) später als der Glitch.

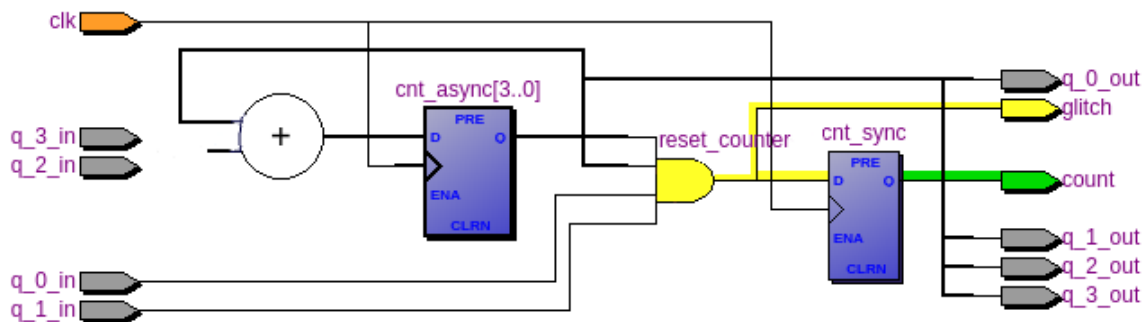


Abbildung 2.6.: Zähler mit Signal-Routing über GPIO

Im RTL-Diagramm sieht man deutlich den Unterschied zwischen dem asynchronen Zähler, der über das Gate *reset\_counter* beim Wert 15 einen Impuls an den Ausgang *glitch* gibt und dem synchronisierten Zähler *cnt\_sync* der dem asynchronen Ausgang nachgeschaltet ist und dieses Signal taktet. Das getaktete Zähl-Signal geht an den Ausgang *count*.

## 2.4. Resultat Glitches provozieren

### 2.4.1. Erzeugen über Bauteiltoleranzen

Der Ansatz, dass die Bauteiltoleranzen der Flip-flops eine Ursache für asynchrone Inputs in den Dekoder sind ist korrekt. Die Umsetzung zeigte sich jedoch als schwierig, da die heutigen Flip-

Flops zu schnell sind bzw. ihre Toleranzen zu klein um sichtbar zu werden. Aus diesem Grund entschlüsselte der asynchrone Dekoder trotz kleinen Verzögerungen die Werte stets korrekt.

Timeanalyse  
für FF

### 2.4.2. Erzeugen über Routing

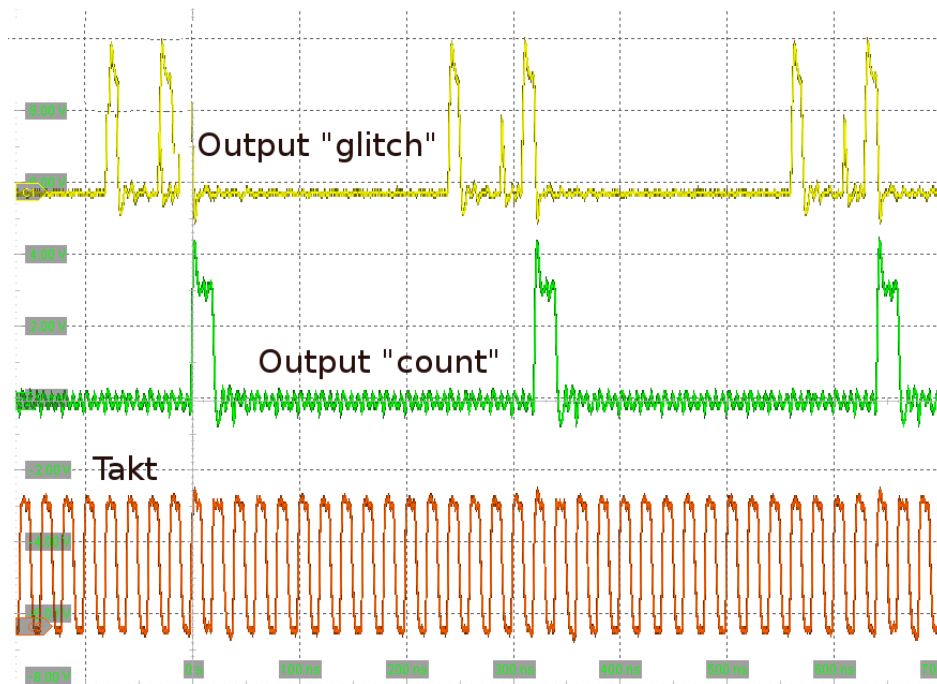


Abbildung 2.7.: Glitch (gelb), Zähler (grün) und Takt (orange)

Typisch ist, dass der synchrone Zähler eine Signalbreite von genau einer Periode hat, da dieses Signal getaktet ist. Dagegen hat der asynchrone Glitch keine konstante Breite.

