

Aufbau eines Laborversuchs zur analogen und digitalen Verarbeitung eines Teilchendetektorpulses

Autor: Jannes Münchmeyer

Zugeordnetes Fach: Physik

Name der Schule: Sächsisches Landesgymnasium Sankt Afra

Interner Betreuer: Dr. Bert Xylander

Externer Betreuer: Jun. Prof. Dr. Arno Straessner

Abgabedatum: 15. Dezember 2011

Gliederung

Einleitung	3
1. Technische Grundlagen	4
1.1. Das LHC Experiment	4
1.2. Der ATLAS-Detektor	5
1.2.1. Die inneren Detektoren	7
1.2.2. Das hadronische und elektromagnetische Kalorimeter	7
1.2.2.1. Entstehung der Impulse	8
1.2.2.2. Der Bandpassfilter	9
1.2.2.3. Der ADC	10
1.2.2.4. Auswertung mittels eines FPGA	10
1.2.3. Das Myonen-Spektrometer	11
2. Umsetzung im Praktikumsversuch	12
2.1. Grundkonzept	12
2.2. Die einzelnen Bestandteile	13
2.2.1. Technische Voraussetzungen	13
2.2.1.1 NI Elvis II	13
2.2.1.2 NI LabView	14
2.2.2. Die Pulssimulation	14
2.2.3. Der Bandpassfilter	18
2.2.3.1. Wahl des Filters	18
2.2.3.2. Analyse des Filters	19
2.2.4. Die Digitalisierung und Verarbeitung durch den FPGA	23
2.3. Zusammenfassung und Ausblick	26
Schlusswort	28
Literaturverzeichnis	29

Einleitung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Aufbau eines Praktikumsversuchs des Messtechnikpraktikums an der Technischen Universität Dresden am Institut für Kern- und Teilchenphysik. Inhalt des Versuches ist die Verwendung eines so genannten FPGA, eines Feldes von programmierbaren logischen Gattern. Als Beispiel hierfür wird seine Anwendung beim Auslesen von Detektoren betrachtet. Es werden Detektorpulse simuliert, eine analoge Filterung vorgenommen, die Pulse digitalisiert und schließlich eine digitale Filterung und Auswertung durchgeführt.

Der Versuch wurde und wird von einer kleinen Gruppe von mehreren Personen aufgebaut. Meine Aufgabe beim Aufbau des Versuchs war die Simulation der Pulse, ihre analoge Umformung, sowie die Digitalisierung. Aus diesem Grund wird auf die weiteren Teile des Versuchs in dieser Arbeit nicht genauer eingegangen werden. Auch die genauen Aufgabenstellungen, die später von den Studenten im Praktikum zu bearbeiten sind, werden in dieser Arbeit nicht dokumentiert, da sie ebenfalls die Aufgabe eines anderen Mitglieds der Arbeitsgruppe waren.

Die Dokumentation gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil befasst sich mit den realen Gegebenheiten am Teilchenbeschleuniger LHC bei Genf. Dabei wird speziell ein Kalorimeter, das Flüssigargonkalorimeter des ATLAS-Detektors betrachtet, weil dieses Experiment mit Beteiligung des Instituts für Kern- und Teilchenphysik, an dem ich auch den Praktikumsversuch aufgebaut habe, konstruiert wurde. Es ist dabei nötig recht ausführlich vorzugehen, da die Details für das Experiment relevant sind. Der zweite Abschnitt der Arbeit behandelt die Abstraktion der Originalgegebenheiten auf den Versuch. Dabei wird versucht, einen guten Mittelweg zwischen Realitätsnähe auf der einen Seite und guter Nachvollziehbarkeit im Rahmen des Praktikumsversuchs auf der anderen Seite zu finden.

Ziel der Arbeit ist, die geplanten Schritte des Praktikums soweit fertig zu stellen, dass sie mit den Teilen der anderen zusammengefügt werden können, um den fertigen Praktikumsversuch durchführen zu können.

1. Technische Grundlagen

1.1. Das LHC Experiment^{1,2}

Der LHC ist der größte bisher von Menschen errichtete Teilchenbeschleuniger. Dabei bedeutet LHC „Large Hadron Collider“, wobei seine deutsche Bezeichnung allerdings „großer Hadronen-Speicherring“ ist. Er befindet sich bei der europäischen Organisation für Nuklearforschung, dem CERN, nahe Genf in der Schweiz. Der Beschleuniger selbst ist ein Kreisbeschleuniger mit einem Umfang von 26,7 km, der 70 bis 100 Meter unter der Erde verläuft und dabei die französisch-schweizerische Grenze mehrfach kreuzt. In ihm werden Protonen oder Schwerionenkerne auf bis zu 7 TeV im Schwerpunktsystem beschleunigt und auf dieser Energie zur Kollision gebracht. Eine Aufrüstung auf bis zu 14 TeV ist bis zum Jahr 2014 geplant. Die Beschleunigung und Fokussierung des Teilchenstrahls erfolgt durch 1232 Dipolmagneten sowie mehreren tausend Multipolmagneten, die eine Feldstärke von 8,3 Tesla erreichen.

Die Planung für den Bau des LHC begann 1994. Anfangs sollte er erst 7 TeV, dann 10 TeV und später 14 TeV erreichen können, allerdings entschied man sich 1996 aus Kostengründen auf die Zwischenstufe der 10 TeV zu verzichten. Dabei wurde der LHC in den bereits vorhandenen Tunnel des LEPs, eines Elektron-Positron-Kollisionsexperiment, gebaut. Der Start des LHC erfolgte am 10. September 2008 und verlief sehr gut. Allerdings ereignete sich am 19. September ein Zwischenfall, bei dem es durch eine fehlerhafte elektrische Verbindung zweier Dipolmagneten zu einer mechanischen Zerstörung und damit zum Austritt von Helium in den Tunnel kam.³ In Folge dieses Ereignisses musste der LHC zur Durchführung einer Reparatur und zur Überprüfung aller weiteren Magneten außer Betrieb genommen werden. Durch die langen Aufwärmungs- und Abkühlungszeiten wurde dieser erst Ende 2009 wieder aufgenommen. Die erste Kollision bei 3,5 TeV pro Strahl erfolgte schließlich am 19. März 2010.⁴

Am LHC sind 4 große Teilchendetektoren installiert, die sich ALICE, ATLAS, CMS und LHCb nennen und unterschiedliche Funktionen erfüllen.

¹ Nach: Stärtz 2011.

² Nach: Large Hadron Collider 22.11.11

³ Siehe: CERN releases analysis of LHC incident 22.11.11

⁴ Siehe: LHC sets new record – accelerates beam to 3.5 TeV 22.11.11

ALICE steht für „A Large Ion Collider Experiment“, also für „ein großes Ionenkollisionsexperiment“ und befasst sich mit Schwerionenkollisionen. Ziel der Untersuchung ist dabei vor allem der Wissensgewinn bezüglich des Quark-Gluonen-Plasmas. Dazu werden Energien von ca. 2,76 TeV pro kollodierendem Nukleon erreicht.

ATLAS ist eine Abkürzung für „A Toroidal LHC ApparatuS“, was soviel bedeutet, wie „eine große torusförmige LHC Apperatur“. Er ist einer von zwei Allzweckdetektoren, die im LHC verbaut sind. Sie befassen sich mit der allgemeinen Untersuchung der Teilchenphysik bei sehr hohen Energien, wie sie im LHC erreicht werden. Speziell ist dabei auch die Suche nach dem Higgs-Teilchen zu nennen, bei der man sich durch den LHC einen Erfolg erhofft.

CMS stellt den anderen Allzweckdetektor dar. Seine Buchstabenkombination steht für „Compact Muon Solenoid“, also für „kompakter Myonen Magnet“. Seine Funktion ist der des ATLAS Detektors sehr ähnlich.

LHCb ist das einzig nichtsymmetrische der bisher genannten Experimente. Das „b“ im Namen steht für das Bottom-Quark, deren Interaktionen durch den Detektor untersucht werden. Dabei wird speziell nach CP-Verletzungen⁵ gesucht.

Weiterhin sind die Experimente TOTEM und LHCf vorhanden. LHCf steht für „Large Hadron Collider forward“ und untersucht neutrale Pionen, die bei den Kollisionen entstehen, um so Aufschluss über den Ursprung der kosmischen ultra-hoch Energie Strahlung zu bekommen. TOTEM (“Total Cross Section, Elastic Scattering and Diffraction Measurement”) hat die Hauptaufgabe die Größe eines Protons mit bisher unbekannter Genauigkeit zu messen und genauen Aufschluss über die Luminosität des LHCs zu geben.

1.2. Der ATLAS-Detektor⁶

ATLAS ist, wie oben erwähnt, ein Allzweckdetektor. Seine Hauptaufgabe besteht in der Suche nach dem Higgs Teilchen. Weiterhin versucht er aufzuklären, ob es innerhalb der Leptonen und Quarks, der derzeit als elementar angesehenen Teilchen, eine weitere, noch kleinere Substruktur gibt. Ein Auffinden dieser Substrukturen

⁵ CP bedeute Charge Parity, also Ladungspartität. Wenn diese nicht auftritt, so nennt man es CP-Verletzung. Sie bieten eine Erklärung dafür, dass im beobachteten Universum weit mehr Materie als Antimaterie existiert.

