

Department of Physics and Astronomy
University of Heidelberg

Bachelor Thesis
in Physics
submitted by
Bernard Epp
born in Heidelberg, Germany

January 2016

**Charakterisierung und Vergleich von zwei ADC-Modulen
für das Brainscales Hardware System**

**This Bachelor Thesis has been carried out by Bernard Epp at the
KIRCHHOFF-INSTITUTE FOR PHYSICS
RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG
under the supervision of
Prof. Dr. Karlheinz Meier**

Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird das kommerziell erhältliche ADC-System *Red Pitaya* untersucht und mit dem aktuell im Brainscales Hardware System verwendeten Analog Readout Module (AnaRM) verglichen. Ziel ist es zu prüfen, ob sich *Red Pitaya* als ADC-System eignet und AnaRM ersetzen könnte.

Mit einer Auflösung von 14 Bit, einer Abtastrate von 125 MS/s und einem Eingangsbereich von ± 1 V scheint *Red Pitaya* den Anforderungen zu genügen. Der Xilinx Zynq 7010 Chip bietet außerdem ein FPGA, mit dem individuelle Anwendungen umgesetzt werden können. Die Messwerte können über eine 1 Gigabit Ethernet Schnittstelle übertragen werden. Für eine genauere Untersuchung wurden in dieser Arbeit aber noch vergleichende Messungen durchgeführt.

Zusammenfassend scheint sich *Red Pitaya* als ADC-System zu eignen. Die Ethernet Schnittstelle von *Red Pitaya* ist ein echter Vorteil. Allerdings wurde bei dem Gerät auch ein Störsignal entdeckt, welches Messungen beeinflussen kann. Ansonsten sind die gemessenen Unterschiede gering.

Diese Arbeit soll bei der Entscheidung über das zukünftige ADC-Modul im Brainscales Hardware System helfen.

Abstract

This thesis evaluates the commercially available ADC system *Red Pitaya* and compares it to the existing Analog Readout Model (AnaRM) of the Brainscales Hardware System. The objective is to verify if *Red Pitaya* is convenient as an ADC system and can therefore replace AnaRM in the current setup.

With an resolution of 14 Bit, a sample rate of 125 MS/s and an input range of ± 1 V *Red Pitaya* seems to satisfy the requirements. The Xilinx Zynq 7010 Chip also offers a FPGA for individual applications. The measured data can be read out through an 1 Gigabit Ethernet interface. Comparative measurements were performed to get a more detailed analysis.

In a summary, *Red Pitaya* seems to meet the requirements. The Ethernet interface is an evident advantage. However, an interference signal has been detected, produced by the device, which might influence measurements. Apart from that the differences are marginal.

Overall this thesis is supposed to help with the decision of the future ADC module in the Brainscales Hardware System.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Das Brainscales Hardware System	1
1.2	Motivation	1
1.3	Grundlagen	2
1.3.1	Analog-Digital-Wandler	3
2	Red Pitaya	5
2.1	Überblick Red Pitaya	5
2.2	Inbetriebnahme	7
2.2.1	Kühlung	7
2.3	Kalibrierung	8
2.3.1	Rauschen Sourcemeter	8
2.4	Frequenzgang	11
2.5	Kennlinie	11
2.6	Kontinuierliche Datenaufnahme	13
3	Das Analog Readout Module (AnaRM)	15
3.1	Flyspi FPGA PCB (Flyspi)	15
3.2	Analog Frontend PCB (AnaFP)	16
3.3	Inbetriebnahme	16
3.4	Kalibrierung	16
3.5	Kennlinie	18
4	Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM	21
4.1	Statische Kenngrößen	21
4.2	Temperaturabhängigkeit	23
4.3	Rauschen	27
4.3.1	Rauschfreie Quelle 1	27
4.3.2	Rauschfreie Quelle 2 und faradayscher Käfig	29

Inhaltsverzeichnis

4.4 Crosstalk	34
4.4.1 Red Pitaya	34
4.4.2 AnaRM	35
5 Diskussion	38
6 Ausblick	41
A. Literaturverzeichnis	43
B. Abkürzungen	47
C. Danksagung	49
D. Erklärung	51

1 Einleitung

1.1 Das Brainscales Hardware System

Neuromorphe Hardwaresysteme emulieren neuronale Netze deutlich effizienter als herkömmliche Computersimulationen [12]. Die Emulationen sind schneller, verbrauchen deutlich weniger Energie und die analogen Schaltungen ermöglichen eine kontinuierliche Arbeitsweise im Gegensatz zu den geläufigen, getakteten Computern [12], [3].