1. Bei welchen Zählständen treten Glitches auf?
2. Wie hängen die Zählstände mit dem gewählten Routing zusammen?

## 3. Metastabilität

### 3.1. Definition Metastabilität

Metastabilität bedeutet, dass der Ausgang eines Flip-Flops nicht dem Eingang entsprechen muss. Wechselt das Inputsignal eines Flip-Flops zur falschen Zeit, ist der Wert des Ausgangssignal unsicher. Hier zwei kurze englische Beschreibungen, dieses Phänomens:

"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" (Camara, S. 32-2)

"If the amplitude of the runt pulse is *exactly the treshold 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" (Fletcher, 482.)

Im besten Fall wählt der Ausgang bei unklarem Eingangssignal selbst einen Wert an ('0' oder '1'). Im schlechten Fall "hängt" sich das Flip-Flop "auf" und toggelt permanent zwischen '0' und '1' oder setzt sogar beide Werte parallel.

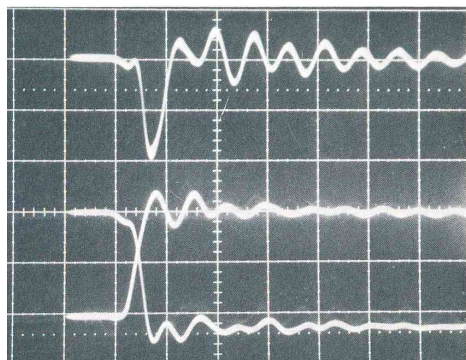


Abbildung 3.1.: Metastabilität schlimmster Fall (Fletcher, 482.)

### 3.2. Ursache von Metastabilität

Der Grund für Metastabilität ist, dass der angelgte Wert entweder zu spät eintrifft (verletzen der setup-Zeit) oder zu früh wieder verschwindet (verletzen der hold-Zeit). 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." (Camara, S. 32-2)



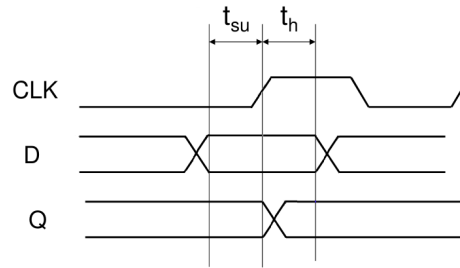


Abbildung 3.2.: Einhalten der Datenzeiten

Es gibt mehrere Gründe für das Nichteinhalten der geforderten setup-Zeit:

- Ein Logikpfad kann zu lange sein, bzw. die Taktfrequenz ist zu schnell
- Zwischen den Bauteilen liegen zu lange Pfade, die das Eintreffen der Daten verzögern
- Ein vorangehendes Bauteil hat eine zu lange Durchlaufverzögerung.

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

Als Alternative bietet sich eine Synchronisierungsschaltung an. Zwischen den zwei Takt-Flanken kann sich der metastabile Ausgang erholen und gelangt so stabil in den Verarbeitungspfad. Der Nachteil der Synchronisation ist jedoch, eine um einen Takt längere Verarbeitungszeit.

### 3.3. Metastabilität erzeugen

#### 3.3.1. Ansatz

Aufgebaut wird ein System mit zwei Takten. Der zentrale Block hat eine Taktfrequenz von 50 MHz und beinhaltet eine State Machine. Diese wechselt bei jedem Impuls von einem Zustand in den anderen (Abbild: ?? Um die zwei Zustände zu erkennen, werden beiden Zuständen ein logischer Pegel zugefügt:

- Zustand 1: s0 = Logisch '0'
- Zustand 2: s1 = Logisch '1'

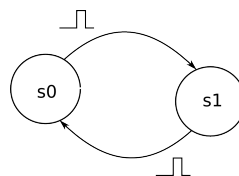


Abbildung 3.3.: Statemachine im zentralen Block

Der Impuls, der die State Machine steuert ist asynchron. Er wird von einem Zähler generiert, der mit der Taktfrequenz von 27 MHz läuft. Alle 37 ns sendet der Zähler einen Puls an die State Machine. Die State Machine selbst arbeitet mit einer Taktfrequenz von 20 ns. Der Impuls ist ihr gegenüber asynchron.

Erwartet wird, dass die setup-Zeit der State Machine-Flip-Flops regelmässig verletzt werden.