⁶ Nach LHC. ATLAS-Detektor 22.11.11

würde die Frage klären, warum es drei Generationen von Elementarteilchen gibt oder ob noch mehr, uns derzeit nicht bekannte, existieren. Zielstellung ist hierbei auch eine vereinheitlichende Quantenfeldtheorie zu finden, die alle vier Grundkräfte und damit auch die Gravitation mit einbezieht. Als Weg dazu gelten die Untersuchungen supersymmetrischer Teilchen, die man derzeit in Theorien jenseits des sogenannten Standardmodells annimmt. Auch wird in Ergänzung zu den von LHCb ausgeführten Messungen eine Untersuchung der B-Physik⁷ durchgeführt, die sich mit dem Zerfall von B-Mesonen und deren Antiteilchen beschäftigt. Man hofft so, Aufschluss über die CP-Verletzungen zu finden, die als Ursache für die sehr ungleiche Verteilung von Materie und Antimaterie im uns bekannten Universum vermutet werden. Um die Ergebnisse mit höherer Genauigkeit zu erzielen, existiert neben dem ATLAS noch der CMS, der nahezu dieselbe Aufgabenstellung besitzt.

Für die Untersuchung führt der ATLAS die für diesen Typ Detektor üblichen Messungen durch. Die charakteristischen Größen sind der Impuls geladener Teilchen, die Energiemessung, sowohl von geladenen, als auch von ungeladenen Teilchen, und die Messung der Gesamtenergie einer Kollision.

Zur besseren Darstellung des Aufbaus zeigt Abb. 1 eine schematische Darstellung des Detektors.

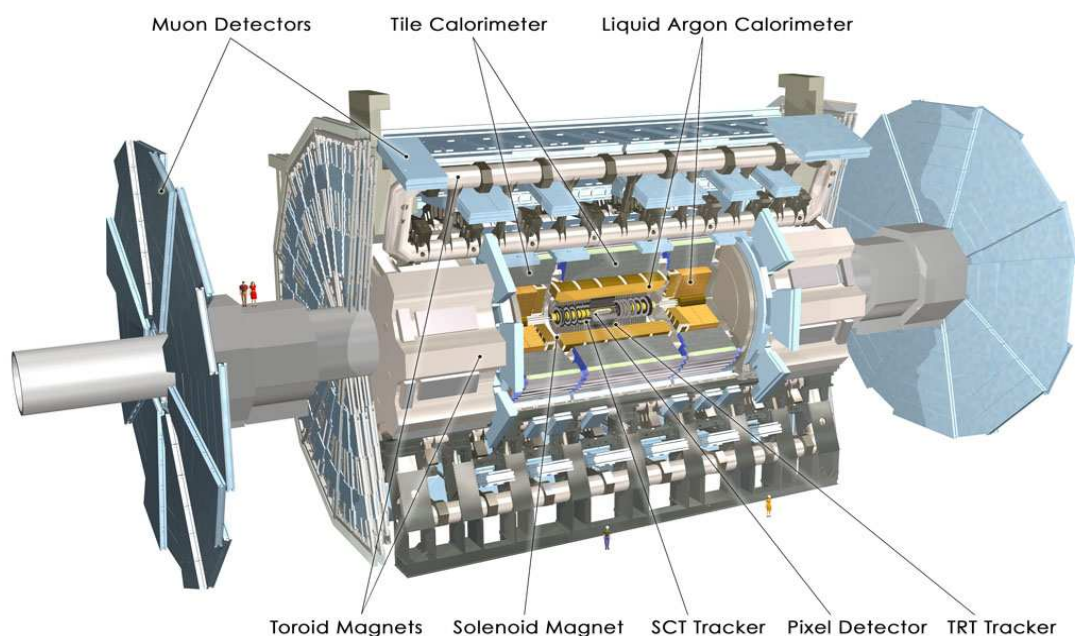


Abb. 1: Schema des Aufbaus des ATLAS⁸

⁷ B-Physik beschäftigt sich mit Hadronen, die ein Bottom-Quark enthalten. Dies sind vor allem B-Mesonen.

⁸ Aus: http://courses.washington.edu/partsym/Img/atlas_schematic.jpg 22.11.11

Man kann drei Hauptbereiche unterscheiden. Diese sind die inneren Detektoren, die Kalorimeter, sowie das Myonenspektrometer. Zusätzlich kann man auf der Abbildung die verschiedenen Magneten erkennen, die dazu dienen die Verläufe der Teilchenstrahlen zu krümmen, was für die Messung der Teilchenimpulse und der Messung ihrer elektrischen Ladung notwendig ist.

1.2.1. Die inneren Detektoren⁹

Die inneren Detektoren haben die Aufgabe, nahe am Wechselwirkungspunkt die genaue Bewegung der Teilchen aufzuzeichnen. Damit erreicht man unter anderem, dass der Entstehungspunkt der Teilchen sehr genau rekonstruiert werden kann. Dies ist wichtig, da man oft nicht das anfangs bei der Kollision entstandene Teilchen, sondern nur seine Zerfallsprodukte messen kann. So bewegt sich beispielsweise ein b-Quark mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 1,5 Picosekunden, trotz relativistischer Effekte nur um einige Millimeter, bevor es zerfällt und kann deswegen nicht direkt gemessen werden.

Der innerste Teil des Detektors ist der Pixel Detektor. Er besteht aus ca. 140 Millionen Pixeln, die jeweils ein Ausmaß von ca. $50\text{ }\mu\text{m}$ mal $400\text{ }\mu\text{m}$ besitzen. Man erreicht somit eine hohe Genauigkeit bei der Messung von Spurkoordinaten auch bei einer sehr großen Anzahl von Teilchen.

Weiterhin gehören zu den inneren Detektoren zwei Tracker, der SCT und der TRT. SCT steht für „Semi Conductor Tracker“ und ist ein aus Siliziumstreifen bestehender Detektor, der eine Messung mit einer Genauigkeit von ca. $30\text{ }\mu\text{m}$ erlaubt. TRT kürzt Transition Radiation Tracker ab. Dieser besteht aus mit Xenongas gefüllten Driftröhren, in denen die Übergangsstrahlung der Teilchen gemessen wird. Das erlaubt vor allem, die Identifikation von Elektronen einfach durchzuführen.

1.2.2. Das hadronische und elektromagnetische Kalorimeter¹⁰

Die zweite Ebene des ATLAS bilden die Kalorimeter. Diese sind das ECAL, sowie das weiter außen liegende HCAL. Das HCAL ist ein hadronisches Kalorimeter, das auf die Messung der Energie der Hadronen ausgelegt ist. Diese deponieren ihre Energie nur zu sehr geringen Teilen im ECAL. Um eine möglichst große Absorption

⁹ Nach: LHC. ATLAS-Detektor 22.11.11

¹⁰ Nach: LHC. ATLAS-Detektor 22.11.11

zu erreichen, muss diese Kalorimeterschicht deutlich dicker sein, als die anderen Detektoren, wie man in Abb. 1 recht gut erkennen kann. Aufgebaut ist das HCAL-Kalorimeter aus sich abwechselnden Schichten von Plastiksintillatoren und Eisenabsorbern.

Weiter innen liegt das ECAL, also das elektromagnetische Kalorimeter. Es ist zur Messung der Energie der Elektronen und der Photonen gebaut. Als Absorber werden mit Kupfer beschichtete und mit Edelstahl verstärkte Bleiplatten verwendet, zwischen denen sich als Nachweismedium flüssiges Argon befindet. Durch die besondere Anordnung dieser Platten ist es möglich, die Energien unabhängig vom Einfallswinkel der Teilchen zu messen. Um eine genaue Ortsmessung der Teilchenspur zu erreichen, ist das Kalorimeter in ca. 190.000 einzelne, etwa 2,5 cm mal 2,5 cm große Segmente unterteilt, die jeweils mit einer eigenen Ausleseelektronik bestückt sind.

1.2.2.1. Entstehung der Impulse¹¹

Das elektromagnetische Kalorimeter ist ein Liquid Argon Calorimeter, also ein Flüssigargonkalorimeter. Trifft ein elektromagnetisch wechselwirkendes Teilchen auf das Kalorimeter, so kommt es zu Stößen mit dem Argon. Dieses wird dabei ionisiert. Das auftreffende Teilchen deponiert dabei seine Energie in dem Kalorimeter. Die Ionisierung des Argons kann als Ladungsmessung an den beiden anliegenden Kupfer-Elektroden erfasst werden. Es entsteht ein elektrischer Impuls mit einer sehr kurzen, sprunghaften Anstiegszeit von wenigen Nanosekunden und einem linearen Abfall von etwa 400 ns. Dieser Abfall entsteht durch driftende Elektronen in den Kammern des Kalorimeters. Eine Darstellung der Pulsform ist in Abb. 2 zu erkennen.