Oft werden dazu aber präzise definierte Neuronenparameter benötigt um die Funktion der Schaltung zu garantieren. Eine Computersimulation führt immer zu dem gleichen Ergebnis. Dagegen kommt es aber bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen zu produktionsbedingten Variationen der einzelnen Transistoren. Das führt zu Abweichungen der Neuronenparameter. Diese Abweichungen erschweren die direkte Implementierung von neuronalen Netzwerken in Hardware. Die Arbeitsgruppe *Electron Visions(s)* der Universität Heidelberg ist Teil des europäischen *Human Brain Projects*. Das von der Gruppe entwickelte Brainscales Hardware System [4] ermöglicht die Kalibrierung der meisten Schaltungen und damit die Anpassung der Parameter einzelner Neuronen. Für die Funktionstüchtigkeit der analogen neuromorphen Hardware ist eine präzise und effiziente Kalibrierung von entscheidender Bedeutung [12]. Das Kernstück der neuromorphen Hardware bilden Wafer mit bis zu 384 High Input Count Analog Neural Network (HICANN) Chips. Diese sind in 48 Retikeln von jeweils 8 Chips angeordnet. Ein Wafer liefert letztendlich 96 analoge Ausgangssignale zwischen 0 und 0,9 V bei einem 50 Ω Treiber. Diese werden für die Kalibrierung mit Analog-Digital-Wandler (engl. *analog-to-digital-converter*, ADC) weiterverarbeitet. Die ADC's werden außerdem benötigt um die Membranspannungen von Neuronen bei Experimenten zu visualisieren [12].

1.2 Motivation

Wie zuvor beschrieben werden für das Brainscales Hardware System Analog-Digital-Wandler benötigt, um die Signale der neuromorphen Hardware zu verarbeiten. Als ADC-System ist ein auf dem sogenannten *Flyspi* PCB [4] beruhender Aufbau vorgesehen. Die-

1 Einleitung

ses Analog Readout Module (AnaRM) weist aber Mängel am benötigten Vorverstärker auf. Dadurch kann nicht der gesamte dynamische Eingangsbereich des ADC genutzt werden [7]. Außerdem lässt sich mit einem dieser FPGA Module immer nur ein Signal gleichzeitig auslesen und die Datenübertragung verläuft über eine USB 2.0 Schnittstelle (40 MB/s, [4]). Gigabit Ethernet mit bis zu 117 MiB/s ist hier schneller [11]. Eine Ethernetschnittstelle für ein zukünftiges ADC-System fordert auch Eric Müller in seiner Doktorarbeit [10]. Damit ließen sich weitere Schaltungen (AnaRMAN [10]) einsparen, was den Aufbau weniger komplex und damit robuster werden lässt. Die momentane Auswertung der analogen Signale ist also nicht ideal. Die Aktualisierung des Moduls zu einem vereinfachten und leistungsfähigeren Aufbau würde aber einige Arbeitszeit in Anspruch nehmen.

Das Mess- und Kontrollinstrument *Red Pitaya* [14] ist kommerziell erhältlich und bietet ein ADC System welches die Aufgaben des AnaRM Aufbaus übernehmen könnte. Sollte sich dieses Instrument als geeignet erweisen wäre es sofort einsatzbereit. Damit hätte man das anspruchsvollere und zeitlich aufwendigere Umrüsten der AnaRM eingespart. Das neue ADC-System müsste möglichst folgenden Anforderungen genügen:

- ADC für Eingangssignale von 0 - 0,9 V bei 50 Ω Terminierung
- hohe Abtastrate ~ 125 MS/s
- kontinuierliche Datenaufnahme
- schnelle Datenübertragung (Gigabit Ethernet)
- schnell einsatzbereit, keine aufwendige Entwicklung
- kleine Abmessungen bei genügend Eingangskanälen

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Funktionalität des *Red Pitaya* Instruments zu untersuchen, die Vor- und Nachteile darzulegen und mit dem AnaRM Aufbau zu vergleichen. Das soll die Entscheidung für das zukünftige ADC-System der neuromorphen Hardware erleichtern.

1.3 Grundlagen

Die zum Verständnis und Anfertigen dieser Arbeit benötigten physikalischen und elektronischen Grundlagen entsprechen den Inhalten der gängigen Standardwerke [5], [1]. Dieser Abschnitt erhebt also nicht den Anspruch alle relevanten Inhalte, in redundanter Form, wiederzugeben. Der folgende Abschnitt gibt vielmehr einen Überblick über

ausgewählte Konzepte, mit denen sich der Autor beschäftigt hat, um diese Arbeit anfertigen zu können. Schließlich ist auch ein wesentlicher Teil dieser Bachelorarbeit die Einarbeitung in benötigte Arbeitsmethoden. Dazu hat sich der Autor umfangreich mit der Datenverarbeitung der Messwerte auf einem Linuxsystem mit selbst geschriebenen Pythonprogrammen beschäftigt.

1.3.1 Analog-Digital-Wandler

Ein Analog-Digital-Wandler (engl. *analog-to-digital-converter*, ADC) setzt ein kontinuierliches Eingangssignal in einzelne, diskrete Abtastwerte um. Diese werden dann als binär codierte Werte ausgegeben. Die Anzahl möglicher Ausgangswerte ist dabei begrenzt und durch die Auflösung festgelegt. Neben der Auflösung ist die maximale Abtastrate (engl. *sample rate*) eine der wichtigen Eigenschaften zur Charakterisierung von Analog-Digital-Wandlern [5]. Zu den sog. statischen Kenngrößen eines ADC gehören neben dem Nullpunkts- und Verstärkungsfehler, die eine Abweichung zur idealen Übertragungskennlinien beschreiben, die im Folgenden dargestellten Linearitätsfehler [5].