Abbildung 3.4.: Die zwei Taktzeiten

### 3.3.2. Implementation

## 3.4. Resultat Metastabilität provozieren

Was ist das Ergebnis beim Verletzen der setup Zeit? Beide Ausgänge immer an? Keiner von beiden? aufhängen des Systems? (Keine LED geht mehr).

Synchronisation Schaltung erhärtet die These b

einsetzen set  
zeit gemäss  
glossar für ..

## 4. MIDI Steuerung

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

Beschreiben der Schnittstellen

Vor Programmieren der units (blöcke) und unit test, schnittstellen klären  
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

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.

Im folgenden wird nur auf den Block *midi interface* eingegangen, der die Umsetzung der MIDI Steuerung darstellt. Als erstes die Zusammenfassung der internen Blöcke (siehe Abbildung 4.1 ).

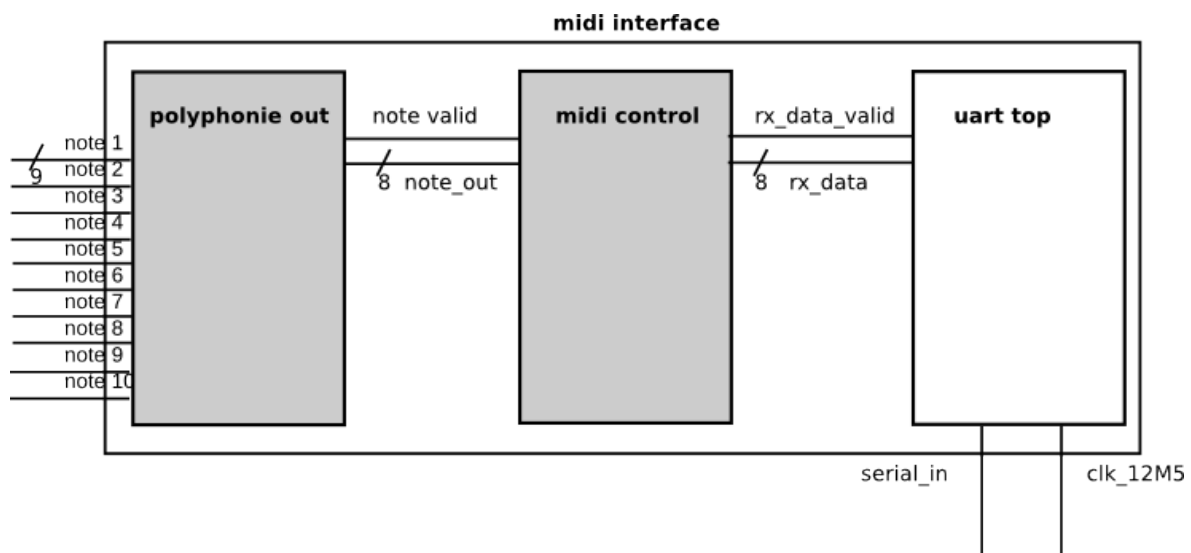


Abbildung 4.1.: Blockschaltbild MIDI Interface

Gegeben ist der UART Block, in der Abbildung als *uart top* bezeichnet. Dieser detektiert MIDI Bytes und sagt, ob diese gültig sind. Zu entwickeln sind die zwei Blöcke "**midi control**" und "**polyphonie out**".

Als erstes wird kurz generell auf das MIDI Kommunikationsprotokoll eingegangen, damit man die Kriterien bei der Umsetzung versteht. Danach wird die Umsetzung des *midi control*-Blocks erklärt und zum Schluss die Implementation des *polyphone out*-Blocks.

## 4.2. Das MIDI Kommunikationsprotokoll

Werden MIDI Daten übermittelt, so unterscheidet der Standard zwei Typen an Daten (Detaillierte Spezifikation S. 11 - 12 ).

### 4.2.1. 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.

### 4.2.2. 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* sind Noten, Geschwindigkeit des Anschlages und ...

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." (Spezifikation, S. 6).

### 4.2.3. Ungültige Bytes

Alle *status bytes*, die nicht implementierte Funktionen enthalten und alle ihnen folgenden *Data Bytes* sollen vom Empfänger verworfen werden." (**Spezifikation, 6**).

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

Diese Anforderung ist wichtig beim Implementieren einer Finite State Machine und der Testbench (**siehe Kapitel .....**).