Wichtig für das Auslesen des Kalorimeters ist, dass die im Kalorimeter deponierte Energie, die bekanntermaßen der Energie des Teilchens entspricht, proportional zur in einer Zeit aufgesammelten Ladung und somit zur ausgelesenen Stromstärke ist. Dies gilt sofern die Teilchen ihre gesamte Energie im Kalorimeter deponieren, was hier der Fall ist. Das ermöglicht, durch Messung der Höhe des Strompulses die ursprüngliche Energie des Teilchens zu bestimmen.

¹¹ Nach: Stärtz 2010.

1.2.2.2. Der Bandpassfilter¹²

Die rohen Signale, die aus dem Kalorimeter kommen, können nicht unmittelbar digitalisiert werden. Zuerst müssen die Signale vorverstärkt und in Spannungswerte umgewandelt werden. Dies ist nötig, da die im Kalorimeter selbst entstehenden Strompulse recht klein sind. Trotzdem müssen die Signale noch weiter analog bearbeitet werden, bevor sie in den ADC kommen. Das hat zwei Gründe. Der erste ist der Effekt des Pile-Up, also der Überlagerung mehrerer Signale. Da die Abfallzeit des Pulses deutlich länger ist, als die Zeit zwischen mehreren Kollisionsereignissen im Detektor, kommt es dazu, dass sich Signale überlagern. Dabei addieren sich die Spannungen. Man muss folglich die Pulse derart umformen, dass die Pile-Up-Signale unterdrückt werden, da dieser die Energiemessung erschweren bzw. unmöglich machen.

Der zweite Grund, der für eine analoge Filterung des Signals spricht, ist die Reduzierung der sogenannte Signal-to-Noise-Rate, also des Verhältnisses zwischen Rauschen und Signal. Indem man den scharfen, dreieckigen Puls zu einem langsameren, ansteigenden und abfallenden Puls umformt, wird Rauschen mit sehr hohen oder sehr niedrigen Frequenzen unterdrückt.

Zur Umformung des Pulses wird im Flüssigargonkalorimeter ein $CR-(RC)^2$ Bandpassfilter verwendet. Dieser besteht aus einem Hochpass und zwei Tiefpassfiltern. Die dadurch erreichte Umformung des Signals ist in Abb. 2 zu sehen.

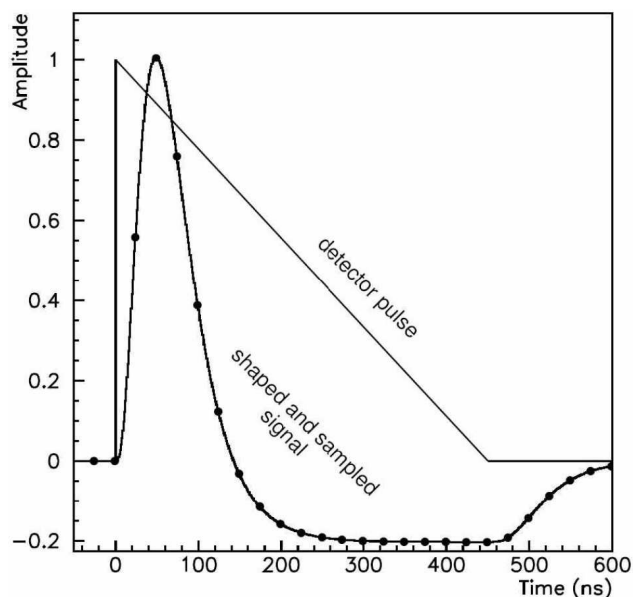


Abb. 2: Verlauf des Detektorpulses und des umgeformten Pulses, samt Samples¹³

¹² Nach: Stärtz 2010.

Wichtige Eigenschaft des so umgeformten Pulses ist, dass sein Integral über die gesamte Zeit ungefähr 0 ist. Dadurch wird verhindert, dass sich beim Summieren der vielen Pile-Up-Signale die Nulllinie verschiebt.

1.2.2.3. Der ADC¹⁴

Die umgeformten Signale können jetzt digitalisiert werden. Dazu wird ein ADC, ein Analog-Digital-Konverter, verwendet. Da der ADC nur einen Messbereich von 1 V hat, ist es nötig vor dem ADC einen Vorverstärker zu nutzen. Dies ist ein dynamischer Vorverstärker, der stets versucht, die höchste mögliche Verstärkung zu nutzen, die noch nicht über das Maximum des ADC hinaus geht. In der Ausgabe des ADC werden neben den 12 Bit für die Daten des ADC noch zwei weitere Bit genutzt, um die Einstellung des Vorverstärkers zu übergeben.

Weiterhin kommt es durch die Umformung des Signals dazu, dass auch negative Spannungswerte vorkommen können. Da diese auch gemessen werden sollen, wird vor dem Verstärker noch ein Spannungsoffset hinzugefügt. Der ADC tastet nun mit einer bestimmten Frequenz die Kurve ab. In Abb. 2 sind auf dem umgeformten Puls durch die dargestellten Punkte die verschiedenen Samples eingezeichnet. Der ADC sampelt dabei mit 40 MHz, also mit einem Datenpunkt, alle 25 ns. Betrachtet man dazu die Länge des Pulses, ergibt sich, dass auf dem Peak des Pulses ungefähr fünf Datenpunkte gemessen werden können. Diese sind für die Bestimmung der Energie von zentraler Bedeutung, da der Rest der Datenpunkte recht geringe Spannungswerte aufweist und damit unpräziser ist.

1.2.2.4. Auswertung mittels eines FPGA^{15,16}

FPGA steht für Field Programmable Gate Array, was bedeutet, dass es eine Anordnung von programmierbaren logischen Gattern ist. Anders als bei einem Prozessor gibt die Programmierung des FPGA an, wie seine Gatter verschaltet werden. Dementsprechend besitzt ein FPGA nicht notwendigerweise eine Taktung und kann Daten in Echtzeit verarbeiten. Weitere Vorteile des FPGA sind die schnelle Implementierung von logischen Schaltungen, sowie seine vergleichsweise geringen

¹³ Aus: Stärtz 2010. Seite 10.

¹⁴ Nach: Stärtz 2010.

¹⁵ Nach: Stärtz 2010.

¹⁶ Nach: Field Programmable Gate Array 23.11.11

Kosten. Da ein Programm in einem ADC nur seine Konfiguration bestimmt, ist es vergleichsweise einfach, ganze Datenstränge zu duplizieren und dadurch eine massive Parallelisierung der Aufgaben zu erreichen. Typische Anwendungsfelder des FPGA sind neben der Signalverarbeitung, Sprach- und Bilderkennung, Kryptographie oder neuronale Netzwerke.

Mithilfe des FPGA wird ein FIR-Filter implementiert, also ein Finite Impulse Response Filter. Dieser hat die Aufgabe, eine bestimmte Anzahl von Samples mit ihren Filterkonstanten aufzuaddieren. Mathematisch kann die Berechnung wie folgt beschrieben werden:

$$y(n) = \sum_{i=0}^N a_i \cdot x_{n-i}$$

Hierbei stehen die a_i für die Filterkonstanten und die x_i für die eingelesenen Spannungswerte. Die Filterkonstanten bestimmen dabei den Anteil der Energie, der durch den aktuellen Samplepunkt dargestellt wird. Diese Konstanten müssen vorher durch simulierte Daten mittels eines randomisierten Verfahrens bestimmt werden.

Zusätzlich muss man noch die Verstärkung und den Offset in die Formel mit einbeziehen, wodurch sie sich zu folgender Formel erweitert:

$$y(n) = \sum_{i=1}^d a_i^{(gain)}(ch) \cdot (S_i^{(gain)}(ch) + Ped_i^{(gain)}(ch))$$

Hierbei repräsentieren die $S_i^{(gain)}(ch)$ die um die Verstärkung korrigierten Messwerte und die

$Ped_i^{(gain)}(ch)$ den Offset. Diese Summe wird nun zum weiteren Bearbeiten durch den FIR-Filter ausgegeben.

1.2.3. Das Myonen-Spektrometer¹⁷

Die äußerste Detektorschicht bildet das Myonen-Spektrometer. Da Myonen nur schwach wechselwirken, ist es sinnvoll, ihre Detektorschicht an die äußerste Stelle zu setzen, da die Kalorimeter so vorher schon die Energie der meisten anderen Teilchen absorbiert haben. Das Myonen-Spektrometer besteht zum großen Teil aus drei Lagen von Myondriftrohren, die schichtweise übereinander angeordnet sind. Durch die Krümmung der Spuren im Magnetfeld wird der Impuls der Myonen

¹⁷ Nach: LHC. ATLAS-Detektor 22.11.11

gemessen. Hierbei besteht der große Vorteil gegenüber den inneren Detektoren, dass durch die Größe eine weit höhere Genauigkeit erreicht werden kann. Die Genauigkeit der Bestimmung der Spurkoordinaten liegt bei ungefähr 50 μm .