Least Significant Bit (LSB)

Das *least significant bit* (LSB) hat die niedrigste Bitposition innerhalb einer Binärzahl. Das LSB legt fest ob es sich bei einem binären Integer um eine gerade oder ungerade Zahl handelt. Ein ADC der Auflösung n ermöglicht Ausgabewerte D zwischen 0 und $2^n - 1$. Ein LSB bezeichnet hier die minimale Spannung die eine Änderung des Ausgabewertes verursacht. Bei einem idealen ADC gilt für ein LSB:

$$LSB = \frac{U_{FSR}}{2^n - 1} \quad (1.1)$$

U_{FSR} bezeichnet hier den vollen Bereich der Eingangsspannung (engl. *full scale range*) [20].

Integrale Nichtlinearität

Die integrale Nichtlinearität INL berechnet sich nach Gleichung 1.2[20]. Die INL bezeichnet den maximalen Abstand zwischen dem tatsächlichen Ausgangswert und dem idealen Ausgangswert.

$$INL \text{ [LSB]} = \max_{0 \leq D \leq 2^n - 1} \left| \frac{U_D - U_0}{LSB_{ideal}} - D \right| \quad (1.2)$$

1 Einleitung

Die Eingangsspannung zum gemessenen digitalen Ausgangswert D ist U_D . LSB_{ideal} bezeichnet die Spannung die idealerweise eine Änderung des Ausgangswertes um 1 bewirkt. Diese entspricht damit dem Wert von Gleichung 1.1. Mit der Auflösung n sind die möglichen Ausgabewerte $0 < D < 2^n - 1$ [20], [5].

Differenzielle Nichtlinearität

Für die differenzielle Nichtlinearität gilt mit $0 < D < 2^n - 2$ Gleichung 4.1

$$DNL \text{ [LSB]} = \frac{U_{D+1} - U_D}{LSB_{ideal}} - 1 \quad (1.3)$$

Differenzielle Nichtlinearitäten größer 1 LSB führen dazu, dass Ausgangswerte übersprungen werden (engl. *missing code*). Ist die DNL größer als 2 LSB entsteht ein Monotoniefehler. Steigende Eingangsspannungen führen dann nicht immer zu steigenden Ausgangswerten [20], [13].

2 Red Pitaya

2.1 Überblick Red Pitaya

Das frei programmierbare single-board Messgerät *Red Pitaya* ist kommerziell erhältlich und bietet laut Hersteller eine Alternative zu einer Messausrüstung mit Oszilloskop, Funktionsgenerator und Spektrumsanalysator. Mit Abmessungen von $(107 \times 60 \times 21)\text{mm}^3$ ist das Gerät im "Kreditkartenformat". Die Datenübertragung erfolgt wahlweise über eine Micro USB oder Gigabit Ethernet Schnittstelle. In Abbildung 2.1 ist die Platine mit den verfügbaren Schnittstellen dargestellt. Mit dem *Xilinx Zynq 7010 SoC*[17] verfügt *Red Pitaya* über einen *ARM Cortex A9* Prozessor und einem FPGA mit dem individuelle Anwendungen umgesetzt werden können. Auf dem Prozessor läuft ein Linux Betriebssystem. Das Gerät verfügt über 512MB DDR3 SDRAM. Als permanenter Speicher dient eine Micro-SD-Karte. [14], [15], [16]

Die Schaltpläne für *Red Pitaya* sind im Gegensatz zur Software nicht frei zugänglich.

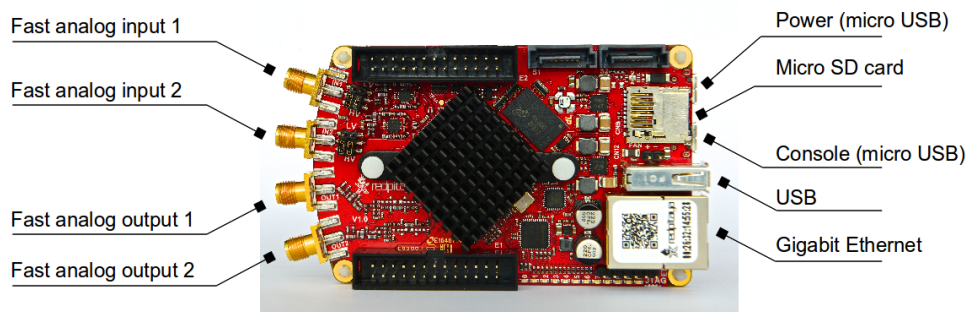


Abbildung 2.1: Ansicht von oben auf das single-board Messgerät *Red Pitaya* mit den wichtigsten verfügbaren Schnittstellen. [29]

Oszilloskop

Entscheidend für die mögliche Verwendung als ADC im Brainscales Hardware System ist die Oszilloskopfunktion. Auf die Einsatzmöglichkeit als Funktionsgenerator wird im

2 Red Pitaya

Folgenden nicht eingegangen. Weitere Informationen hierzu finden sich im Benutzerhandbuch [15] und dem Internetauftritt [14] des Herstellers.