## 4.3. 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*:

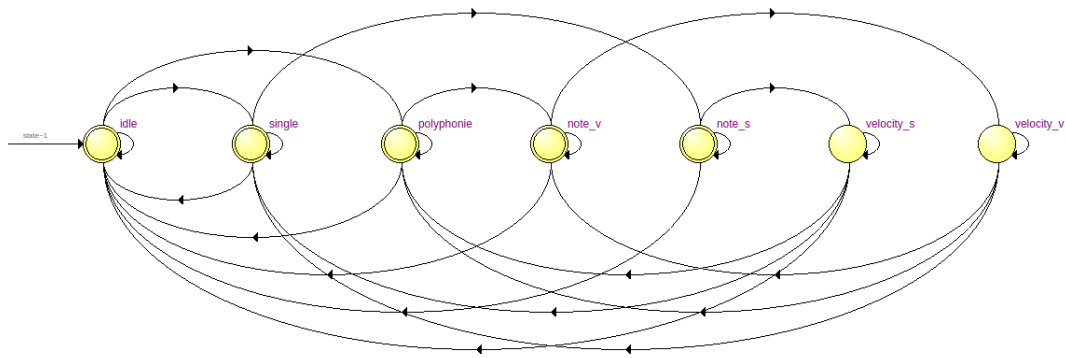


Abbildung 4.2.: fsm Übergänge

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.

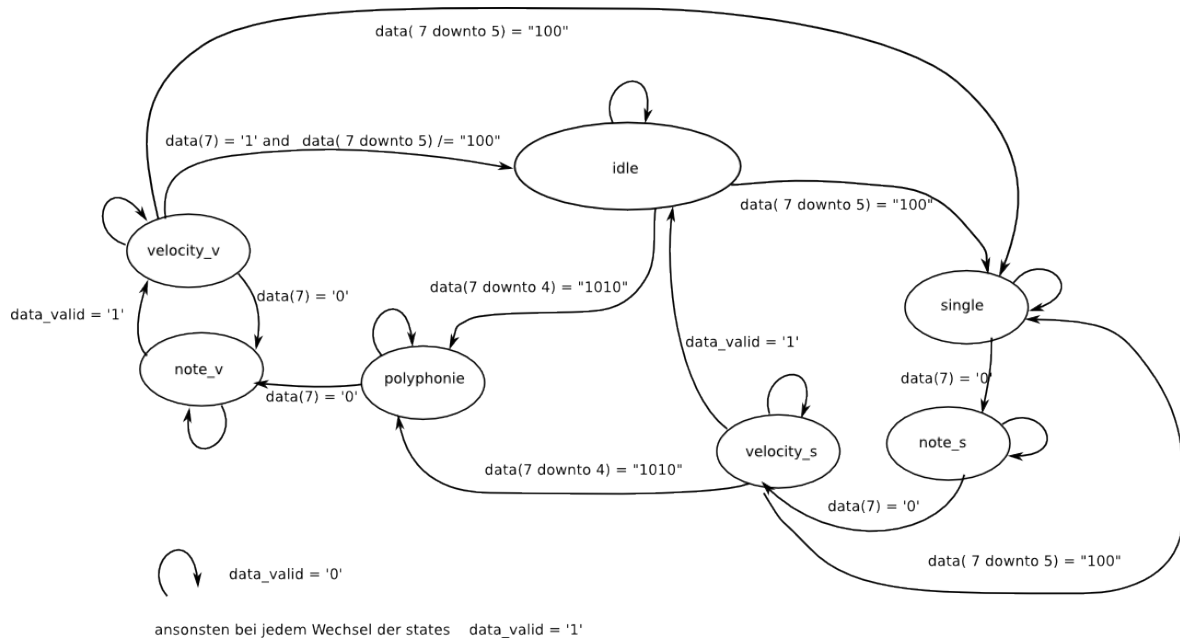


Abbildung 4.3.: fsm Übergangsbedingungen

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 4.4) oder *polyphonie* (Abbildung 4.5)