2. Umsetzung im Praktikumsversuch

2.1. Grundkonzept

Der Praktikumsversuch soll sich aus verschiedenen Teilen zusammensetzen. Dabei ist der erste Teil eine allgemeine Einführung zum Konzept des FPGA, und erst der zweite Teil befasst sich konkret mit der Signalverarbeitung. Die Aufgabe dieser Arbeit bezog sich auf diesen Teil 2. Aus diesem Grund wird hier nur der zweite Teil des Versuchs betrachtet werden und allgemein auch unter dem Begriff des Praktikumsversuchs geführt werden.

Im Versuch sollen die verschiedenen Schritte der Signalverarbeitung dargestellt werden. Der erste ist dabei die Signalerzeugung, die im Versuch nicht mittels eines echten Detektors, sondern durch einen ARB-Generator durchgeführt wird. Der nächste Schritt ist die Filterung und das Umformen des Pulses. Als dritter Schritt folgt die Digitalisierung mittels des ADC und die Berechnung der Energien durch den FPGA. Abschließend werden die Daten wieder zurück in den Computer gesendet, wodurch ein Vergleich zwischen den Eingabe- und den Ausgabedaten möglich wird.

Die nachfolgenden Teile wurden in einem Zeitraum von etwa 1,5 Jahren von mir aufgebaut. Es wird das Ergebnis des Prozesses dargestellt und nicht der Prozess selbst. Deswegen nutze ich im Folgenden eine Zustandsbeschreibung, deren Entstehung als meine Eigenleistung gesehen werden kann.

2.2. Die einzelnen Bestandteile

2.2.1. Technische Voraussetzungen

2.2.1.1 NI Elvis II^{18 19 20}

Für den Versuch wird die Plattform NI Elvis II von National Instruments verwendet. Dieses Gerät ist für die Lehre konzipiert und dient der Vermittlung von Konzepten der Schaltungs-, Mess- und Regelungstechnik, sowie des Embedded-Designs. Wichtig ist, dass NI Elvis II die Möglichkeit bietet, verschiedene Boards anzuschließen. Auf diesen Boards können dann Schaltungen aufgebaut oder weitere Bauteile genutzt werden. Im Versuch wird das NI Digital Electronics FPGA Board verwendet. Es ist mit vielseitigen Geräten ausgestattet, von denen im Folgenden nur die für den Versuch relevanten kurz eingeführt werden.

Der NI Elvis II besitzt ein digitales Oszilloskop mit zwei Kanälen, das über USB angesprochen werden kann. Es arbeitet mit einer Abtastrate von 100MS/s. Das Auslesen der Daten erfolgt über einen Computer, was die Speicherung vereinfacht.

Weiterhin wird für die Erzeugung des Signals ein Arbitrary Function Generator (ARB-Generator) benötigt, dessen Aufgabe das Erstellen arbiträrer, also nicht regelmäßiger Spannungsverläufe ist. Dieser besitzt ebenfalls zwei Kanäle, von denen allerdings nur einer benötigt wird, was eine Updaterate von 2,8 MS/s erlaubt. Auch er wird über USB angesprochen und über einen Computer gesteuert.

Das FPGA Board ist mit einem Xilinx Spartan-3E FPGA bestückt, der ein FPGA mit 500.000 Gates ist. Dieser ist direkt mit einem 14 Bit ADC mit zwei Kanälen verbunden.²¹ Dieser besitzt einen einstellbaren Vorverstärker und kann Messungen im Bereich zwischen 0 und 3,3 V durchführen. Die Zeit zwischen zwei Samples liegt dabei bei 39 ns, die Abtastfrequenz beträgt also ungefähr 25 MHz.

¹⁸ Nach: 10 Gründe für den Einsatz von NI ELVIS II 23.11.11

¹⁹ Nach: Integrated Suite of 12 Instruments for Hands-On, Multidiscipline Education 23.11.11

²⁰ Nach: FPGA Board Programmable with NI LabVIEW and Xilinx ISE Tools and Integrated with NI ELVIS II/II+ 23.11.11

²¹ Zwar ist in der Dokumentation ein 12 Bit ADC beschrieben, allerdings liegt hier ein Fehler vor. Die korrekte Angabe sind 14 Bit.

2.2.1.2. NI LabView²²

NI LabView ist eine Entwicklungsumgebung der Firma National Instruments zum Erstellen von Mess-, Prüf-, Steuerungs- und Regelsoftware. Die Programmierung erfolgt graphisch und das Programm wird als Flussdiagramm dargestellt. Aktionen sind als Blöcke abgebildet, Informationen als Datenströme und damit als Linien dargestellt. Ein Beispiel für ein solches Programm ist bei Abb. 3 zu sehen. Bei der Programmierung mit LabView erstellt man sogenannte Virtual Instruments, oder kurz VIs. Diese dienen der Steuerung von Messgeräten oder der Regelung von Geräten. So sind beispielsweise die Geräte auf dem NI Elvis teilweise einzig über VIs ansprechbar. Beispiele dafür sind das Oszilloskop oder der ARB-Generator. Zusätzlich zu der Unterstützung für verschiedene Messgeräte besitzt der NI LabView viele integrierte Möglichkeiten Daten darzustellen. Dazu gehören verschiedene Darstellungsformen, wie beispielsweise Diagramme.

2.2.2. Die Pulssimulation

Die Pulssimulation im Praktikumsversuch erfolgt über den auf dem NI Elvis integrierten ARB-Generator. Dazu existiert ebenfalls eine VI für den ARB-Generator, die Dateien des NI-eigenen Waveform-Typs *.wdt* fordert. Das Konzept ist also, eine kurze Sequenz zu generieren, die dann als Detektorsignal immer wieder eingespeist wird. Dazu wurde in LabView die in Abb. 3 dargestellte Routine erstellt.

²² Nach: Was ist NI LabView? 23.11.11

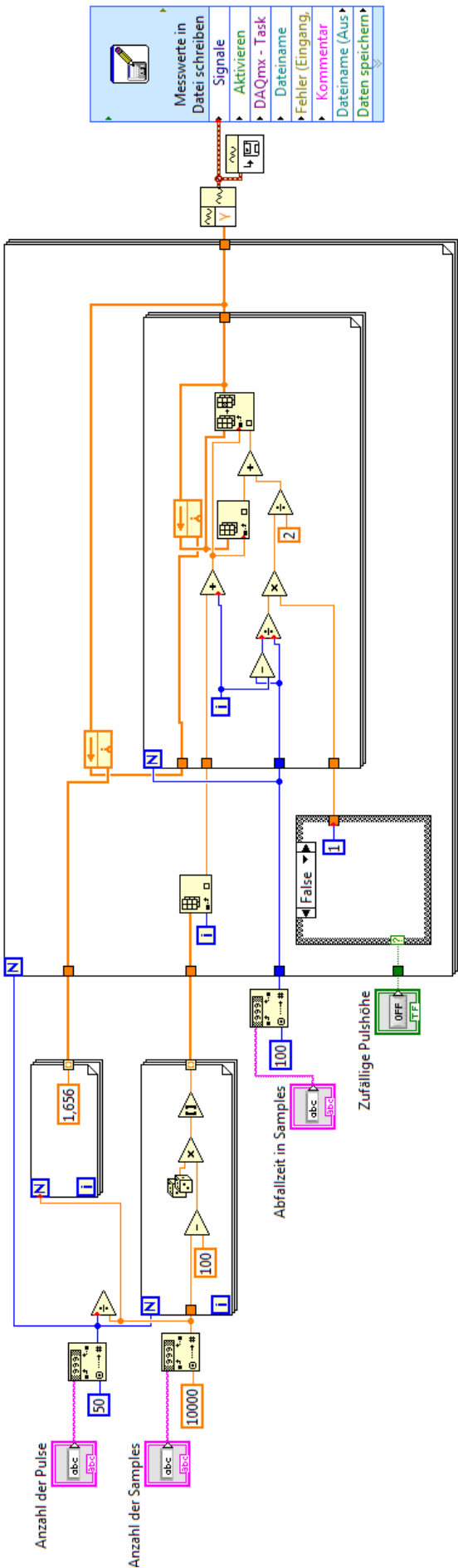


Abb. 3: Routine zum Generieren einer Pulssequenz

Die Routine hat die Aufgabe eine bestimmte Pulssequenz zu erzeugen. Die Eingaben dafür sind die Gesamtzahl der Samples (Pink am linken Bildrand angegeben, im Beispiel 10.000), die Gesamtzahl der Pulse (Pink am linken Bildrand angegeben, im Beispiel 50), sowie die Anzahl der Samples, auf denen jeder Puls abfallen soll (Pink in der Nähe der Bildmitte angegeben, im Beispiel 100), die ein Maß für die Abfallzeit darstellt. Weiterhin kann man einstellen, ob alle Pulse dieselbe Anfangshöhe besitzen sollen, oder ob diese variieren soll. (Grüne Schaltfläche unten in der Mitte des Bildes)

Zum Erstellen der Sequenz wird zuerst eine leere Sequenz generiert, sowie die Position der Pulse in der Sequenz zufällig bestimmt. Danach wird jeder der Pulse auf der Sequenz samt seiner Abfallzeit verzeichnet. Dabei ist die Abfallzeit konstant, allerdings kann die Amplitude der Pulse variieren. Da die Amplitude, wie schon weiter oben erwähnt, proportional zur Energie ist, ist das gleichbedeutend mit einer variierenden Teilchenenergie.