Das *Red Pitaya* besitzt zwei Eingangskanäle. Die Verbindung erfolgt über zwei SMA Stecker. Die maximale Abtastrate des ADC (Linear Technology LTC2145CUP-14, [28]) beträgt 125 MS/s und die Auflösung 14 Bit. Der Eingangsbereich kann auf ± 1 V festgelegt werden. Die detaillierten Angaben zu den Eingängen sind als Auszug aus dem Datenblatt in Abbildung 2.2 dargestellt. Der Hersteller bietet als graphische Benutzeroberfläche einen Webdienst an. Die Funktionen des *Red Pitaya* können damit als HTML Anwendungen mit einem Browser aufgerufen werden. Für die Anwendung in der Arbeitsgruppe empfiehlt sich aber die Verwendung eines Pythonscripts um Messungen durchzuführen. [15], [14]

- RF inputs
 - Number of channels: 2
 - Bandwidth: 50 MHz (3 dB)
 - Sample rate: 125 Msps
 - ADC resolution 14 bits
 - Input coupling: DC
 - Input noise level: < -119 dBm /Hz (D)
 - Input impedance: 1 M Ω // 10 pF (A,B)
 - Full scale voltage: 2Vpp, (46 Vpp for low-gain jumper setting) (T,V)
 - DC offset error: <5 % FS (G)
 - gain error: < 3% (at high gain jumper setting), <10% (at low gain jumper setting) (G)
 - Absolute maximum input voltage rating: 30 V (S) (1500 V ESD)
 - Overload protection: protection diodes (under the input voltage rating conditions)
 - Input channel isolation: typical performance 65 dB @ 10 kHz, 50 dB @ 100 kHz, 55 dB @ 1 M, 55 dB @ 10 MHz, 52 dB @ 20 MHz, 48 dB @ 30 MHz, 44 dB @ 40 MHz, 40 dB @ 50 MHz. (C)
 - Harmonics
 - at -3 dBFS: typical performance <-45 dBc (E)
 - at -20 dBFS: typical performance <-60 dBc (E)
 - Spurious frequency components: Typically <-90 dBFS (F)
 - Connector type: SMA (U)
 - Frequency response is adjusted by digital compensation

Abbildung 2.2: Ein Auszug aus dem Datenblatt [30] zur Eingangsstufe.

RAM Speicher

Red Pitaya verfügt über 512 MB SDRAM. Allerdings werden bei der Standardinstallation des Betriebssystems die Messwerte nur in einen deutlich kleineren Speicher auf dem FPGA geschrieben. Dieser kann 16 384 Werte pro Kanal aufzeichnen. Bei einer maxima-

len Abtastrate von 125 MS/s entspricht das einer kontinuierlichen Datenaufnahme für einen Zeitraum von 131 μ s. Eine Nutzung des gesamten verfügbaren Arbeitsspeichers ist vom Hersteller nicht vorgesehen. Mit Hilfe einer entsprechenden FPGA Konfiguration kann dies aber gewährleistet werden. *Red Pitaya* Nutzer haben die Konfiguration bereits öffentlich zur Verfügung gestellt [21]. Auf diese Anwendung wird im Abschnitt 2.6 eingegangen.

2.2 Inbetriebnahme

Zur Inbetriebnahme wurde zunächst die Linuxdistribution auf die Micro-SD Karte aufgespielt. Dabei musste insbesondere auf die Anbindung an das im Institut verwendete zentrale Netzwerk-Dateisystem (AFS) geachtet werden. Für Details der Bedienung und Proxyeinstellungen ist innerhalb der Arbeitsgruppe eine eigene Dokumentation angelegt worden [18].

Das Softwarepaket des Herstellers enthält entsprechende Programme [15], die mit einer SSH-Verbindung aufgerufen werden können. Messwerte werden dabei in einem temporären Verzeichnis auf dem Gerät abgelegt. Es empfiehlt sich, dieses mit einem FUSE-Modul (z. B. sshfs) in das eigene Dateisystem einzubinden. Die Eingangstufe des *Red Pitaya* besitzt keine $50\ \Omega$ Terminierung. Daher muss bei Messungen ein entsprechender Adapter dazugeschaltet werden. Die Mehrheit, der bei den folgenden Messungen verwendeten Testsignale stammen aus dem Funktionsgenerator (Hewlett Packard 8116A Pulse/Function Generator, [23]) sowie dem Sourcemeter (Keithley 2635B, System SourceMeter, [22]). Letzteres lässt sich über eine serielle Schnittstelle ansteuern.

Ein erster Test von *Eric Müller* (Oktober 2014) zeigt außerdem, dass die Bandbreite der Verbindung zwischen dem ARM Prozessor und der Gigabit Ethernet Schnittstelle ausreicht um letztere voll auszulasten. Es sind also Übertragungsraten von bis zu 117 MiB/s möglich [11], [10].

2.2.1 Kühlung

Die auf der Platine angebrachten Kühlkörper stoßen bei der Wärmeentwicklung des Geräts schnell an ihre Grenzen. Daher empfiehlt sich die Anbringung eines Lüfters am vorgesehenen Plastikgehäuse. Auf der Platine sind entsprechende Anschlüsse vorgesehen um einen Lüfter mit 5 V zu betreiben. Das Gehäuse ermöglicht die einfache Montage des Lüfters.

2.3 Kalibrierung

Zunächst wurde nur eine Kalibrierung mit nur wenigen Punkten durchgeführt. Dafür wurden 21 verschiedene Eingangsspannungen angelegt und jeweils der Mittelwert aus den 16384 aufgezeichneten Messwerten gebildet. Der schematische Aufbau ist in Abb. 2.3 dargestellt.