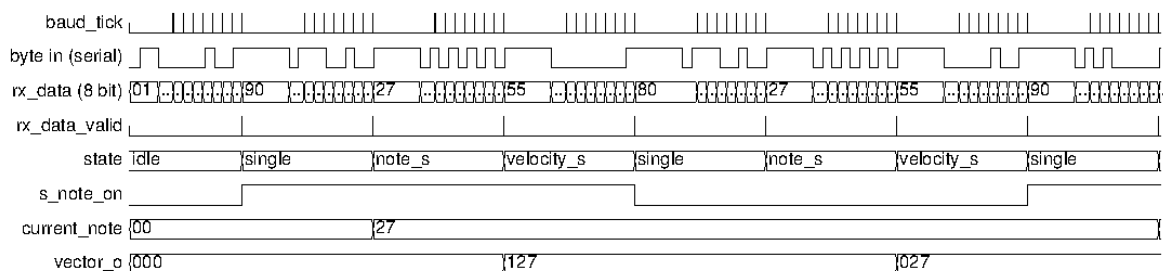


Abbildung 4.4.: fsm für single mode

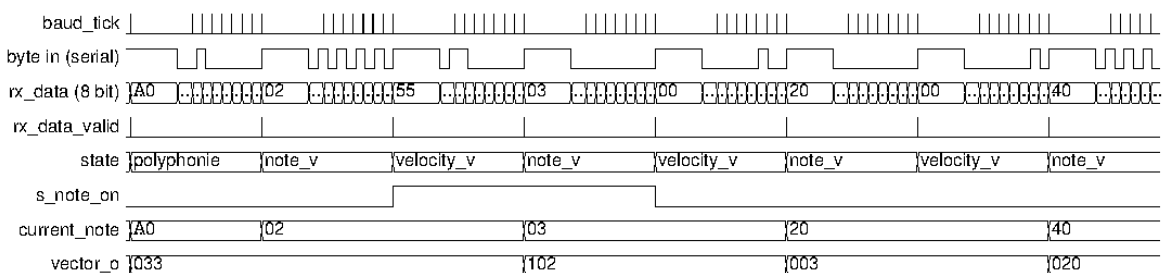


Abbildung 4.5.: fsm im polyphony mode

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**.

## **4.4. Umsetzung "polyphonie outBlock"**

## 5. Polyphonie



Abbildung 5.1.: Bildbeschreibung ....



## **5.1. Midi Spezifikation**

## **5.2. Umsetzung**

### **5.2.1. software nahe**

**hardware nahe**

## 6. testbench

Inspiziert vom Konzept des *test driven development* wird stets parallel zur Entwicklung einer *unit* (im folgenden als Block genannt) der *unit-test* entwickelt. (Kent, 2013)

Nachdem im Voraus die Schnittstellen zwischen den Blocks geklärt sind (siehe Kapitel xXX) wird eine leere Hülle für jeden zu entwickelnden Block erstellt. Die *testbench* geht von Beginn weg vom Ziel, ein funktionstüchtiges *midi interface* aus. Solange ein Block nicht funktioniert, werden die zu testenden Signale direkt an den Ausgang der DUT geführt.

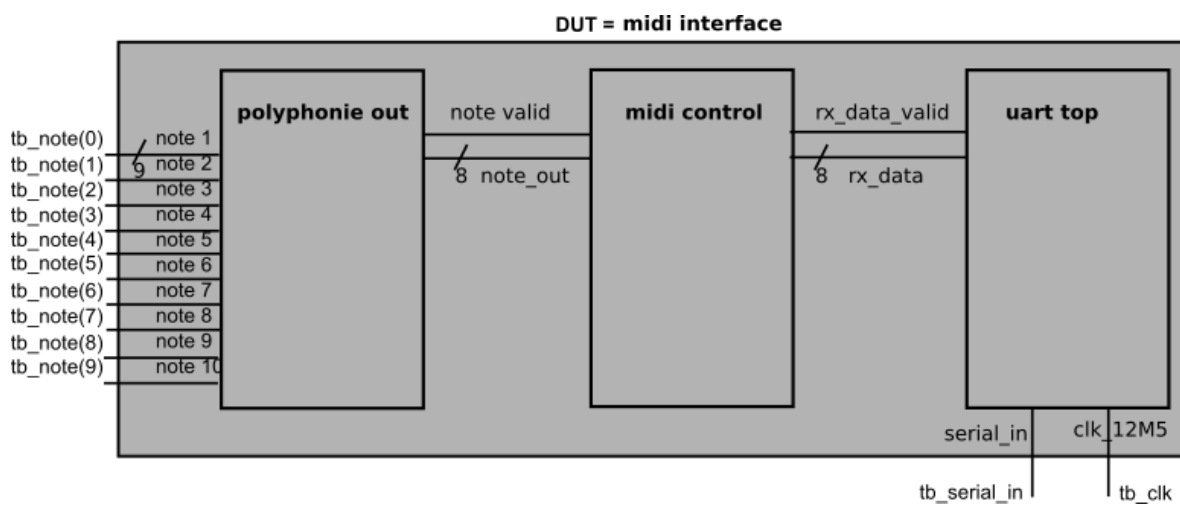


Abbildung 6.1.: Blockschaltbild Device under Test

In den nächsten zwei Unterkapiteln wird die Umsetzung der test driven Entwicklung beschrieben.

### 6.1. unit test midi control

### 6.2. unit test midi interface

## 7. Resultate der Projektarbeit

Zusammenfassung der Resultate

### 7.1. Generieren von Glitches

Beides erreicht. Viel Aufwand, da wenig Wissen wie ungewollter Zustand erzeugt werden kann. Es dauerte 4 Wochen (15. oktober + Doku), der insgesamt 16 Wochen PA.