Wichtig ist, dass in der Datei zusätzlich ein Offset von +1,656 V hinzugefügt wird. Dieser ist für den ADC nötig und kann als virtuelle Masse betrachtet werden. Damit ist diese Veränderung auch für den Filter unwichtig und kann bei seiner Betrachtung vernachlässigt werden.

Als Ausgabe entstehen eine *.wdt*-Datei, sowie eine menschenlesbare Logdatei, die ebenfalls die Werte repräsentiert. Man kann diese Werte in einem Diagramm auftragen, um die Sequenz zu visualisieren. Ein Beispiel für eine solche Sequenz ist in Abb. 4 zu sehen.

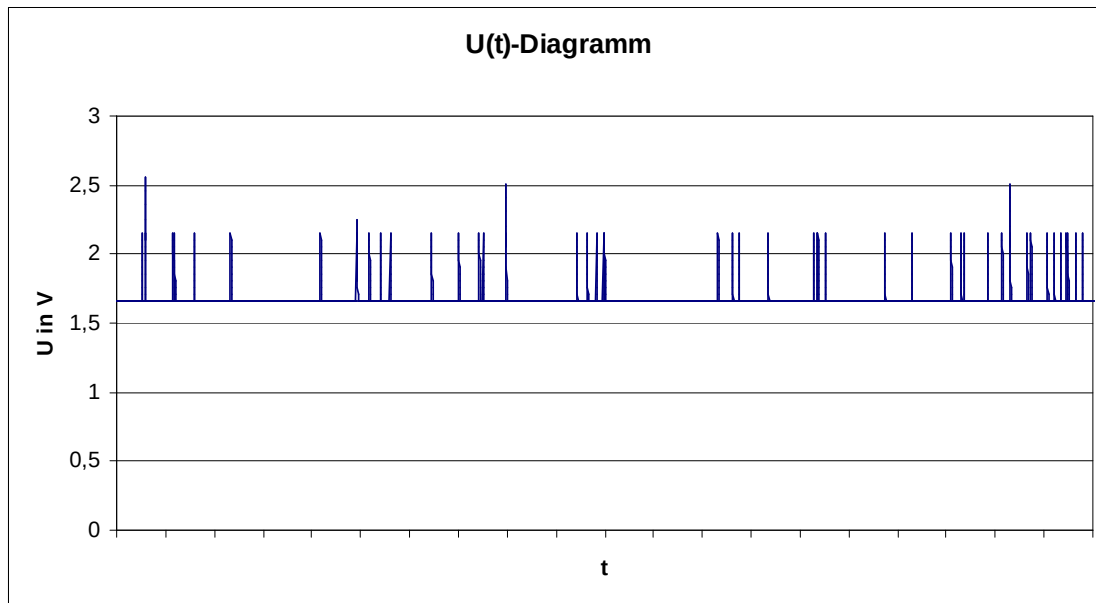


Abb. 4: Eine Sequenz von Spannungswerten nach der Zeit aufgetragen. Jeder Teilstrich auf der x-Achse symbolisiert 500 Samples.

Für die technische Kompatibilität ist es wichtig, dass die erzeugte Ausgabedatei in der Zeitachse einheitenlos ist und nur aus Samples besteht. Die Skalierung kommt erst im eigentlichen ARB-Generator, also in der letzten Stufe vor dem NI Elvis hinzu. Jeder Puls hat in der Datei eine Anfangshöhe zwischen 0 und 0,5, auf den ein linearer Abfall folgt. Pulse mit einer Höhe, die größer als 0,5 sind, kommen durch das Pile-Up zustande. Wie in Abb. 4 an verschiedenen Stellen zu erkennen ist, kommt es bei den Pulsen zu einem Pile-Up. Dabei entsteht auf der abfallenden Flanke eines Pulses ein neuer, steiler Anstieg. Der darauf folgende Abfall ist dann ebenfalls stärker als davor.

Die Datei wird nun im ARB-Generator entsprechend eingestellt, dass die Pulse eine Abfallzeit von 10 μ s besitzen. Damit sind sie deutlich langsamer als die eigentlichen Pulse im Flüssigargonkalorimeter. Diese Skalierung ist allerdings sinnvoll, da die genutzten Messgeräte nicht für eine deutlich höhere Geschwindigkeit ausgelegt sind und auch das Erstellen der Pulse mit deutlich höherer Geschwindigkeit nicht mehr mit einer sinnvollen Genauigkeit möglich wäre. Diese Skalierung ändert jedoch nichts an dem eigentlichen Prinzip. Sie muss nur in allen weiteren Schritten beachtet werden. Dabei ist speziell die Filterung wichtig, da diese auf einer konkreten Frequenz arbeitet. Es ist nicht lohnenswert für den Versuch, deutlich bessere Technik zu verwenden, da diese weit teurer und schwerer zu bedienen wäre und eine Darstellung in Originalgeschwindigkeit keinen großen Vorteil birgt.

2.2.3. Der Bandpassfilter

2.2.3.1. Wahl des Filters

Der für den Praktikumsversuch ausgewählte Filter wurde im Vergleich zu dem bereits beschriebenen, am Flüssigargonkalorimeter verwendeten Filter deutlich vereinfacht. Anstelle des CR-(RC)² Filters wird ein RC-CR Filter genutzt. Abb. 5 zeigt einen Schaltplan des aufgebauten Filters.

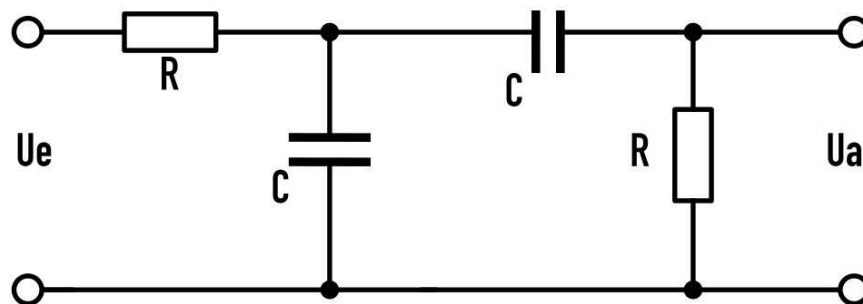


Abb. 5: Schaltplan des verwendeten Bandpassfilters²³

Die Grenzfrequenz der Filter ist gegeben durch

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Da die Impulse eine Abfallzeit von 10 μ s besitzen, kann man betrachten, dass sie eine Frequenz von 100 kHz haben. Zur Vereinfachung werden folglich beide Filter auf eine Grenzfrequenz von ca. 100 kHz eingestellt. Dazu wurden für den RC-Filter die Werte $R = 160\Omega$ und $C = 10nF$ gewählt. Der CR Filter nutzt einen Widerstand mit $R = 1,6k\Omega$ und einen Kondensator mit $C = 1nF$. Für die Grenzfrequenz f_c jedes der beiden Filter gilt nun:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Damit ergibt sich für beide Filter eine Grenzfrequenz von 99,5 kHz. Dies ist für die benötigte Genauigkeit vollkommen ausreichend.

²³ Zusammengesetzt aus: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/Hochpass.svg> und <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Tiefpass.svg> beide 23.11.2011

2.2.3.2. Analyse des Filters

Zur Analyse des aufgebauten Filters wird zuerst der ideale theoretische Filter betrachtet. Es gilt im Folgenden: $i^2 = -1$, sowie $\omega = 2\pi f$.

Für den Widerstand eines Kondensators gilt:

$$R_C = \frac{1}{i\omega C}$$

Für den RC-Filter gilt nun nach Spannungsteilerformel:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{\frac{1}{i\omega C}}{\frac{1}{i\omega C} + R} = \frac{1}{1 + i\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} e^{-i \arctan(\omega RC)}$$

Analog gilt für den CR-Filter:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{R}{\frac{1}{i\omega C} + R} = \frac{1}{1 - i\frac{1}{\omega RC}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} e^{-i \arctan\left(-\frac{1}{\omega RC}\right)} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - \arctan(\omega RC)\right)}$$

Der Bandpassfilter lässt sich nun als Produkt dieser beiden Filter darstellen. Es folgt für den gesamten Filter also:

$$\frac{U_a}{U_e} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega RC}\right)^2}} e^{i\left(\frac{\pi}{2} - 2 \arctan(\omega RC)\right)}$$

Der Realteil dieser Formel gibt die durch den Filter erzielte Verstärkung an. Dabei ist von Verstärkung zu sprechen, da die Werte zwischen 0 und 1 liegen. Die Phasenverschiebung, die durch den Filter erzielt wird, liegt bei $\frac{\pi}{2} - 2 \arctan(\omega RC)$.

Abb. 6 zeigt die berechnete Verstärkung des Filters im Vergleich mit den gemessenen Werten.