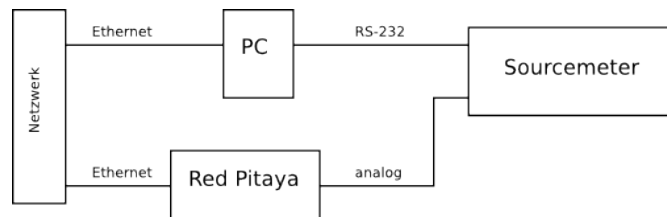


Abbildung 2.3: Die schematische Darstellung des Aufbaus zur Kalibrierung mit einem Sourcemeter. Die Steuerung von *Red Pitaya* erfolgt über eine Ethernet Schnittstelle.

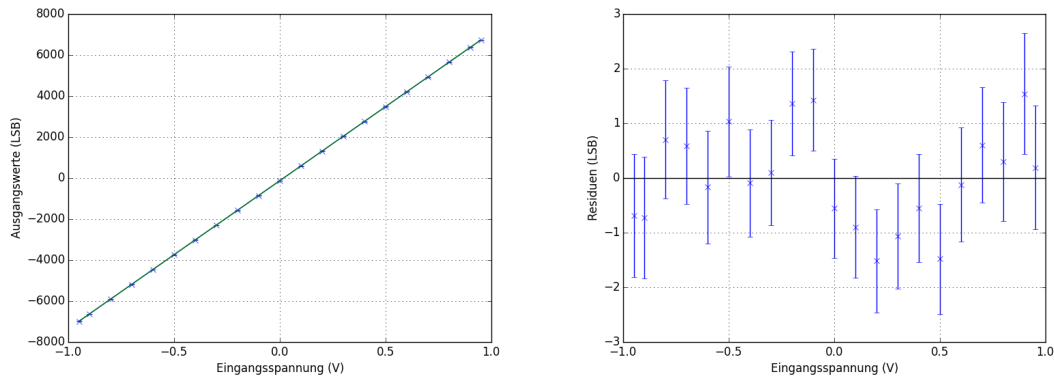
Die Eingangsspannungen durchlaufen dabei den vollen erlaubten Eingangsbereich. An die Mittelwerte wurde dann eine lineare Funktion angepasst. Für Kanal 1 sind die Messwerte in Abbildung 2.4(a) und die Verteilung der Residuen in 2.4(b) dargestellt. In der Verteilung der Residuen ist keine Systematik erkennbar. Damit lässt sich die gewählte Fitfunktion rechtfertigen. In Tabelle 2.1 sind die ermittelten Fitparameter angegeben. Diese sind mit „gain“ und „offset“ also als Steigung und y-Achsenabschnitt der Fitgeraden bezeichnet. Später wurde mit der genauen Aufzeichnung der Kennlinie eine präzisere Kalibrierung möglich. Diese ist in Abschnitt 2.5 dargestellt.

	gain (LSB/V)	offset (LSB)
Kanal 1	$7227,57 \pm 0,19$	$-128,86 \pm 0,11$
Kanal 2	$7274,17 \pm 0,36$	$-64,01 \pm 0,22$

Tabelle 2.1: Fitparameter der einfachen Kalibrierung mit einer linearen Fitfunktion. Die Steigung ist als „gain“ und der y-Achsenabschnitt als „offset“ bezeichnet.

2.3.1 Rauschen Sourcemeter

Bei den Messungen zur Kalibrierung ist aufgefallen, dass die konstante Gleichspannung des Sourcemeters [22] ein starkes Rauschen aufweist. Dieses wird von dem Sourcemeter



(a) Die Messwerte von Kanal 1 mit der Fitgeraden. (b) Residuen des Fits. Es ist keine Systematik erkennbar.

Abbildung 2.4: Diagramme zu dem linearen Fit der Messwerte für eine erste Kalibrierung von *Red Pitaya*.

selbst verursacht. Bei der Kalibrierung des Flyspi ADC Systems ist dies in der Arbeitsgruppe auch schon aufgefallen. Die Erkenntnisse sind auch in der entsprechenden Dokumentation [19] zur Kalibrierung des Flyspi-Systems dokumentiert. In Abbildung 2.5 ist das verrauschte Signal abgebildet. Die Werte wurden mit einem Oszilloskop (12 Bit, 2 GS/s [24]) aufgenommen. Am Sourcemeter wurde eine Spannung von 0,5 V eingestellt. Der gemessene Mittelwert mit Standardabweichung, die Spitze-Spitze-Spannung und die Quantile sind in Tabelle 2.2 angegeben. Im Mittelwert macht sich das Rauschen bei einer hohen Anzahl an Messwerten nicht bemerkbar. Bei den in dieser Arbeit folgenden Messungen mit dem Sourcemeter wurde daher immer eine große Anzahl ($\geq 10\,000$) an Messwerten aufgenommen.

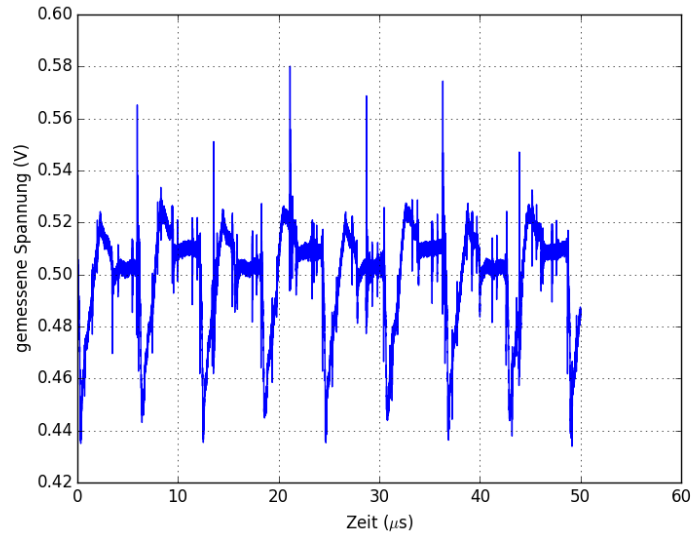


Abbildung 2.5: Die vom Sourcemeter gelieferte Gleichspannung ist deutlich verrauscht. Das dargestellte Signal wurde mit einem Oszilloskop [24] aufgenommen. Am Sourcemeter wurde eine Gleichspannung von 0,5 V eingestellt. Das Signal wurde mit 2 GS/s aufgezeichnet.