### 7.2. Zustand von Metastabilität provozieren

Beides erreicht. Viel Aufwand, da wenig Wissen wie ungewollter Zustand erzeugt werden kann. Es dauerte 4 Wochen (15. oktober + Doku), der insgesamt 16 Wochen PA.

### 7.3. MIDI Controller entwickeln

### 7.4. Polyphonie Block

Midiansteuerung nach vielen Redesignes gelungen. Mehr in der Software geübt, ist das Timing in VHDL übungsbedürftig.

### 7.5. DDS Generatoren basierend auf Frequenzmodulation entwickeln

Sitzung: Nur 10 DDS einbauen. Schnittstellen da. Nicht da, Frequenzmodulation anstelle von LUT. Aus zeitgründen. Nur erster Entwurf, wie es umzusetzen ist.

### 7.6. Textbasierte Testbench für alle entwickelten Blocks

## 8. 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

## 9. Verzeichnis

### 9.1. Literatur

- [1] The MIDI Manufacturers Association. *MIDI 1.0 Detailed Specification*. Los Angeles, 1995.
- [2] Christian Braut. *Das MIDI-Buch*, page 10. Sybex, 1993.
- [3] John A. Camara. *Engineering Reference Manual*, pages 32–2. Belmont, 2010. About metastability.
- [4] William I. Fletcher. *An Engineering Approach to Digital Design*, page 472. Utah State University, 1980. About glitch.
- [5] William I. Fletcher. *An Engineering Approach to Digital Design*, page 482. Utah State University, 1980. About metastability.
- [6] Sandeep Mandarapu. *Measuring Metastability, Master Project*. Departement of Electrical and Computer Engineering, Southern Illinois University, 2012.

### 9.2. Glossar

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

#### **glitch**

**finite state machine**

**clock domain**

**textbasierte testbench**

**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 (Device Handbook, S. 8-19).

#### **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 (Device Handbook, S. 8-19).

Pfadzeit

... (Unter 3.2. Metastabilität Ratschläge erwähnt)

#### **quartus**

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

#### **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 (Device Handbook, S. 8-19)

# 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
  - 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 Dtaen, so wie sie auf dem DIN Stecker vorkommen (logisch)
- Testbench liest eine Testscript Datei ein, in welcher die Tastendrucke 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