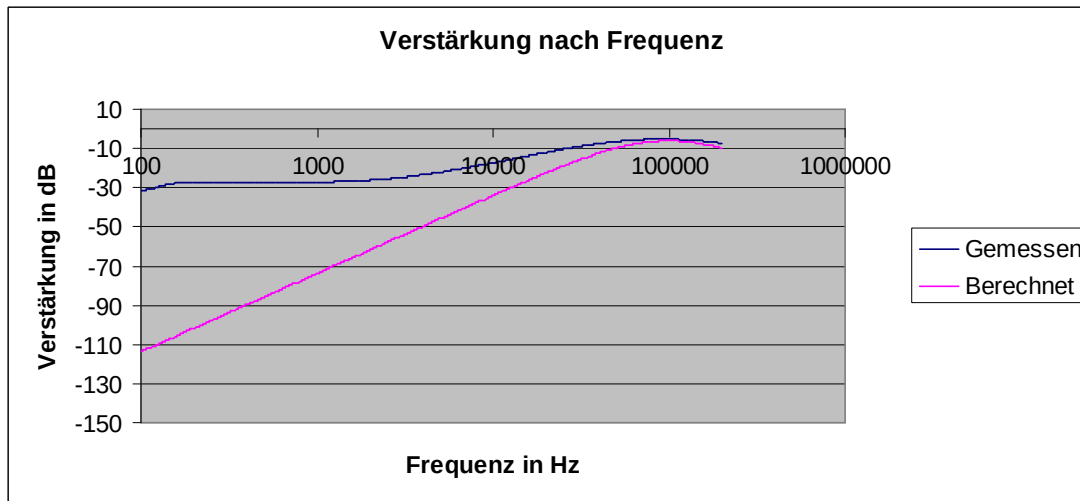


Abb. 6: Verstärkung in Abhängigkeit von der Frequenz

Man erkennt, dass die berechnete Dämpfung deutlich stärker als die tatsächlich gemessene ist. Allerdings weisen beide einen ähnlichen Kurvenverlauf auf, der den typischen Charakteristika eines Bandpassfilters entspricht. Beide haben ein Maximum der Verstärkung bei ungefähr 100 kHz. Betrachtet man die genauen Wertetabellen, so erhält man für den berechneten Filter ein Maximum bei ca. 99 kHz und für den realen bei 92 kHz. Beide Filter dämpfen Frequenzen, die höher oder niedriger sind deutlich stärker als ihre Grenzfrequenz. Die Unterschiede zwischen den Filtern sind dadurch bedingt, dass der reale Filter auch nur reale Bauteile verwendet. Diese können nicht dieselbe Genauigkeit wie die idealen Bauteile erreichen. Zudem ist der Filter belastet. Der erste Filter ist deutlich stärker belastet als der zweite, da er mit einem größeren Widerstand ausgestattet ist. Dadurch ist die tatsächliche Filterung etwas anders als die berechnete. Zwar ist es möglich auch belastete Filter zu berechnen, es bringt aber keinen großen weiteren Vorteil für die Untersuchung.

Genauso wichtig wie die Betrachtung der Frequenz, ist die Betrachtung der Phasenverschiebung. Abb. 7 zeigt die Phasenverschiebung in Abhängigkeit des Winkels.

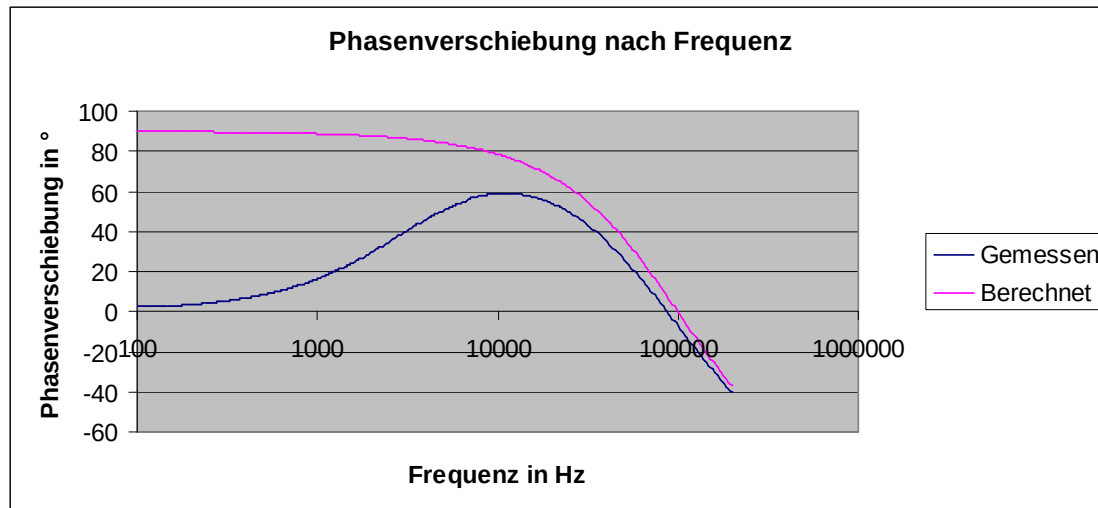


Abb. 7: Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz

Man erkennt, dass es deutliche Unterschiede zwischen der berechneten und der gemessenen Phasenverschiebung gibt. Die gemessene Phasenverschiebung wächst im kleinen Spannungsbereich erst und erreicht bei ca. 10 kHz mit ungefähr 60° ihr Maximum. Die berechnete Phase beginnt bei 90° und fällt ab da immer weiter ab. Dadurch kommt es dazu, dass sich die berechnete und tatsächliche Phasenverschiebung für hohe Frequenzen immer weiter annähern. Auch für diese Abweichung ist als Grund der reale Filter zu sehen. Allerdings ist auch die Messgenauigkeit begrenzt, da eine sehr starke Dämpfung eine hohe Rauschempfindlichkeit nach sich zieht. Wieder wurde für die Rechnung ein theoretischer, unbelasteter Filter betrachtet. In der Realität ist der erste Filter jedoch deutlich belastet. Diese Belastung ist sogar noch erhöht, da der zweite Filter einen deutlich kleineren Widerstand besitzt, als der erste. Sehr gut ist dies in Abb. 8 zu erkennen, die die Phasenverschiebung im Bereich von 0 bis 200 Hz zeigt.

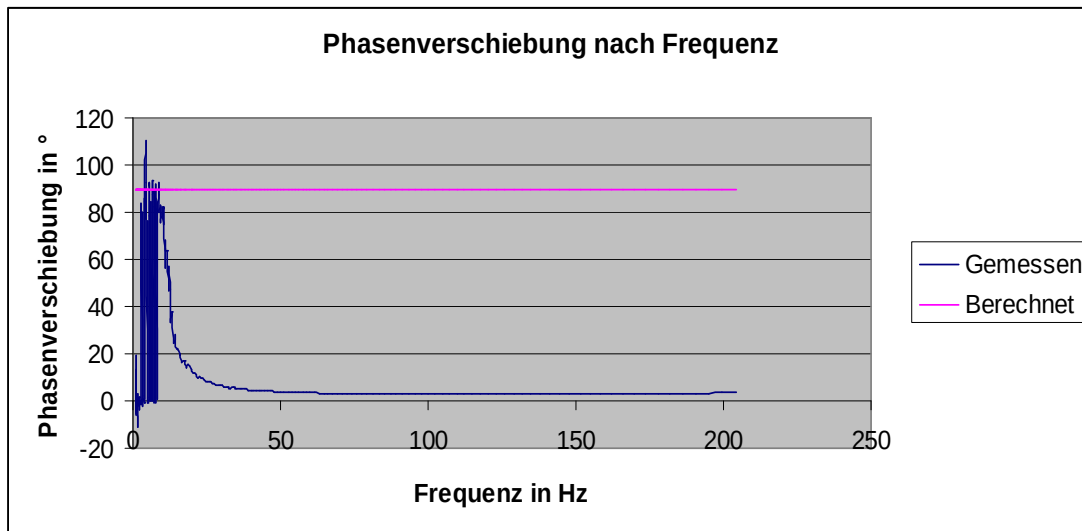


Abb. 8: Phasenverschiebung in Abhängigkeit von der Frequenz zwischen 0 und 200 Hz

Man erkennt, dass vor allem im sehr kleinen Frequenzbereich bis ca. 10 Hz sehr starke Sprünge in der Phasenverschiebung auftreten. Diese sind eindeutig als Messfehler zu sehen. Danach tritt ein Abfall von einer Verschiebung von ca. 90° bis zu einer Verschiebung von nur wenigen Grad auf. Erst darauf folgt der in Abb. 7 zu erkennende Anstieg. Auch dieser Effekt zeigt gut den Einfluss der realen Bauteile auf den Filter. Diese Randeffekte haben geringen Einfluss auf den eigentlichen Versuch, da die Signale dort deutlich schneller sind, allerdings ist der Vollständigkeit halber wichtig, sie aufzuführen.