Mittelwert	500 mV
Standardabweichung	19 mV
0,1 - Quantil	2 mV
0,9 - Quantil	32 mV
Spitze-Spitze	146 mV

Tabelle 2.2: Die Auswertung der Gleichspannung vom Sourcemeter. Es wurde eine Spannung von 0,5 V eingestellt. Die Quantile beziehen sich auf die Abweichungen vom gemessenen Mittelwert. Die gemessenen Spannungen sind in Abb. 2.5 dargestellt. Bei einer hohen Anzahl an Messwerten entspricht, trotz des starken Rauschens, der Mittelwert dem Erwartungswert von 0,5 V.

2.4 Frequenzgang

In Abbildung 2.6 ist der gemessene Frequenzgang dargestellt. Als Signalquelle wurde der Frequenzgenerator [23] verwendet.

Im Bereich größer als ~ 10 MHz nimmt die Signalamplitude stark ab. Für eine detaillierte Auswertung müsste der Frequenzgang mit mehr Messwerten aufgenommen werden. Im Folgenden steht aber die Messung von Gleichspannungen im Mittelpunkt. Auf die Verarbeitung von Wechselspannungen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

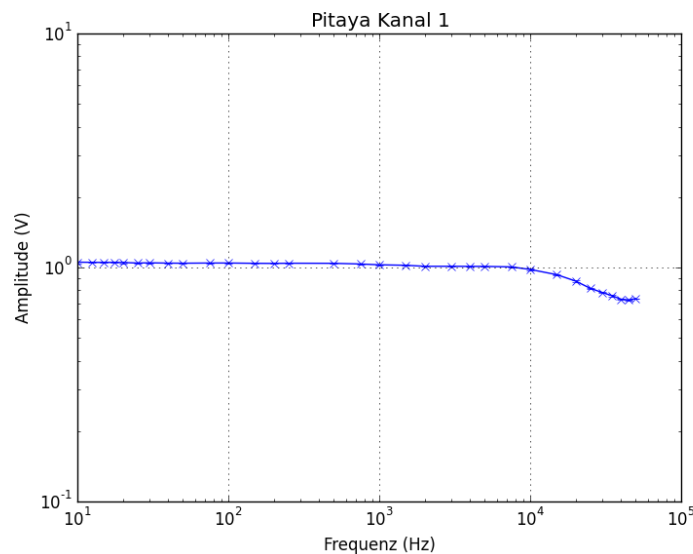


Abbildung 2.6: Frequenzgang von *Red Pitaya* (Kanal 1). Die Amplitude nimmt ab ~ 10 MHz stark ab.

2.5 Kennlinie

In Abbildung 2.7(a) ist die Kennlinie für Kanal 1 dargestellt. Dafür wurden Messwerte zwischen 0 und 1 V in Schritten von 1 mV aufgenommen. Die konstante Eingangsspannung wurde von dem Sourcemeter bereitgestellt. Um den Fehler des Sourcemeters zu berücksichtigen wurde die Kennlinie insgesamt 15-mal durchgefahren. So können Mittelwerte und entsprechende Fehler abgeschätzt werden, die auch den Fehler des Eingangssignals berücksichtigen. Anschließend ist eine lineare Funktion an die Messwerte angepasst worden. Die zugehörige Verteilung der Residuen ist in den Abbildungen 2.7(c) und 2.7(b) dargestellt. Die Residuen mit Fehlerbalken sind in Abb. 2.7(d) in einem kleineren

2 Red Pitaya

Bereich zu sehen. Die Fehler der Residuen ergeben sich aus dem Fehler des jeweiligen Mittelwerts und dem Fehler des Fits. Es ist keine Systematik in der Verteilung erkennbar. Dies rechtfertigt den gewählten Grad der Fitfunktion.