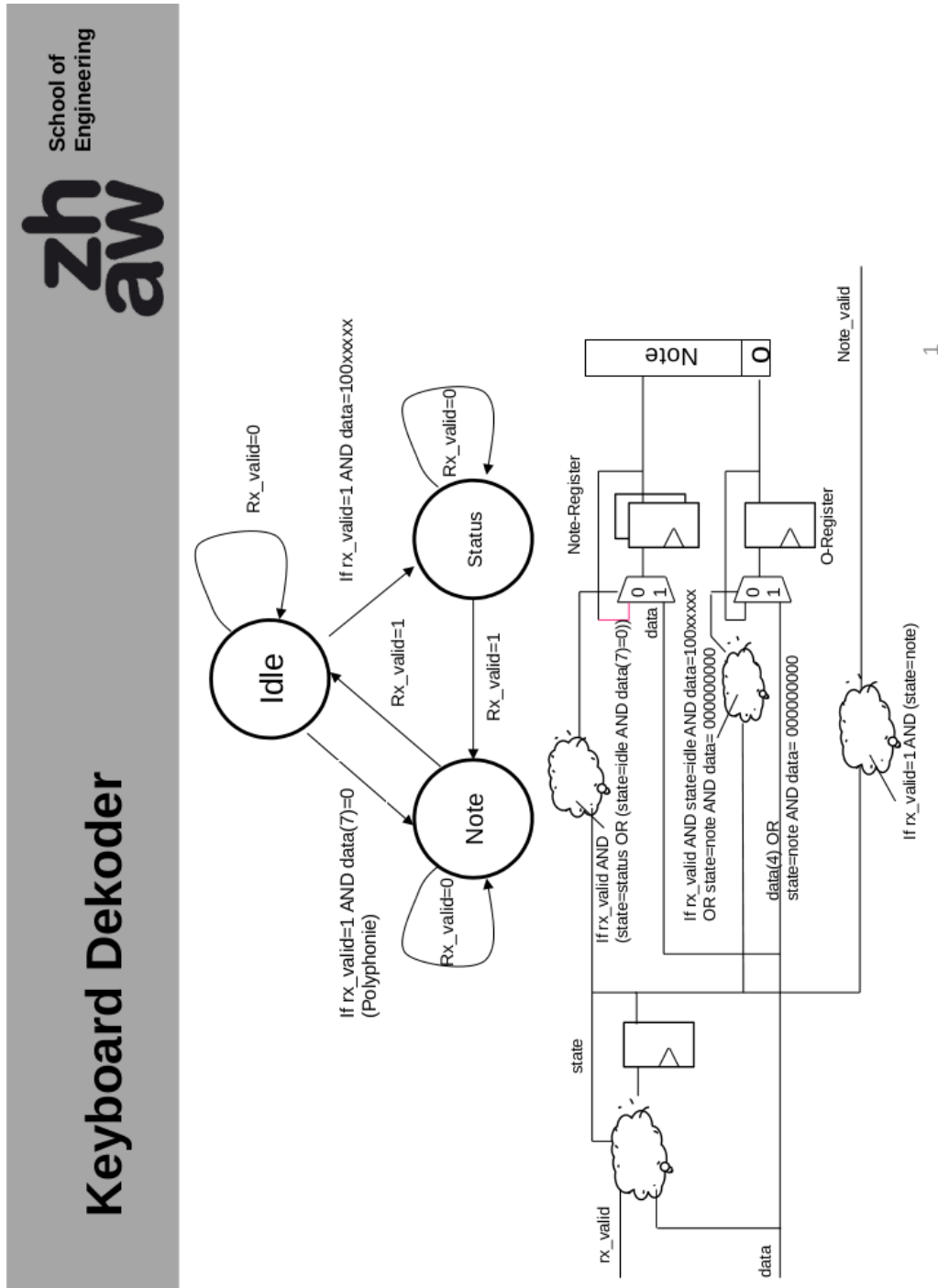


Abbildung C.1.: Midi Controller Spezifikation

## D. Konzept Polyphonie

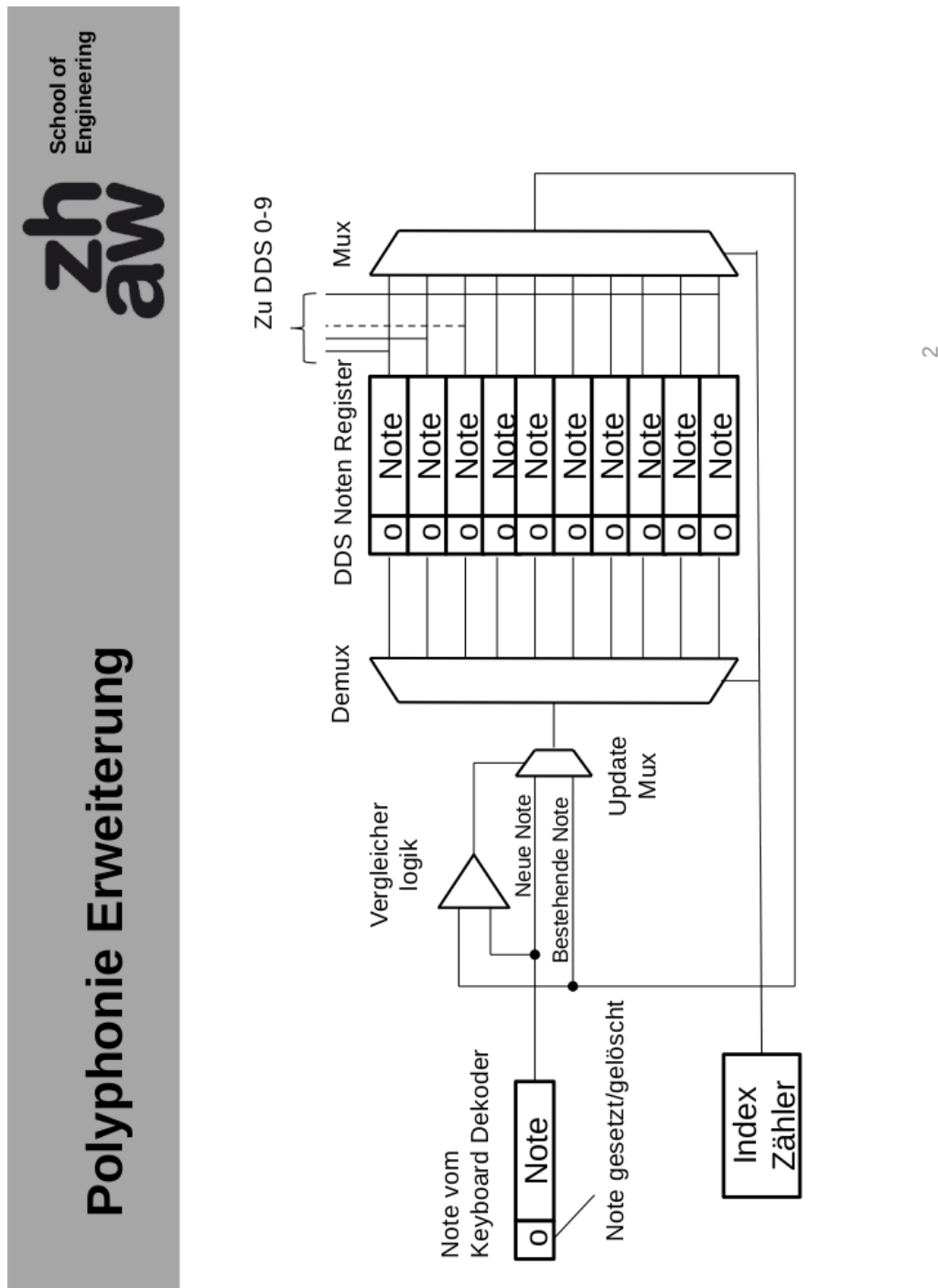


Abbildung D.1.: Spezifikation Polyphonie-Block

## **E. CD mit Projektdateien**

## F. Top Synthesizer

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