Wichtig ist das Eingangssignal mit dem umgeformten Signal zu vergleichen. Dieser Vergleich ist graphisch in Abb. 9 dargestellt.²⁴

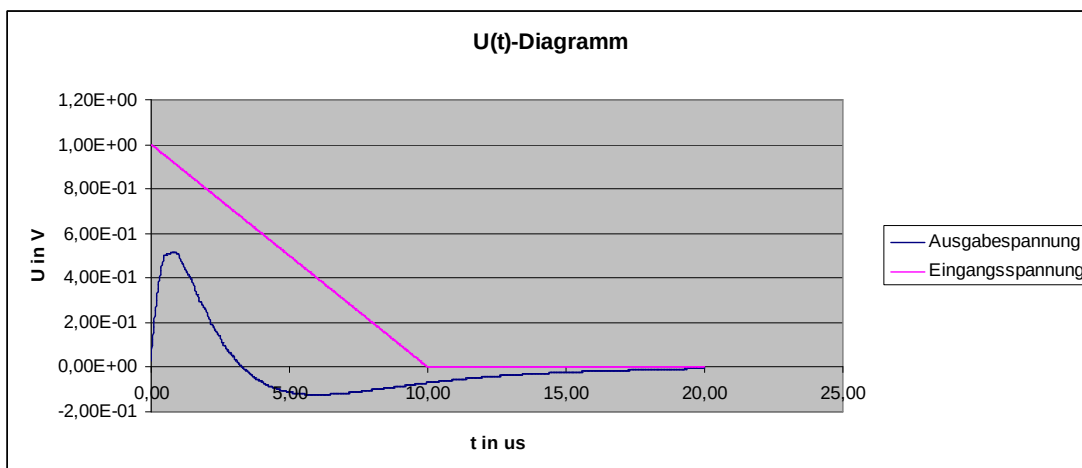


Abb. 9: Spannungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit betrachtet.

²⁴ Leider gibt es für den Spannungsverlauf nach dem Filter keinen einfachen analytischen Ausdruck, dessen Angabe hier Sinn machen würde. Zwar lässt er sich theoretisch berechnen, allerdings nur durch enorm komplexe Integrale. Dementsprechend ist auch im offiziellen Paper zur Filtertechnik des Flüssigargonkalorimeters keine solche Funktion angegeben.

Das umgeformte Signal ähnelt der anfangs geplanten Form. Vergleicht man die Formen aus Abb. 9 und Abb. 2, so stellt man fest, dass im Original des LHC sowohl das Peak etwas kürzer, als auch der zweite Teil im negativen Spannungsbereich etwas länger sind. Dies liegt an den Unterschieden zwischen dem im Flüssigargonkalorimeter verwendeten CR-(RC)² Filter und dem im Versuch verwendeten RC-CR Filter. Allerdings erfüllt der Filter im Versuch das Ziel, ein Pile-Up möglichst gut zu verhindern. Dazu ist es möglich, ein numerisches Integral über einen Puls zu bilden. Diese liegt bei ca. $1,6 \cdot 10^{-5}$ Vs und ist damit ausreichend klein.

Die verschiedenen Betrachtungen des Filters zeigen, dass er für die Aufgabe im Praktikumsversuch geeignet ist. Für eine Anwendung im Detektor ist er aus verschiedenen Gründen nicht ideal. Zum einen ist die Dämpfung mit etwa 6 dB für die Signale nicht optimal. Man könnte mit einem besser konfigurierten Filter ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis erreichen. Zudem sollte für einen Einsatz im Detektor das Integral möglichst noch näher an 0 liegen. Allerdings ist solch eine feine Kalibrierung für den Praktikumsversuch nicht sinnvoll, da sie den Versuch deutlich komplizierter gestalten würde. Auch der Einsatz von Operationsverstärkern wäre zu überlegen, ist allerdings für den Versuch ebenfalls nicht sinnvoll, da sie im Original nicht verwendet werden. Sie würden eine Herausforderung in anderen Bereichen darstellen, die für den Versuch nicht praktisch ist.

2.2.4. Die Digitalisierung und Verarbeitung durch den FPGA

Der ADC ist mit einem Messbereich von 3,3 V angegeben.²⁵ Allerdings liegt sein tatsächlicher Messbereich nur zwischen 0,406 V und 2,906 V. Da durch die Umformung des Signals auch negative Werte vorkommen können, ist es nötig, ein Offset hinzuzufügen. Im realen Detektor könnte man dafür eine virtuelle Masse verwenden. Allerdings ist es auch in diesem Punkt sinnvoll im Versuch eine Alternative zu verwenden. Hierfür wird statt der virtuellen Masse bereits beim Generieren der Pulse ein Offset um exakt 1,656 V hinzugefügt, also genau bis zur

²⁵ Siehe: FPGA Board Programmable with NI LabVIEW and Xilinx ISE Tools and Integrated with NI ELVIS II/II+ 23.11.11

Mitte des Messbereichs. Dieser wird nach der Messung digital wieder entfernt, wodurch auch negative Werte zustande kommen können.

Zum Auslesen der Daten war angedacht, LabView zu verwenden. Dabei nutzt man eine LabView-Routine zum Auslesen des FPGA und eine weitere, um den FPGA anzusprechen. Dadurch, dass man die Daten über LabView transportiert, bekommt man die Möglichkeit, sich die Messungen des ADC am Computer anzuschauen. Da im Praktikumsversuch die Nachverfolgbarkeit möglichst hoch sein sollte, ist das sinnvoll.

Im FPGA wird analog zum Original ein FIR-Filter implementiert. Dieser berechnet aus einer Reihe von aufeinander folgenden Daten mittels deren Gewichtung eine Energie. Diese wird nun wieder durch LabView ausgelesen und visualisiert.

Im Flüssigargonkalorimeter werden ungefähr 25 Messpunkte auf einem Puls erreicht. Im Versuch sollte also eine mindestens genauso hohe Anzahl erreicht werden. Betrachten wir eine Pulslänge von $10\text{ }\mu\text{s}$, so bedeutet das eine Samplerate von 25 MS/s. Da der ADC eine weit höhere Samplerate besitzt, müsste das problemlos möglich sein. Allerdings zeigt der praktische Versuch, dass der ADC mit dem aktuellen Aufbau nicht schneller als alle 10 ms einen Messwert ausgeben kann, was nur 100 S/s entspricht. Bei schnelleren Messungen werden fehlerhafte Daten ausgegeben.

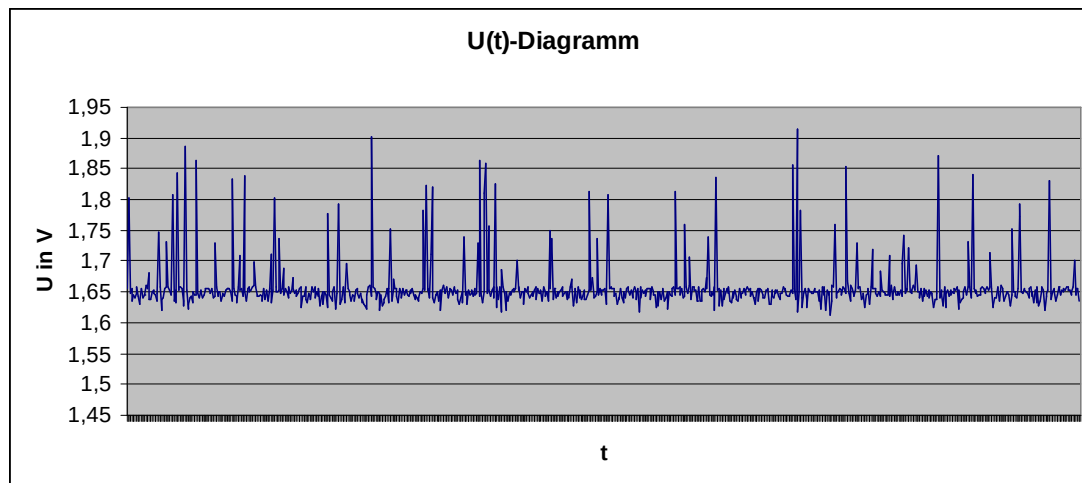


Abb. 10: Messdaten des ADC. Eine genaue zeitliche Datierung ist nicht möglich.

Man erkennt deutlich, dass die Werte enorm springen und keine Regelmäßigkeit aufweisen. Gemessen wurde dabei eine Sequenz von Pulsen mit einer Länge von je $10\text{ }\mu\text{s}$. Die Pulse wurden durch den Filter umgeformt. Eine Messung mit einem digitalen Oszilloskop hat gezeigt, dass die entstehende Sequenz dem entspricht, was man aus der Analyse des Filters erwarten würde. Gemessen werden sollte jede

Mikrosekunde einmal. Damit müssten in einer Sekunde 1.000.000 Messwerte entstehen. Allerdings hat ein Durchlauf von einigen Sekunden nur die in Abb. 10 gezeigten 827 Datenpunkte erzeugt. Diese Datenpunkte entsprechen mit großer Sicherheit keiner kontinuierlichen Folge von Punkten, da sie dafür zu große Sprünge aufweisen. Es ist deutlich wahrscheinlicher, dass mit einer weit zu geringen Geschwindigkeit gemessen wurde.