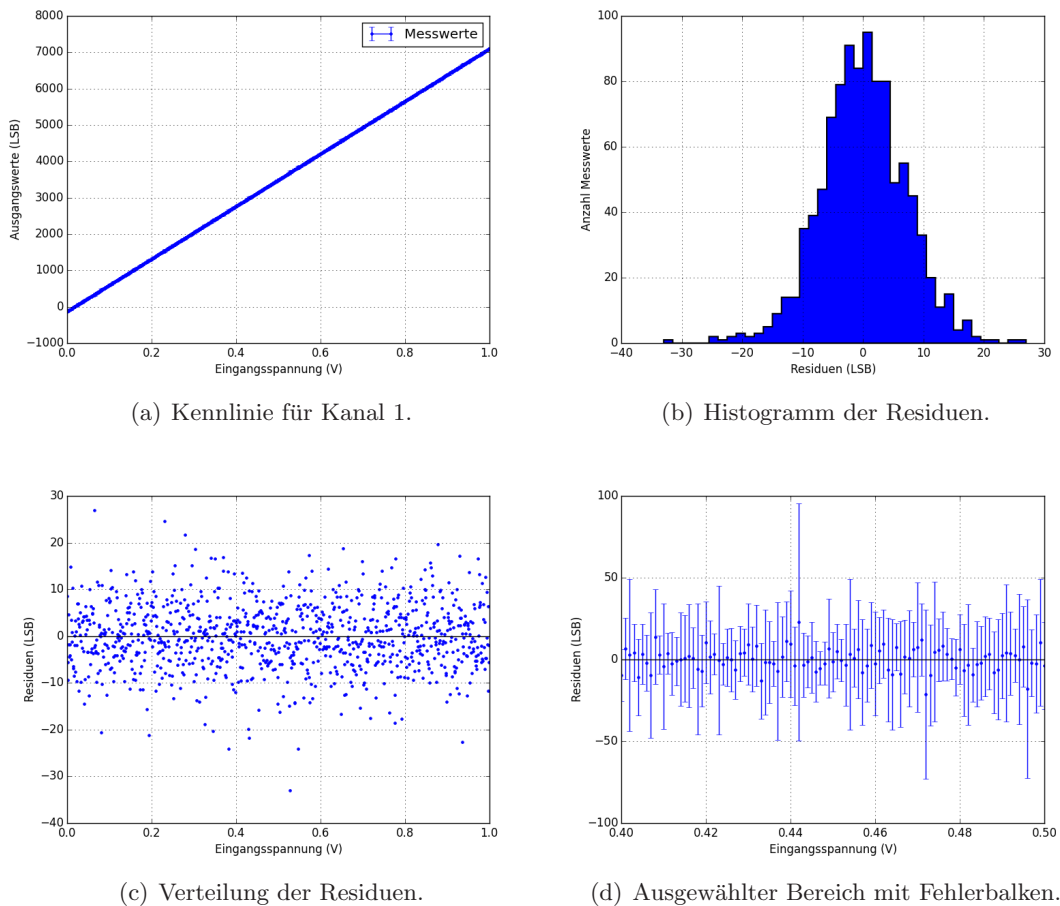


Abbildung 2.7: Die aufgenommene Kennlinie für Kanal 1. An die Messwerte wurde eine lineare Funktion gefittet. In (b) und (c) ist die Verteilung der Residuen dargestellt. In (d) ist ein ausgewählter kleinerer Bereich der Residuen mit Fehlerbalken dargestellt. Die Residuen erscheinen zufällig verteilt. Das rechtfertigt den linearen Fit. Die Systematik ist für Kanal 2 die Gleiche.

Die Ergebnisse für den zweiten Eingangskanal entsprechen in ihrer Systematik denen des ersten. In Tabelle 2.3 sind die Fitparameter angegeben.

Bei einem 14 bit ADC und einem Eingangsbereich von ± 1 V erwartet man bei der maximalen Spannung den maximalen Ausgangswert von $2^{13} = 8192$ LSB. Tatsächlich wird der Maximalwert bei etwas höheren Spannungen erreicht. In Abbildung 2.8 ist die

	gain (LSB/V)	offset (LSB)
Kanal 1	$7228,43 \pm 0,78$	$-127,92 \pm 0,45$
Kanal 2	$7277,77 \pm 0,80$	$-61,46 \pm 0,46$

Tabelle 2.3: Fitparameter der Kennlinienmessung. Als Fitfunktion wurde eine Gerade gewählt.

Kennlinie bei betragsmäßig größeren Eingangsspannungen aufgenommen worden. Hier wurde der volle Ausgabebereich aufgenommen.

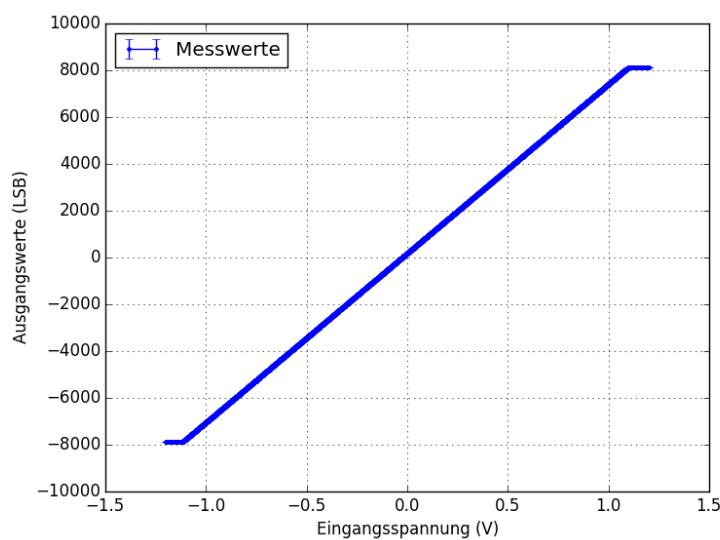


Abbildung 2.8: Kennlinie für den gesamten Bereich möglicher Eingangsspannungen.