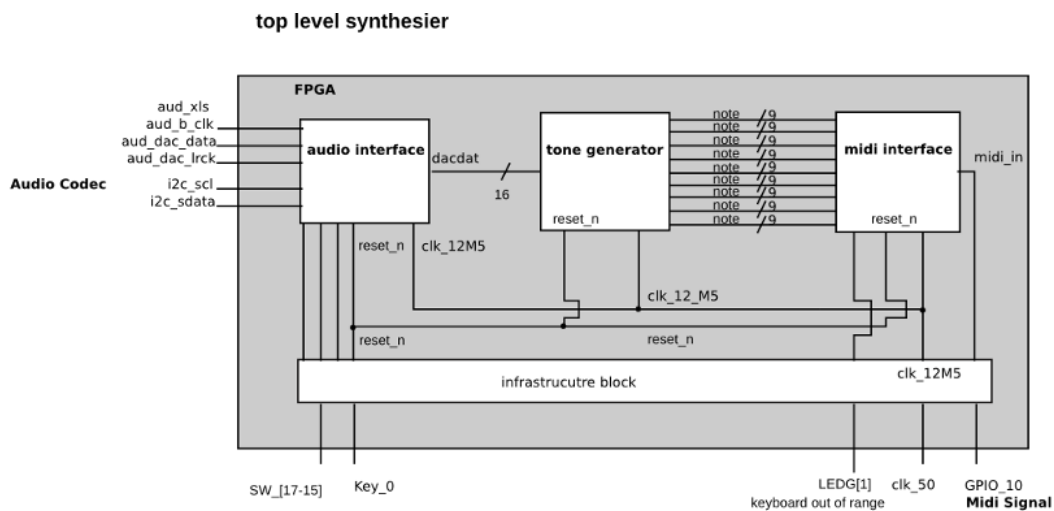


Abbildung F.1.: Top Synthesizer mit MIDI Interface: Blockschaltbild

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

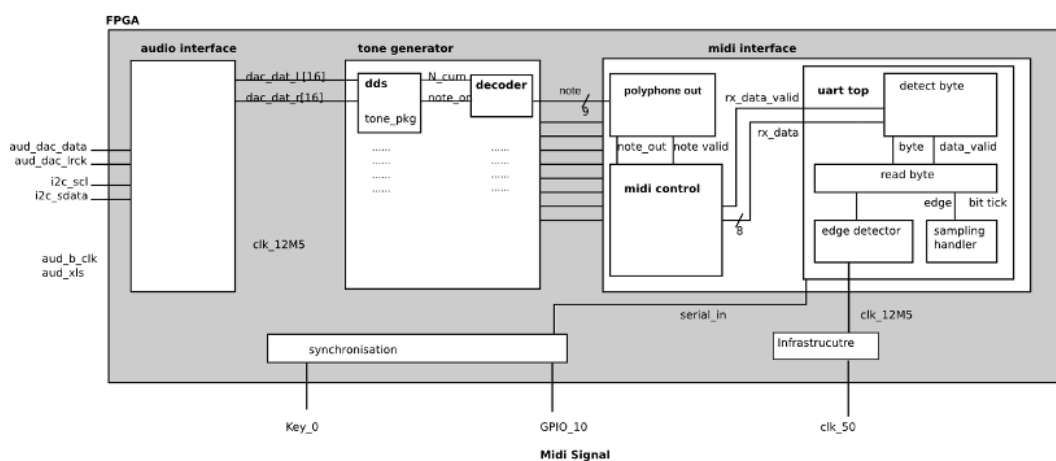


Abbildung F.2.: Top Synthesizer mit MIDI Interface: Detailansicht