Neben einer Fehlfunktion in LabView oder dem ADC kann man als Fehler in Betracht ziehen, dass die Übertragung an einer Stelle nicht schnell genug sein könnte. Jeder Messwert des FPGA hat eine Länge von 14 Bit. Zur Vereinfachung werden in der nachfolgenden Betrachtung Datenpunktgrößen von 2 Byte angenommen. Folglich müssen pro Sekunde 2.000.000 Byte, also knapp 2 MB, vom FPGA zum Computer gesendet werden. Da der FPGA über ein USB 2.0 Interface angebunden ist, sollte an dieser Stelle kein Problem liegen.

Jeder Datensatz wird in eine Zeile eines Textdokuments gespeichert. Als Kodierung wird dabei ANSI verwendet, also ein 8 Bit Codec. Der Header ist in seiner Größe vernachlässigbar. Jede Zeile besteht aus einem Tab, 8 Zeichen, sowie einem Zeilenumbruch und folglich also aus 10 Zeichen des Codecs. Sie benötigt also 10 Byte. Damit müssen pro Sekunde 10 MB auf eine Festplatte geschrieben werden. Auch diese Geschwindigkeit sollte beim aktuellen Stand der Technik nicht problematisch sein.

Als wahrscheinlichste Ursache für das Problem ist die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung in LabView zu nennen. Im Allgemeinen gibt man an, dass mit einer Programmiersprache wie beispielsweise C++ eine einfache Schleife etwa 10.000.000-mal pro Sekunde durchlaufen werden kann.²⁶ Allerdings bestehen schon zwischen verschiedenen Programmiersprachen deutliche Geschwindigkeitsunterschiede. So geht man davon aus, dass C++ etwa die zehnfache Geschwindigkeit von Python erreicht. Graphische Programmierumgebungen wie LabView sind meist noch deutlich langsamer. Nehmen wir also 1.000.000 Datensätze pro Sekunde an, so benötigen wir genauso viele Schleifendurchläufe. Da die Schleife recht komplex ist und zudem LabView vermutlich relativ langsam, übersteigt die nötige Berechnungszeit weit eine Sekunde. Damit ist eine

²⁶ Die Angabe ist eine Faustregel aus dem USACO-Training. Sie gilt primär für die Sprachen C, C++ und Pascal. Zwar ist sie an sich für einen etwas älteren Rechner gedacht, allerdings dient die Zahl auch nur um eine Größenordnung einschätzen zu können. (Complete Search 06.12.11.)

Datenverarbeitung in Echtzeit nicht mehr möglich. Das Ergebnis entsteht dann durch die Art, mit der LabView mit Überläufen umgeht. Allerdings bleibt auch bei dieser Erklärung die Frage, warum LabView nur etwa 100 Datensätze pro Sekunde behandeln kann, da dies sehr langsam ist.

Eine Möglichkeit zur Lösung des Problems ist die direkte Anbindung des ADC an den im FPGA implementierten FIR-Filter ohne LabView als Zwischenstufe. Da der FIR-Filter allerdings nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, wird an dieser Stelle die Lösungsstrategie nicht weiter betrachtet. Weiterhin könnte man die Geschwindigkeit der Pulse deutlich senken. Um die gewünschte Zahl von 25 Samples zu erhalten, müssten die Pulse eine Länge von ca. 250 ms haben. Diese Geschwindigkeit wäre so enorm skaliert, dass sie nicht mehr ausreichend viel Ähnlichkeit mit den Originalimpulsen besitzen würde.

2.3. Zusammenfassung und Ausblick

Bisher wurden alle Stufen des Praktikumsversuchs bis einschließlich zur Digitalisierung der Daten betrachtet. Diese bestanden aus der Simulation der Daten, der Umformung der Pulse, sowie der Digitalisierung. Dabei funktionieren sowohl die Simulation als auch die Umformung wie gewünscht. Die Digitalisierung funktioniert nur teilweise, allerdings ist die Lösung des Problems vermutlich durch eine direktere Verbindung mit dem nachfolgenden Teil, der digitalen Auswertung, zu finden, der in dieser Arbeit nicht betrachtet wird. Leider sind die restlichen Teile des Versuchs noch nicht fertig, weshalb an dieser Stelle ein kurzer Ausblick darüber gegeben wird, wie diese aussehen sollten.

Im FPGA soll ein FIR-Filter implementiert werden, der die Energien der Pulse berechnet. Zudem soll der FPGA entscheiden, wann vermutlich ein Puls stattgefunden hat. Diese Energien samt den Zeitpunkten werden dann durch LabView ausgelesen. LabView erstellt aus diesen Energien ein Diagramm, das die Energieverteilung zeigt, sowie ein Diagramm, das die Zeitpunkte der Impulse zeigt. Diese Daten kann man dann mit den eingegebenen Daten vergleichen. Als weiteren Ausblick wäre es möglich, alle für den Versuch benötigten Elemente in einem Front-End zu vereinen. Das bedeutet, dass die Simulation, der ARB-Generator, das Oszilloskop, sowie die Auslese der Daten aus dem FPGA in einer LabView-VI

Jannes Münchmeyer

zusammengefasst werden. Damit hätte man eine einfache Bedienbarkeit und eine gute Übersichtlichkeit erreicht.

Schlusswort

In dieser Arbeit wurde der Aufbau eines Praktikumsversuchs betrachtet. Man kann resümieren, dass die anfangs gesetzte Zielstellung der Arbeit dabei erreicht wurde. Sowohl die Pulssimulation, als auch die Filtertechnik funktionieren den Ansprüchen entsprechend. Dabei bilden sie durchaus eine Abstraktion zu den im LHC verwendeten und erreichen so das nötige Maß an Einfachheit. Die Digitalisierung funktioniert prinzipiell auch, muss aber in der Geschwindigkeit noch gesteigert werden. Ein wichtiger Punkt, der das Voranschreiten der Arbeit verzögert hat, war die fehlerhafte Dokumentation des FPGA-Boards. Dort war der 14 Bit ADC als 12 Bit ADC verzeichnet und sein Messbereich falsch angegeben. Dabei kann man ohne weiteres auf dem Bauteil selbst oder in der Dokumentation des ADC, nicht aber der des FPGA-Boards, die richtige Konfiguration nachlesen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Besonderen Lernleistung unterstützt haben. Zuerst möchte ich hierbei meinem Lehrer Herrn Winkler danken, der für mich den Kontakt zum IKPT aufgebaut und mir so die Arbeit dort ermöglicht hat. Weiterhin möchte ich meinem externen Betreuer Herrn Professor Straessner danken, der bei der Organisation der Arbeit vor Ort geholfen und zudem fachliche Hilfe geboten hat. Auch Andreas Meyer, der mich am IKTP stark in technischer Hinsicht unterstützt hat, möchte ich danken. Zudem möchte ich Herrn Xylander persönlich erwähnen, der sich kurzfristig dazu bereit erklärt hat, als interner Betreuer meiner BeLL zu fungieren. Als letztes danke ich meinen Eltern dafür, dass sie mich während der gesamten BeLL-Zeit unterstützt haben.

Literaturverzeichnis

Textquellen:

- Stärtz: Development of Digital Signal Processing with FPGAs for the Readout of the ATLAS Liquid Argon Calorimeter at HL-LHC. IKTP Dresden. Dresden 2010.
- U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiterschaltungstechnik. Dritte, neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg 1974.
- Large Hadron Collider. http://de.wikipedia.org/wiki/Large_Hadron_Collider 22.11.11
- CERN releases analysis of LHC incident. <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2008/PR14.08E.html> 22.11.11
- LHC sets new record – accelerates beam to 3.5 TeV. <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2010/PR05.10E.html> 22.11.11
- LHC. ATLAS-Detektor. <http://www.lhc-facts.ch/index.php?page=atlas> 22.11.11
- Field Programmable Gate Array. http://de.wikipedia.org/wiki/Field_Programmable_Gate_Array 23.11.11
- 10 Gründe für den Einsatz von NI ELVIS II. <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7271> 23.11.11
- Integrated Suite of 12 Instruments for Hands-On, Multidiscipline Education. http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_nielvisii_plus.pdf 23.11.11
- FPGA Board Programmable with NI LabVIEW and Xilinx ISE Tools and Integrated with NI ELVIS II/II+. http://www.ni.com/pdf/products/us/cat_defpga.pdf 23.11.11
- Was ist NI LabView?. <http://www.ni.com/labview/whatis/d/> 23.11.11
- Tiefpass. <http://de.wikipedia.org/wiki/Tiefpass> 25.11.11
- Complete Search. <http://ace.delos.com/usacogate> 06.12.11 (nur durch Einloggen sichtbare Information)

Bildquellen:

- http://courses.washington.edu/partsym/Img/atlas_schematic.jpg 22.11.11
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Tiefpass.svg> 22.11.11
- <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5a/Hochpass.svg> 22.11.11