2.6 Kontinuierliche Datenaufnahme

Red Pitaya kann bei der maximalen Abtastrate von 125 MS/s nur über einen relativ kurzen Zeitraum von 131 μ s kontinuierlich Daten aufnehmen. Danach muss der entsprechende Speicher überschrieben werden. Der interne Arbeitsspeicher von 512 MB ermöglicht aber kontinuierliche Messungen über einen wesentlich längeren Zeitraum. Dafür muss der FPGA entsprechend programmiert werden. Andere Nutzer des Geräts haben dies bereits umgesetzt und die Software öffentlich gemacht [21]. Mit der aktuellen Konfiguration ist es möglich $2^{20} = 1\,048\,576$ Werte pro Kanal aufzunehmen. Dies entspricht einem Zeitraum von ungefähr 8 ms.

2 Red Pitaya

Es sind aber auch größere Datenpakete realisierbar. Aktuell müssen mindestens 4 MS an Daten kontinuierlich aufgenommen werden [9]. Bei einer momentan verwendeten Abtastrate von 96 MS/s entspricht dies einem Zeitraum von etwa 42 ms. Mit 16 Bit pro Messwert entspricht das insgesamt einem Datenvolumen von 8 MB [9].

Die FPGA Konfiguration muss also noch angepasst werden. Dies wurde von den anderen Nutzern auch schon umgesetzt [21]. Die erweiterte FPGA Konfiguration wurde aber nicht getestet.

In Abbildung 2.9 ist die Aufnahme eines Rechtecksignals über den größeren Zeitraum dargestellt. Die Frequenz des Signals beträgt 250 Hz.

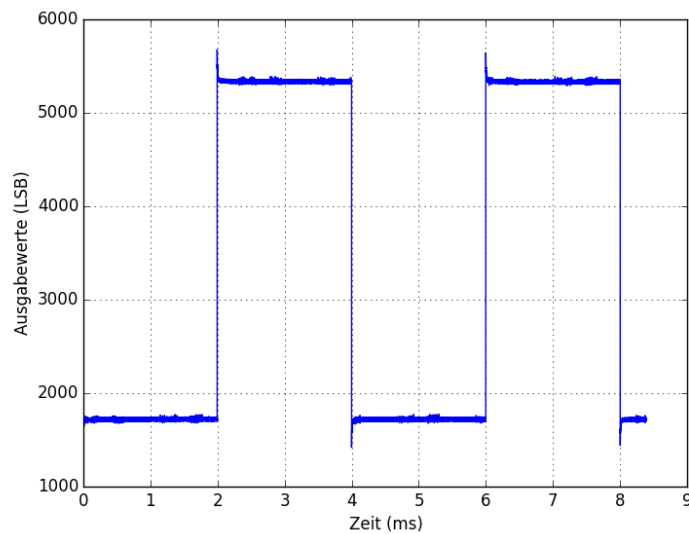


Abbildung 2.9: Kontinuierliche Datenaufnahme über einen Zeitraum von ≈ 8 ms. Zu sehen ist ein 250 Hz Rechtecksignal.

3 Das Analog Readout Module (AnaRM)

Das bisher benutzte ADC System ist das *Analog Readout Module* (AnaRM). Ein Wafer mit 48 Retikeln liefert bis zu 96 Membranspannungen. Ein AnaRM Modul hat 8 Eingänge, die mit Multiplexern von einem ADC ausgewertet werden. Für ein Rack (NM-PM1 [4]) mit vier Wafern sind 12 AnaRM Module geplant. Damit können 12 Spannungen gleichzeitig ausgelesen werden. Die Module werden von einem Linuxsystem auf einem Intel NUC mit einer USB 2.0 Schnittstelle gesteuert [4]. Das ermöglicht eine Übertragungsrate von 40 MB/s [4]. Ein AnaRM besteht aus zwei Leiterplatten, das Flyspi FPGA PCB (Flyspi) und das Analog Frontend PCB (AnaFP) [4].

Bei dem hier verwendeten AnaRM handelt es sich um ein Modell der zweiten Generation aus dem Jahr 2013 mit der Seriennummer B201314.

3.1 Flyspi FPGA PCB (Flyspi)

Das *Flyspi* FPGA System wurde in Heidelberg entworfen. Es besteht aus einem Spartan 6 FPGA, einem 12 bit ADC mit einer Abtastrate von bis zu 125 MS/s (Texas Instruments ADS6125 [27]) und 512 MiB DRAM [4]. In Abbildung 3.1 ist die Platine zu sehen.

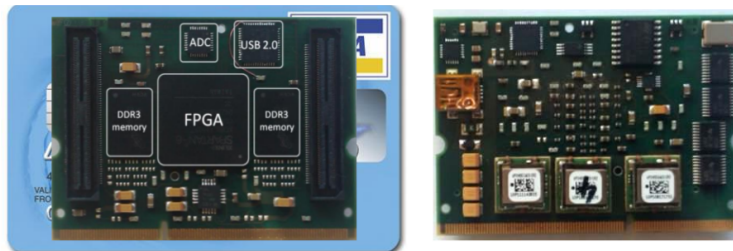


Abbildung 3.1: Die Platine des Flyspi Systems von oben (links) und unten (rechts).[31]

3.2 Analog Frontend PCB (AnaFP)

Das AnaFP enthält das analoge front-end für den ADC auf dem *Flyspi*. Dieses Modul enthält die nötige Schaltung bestehend aus Signalterminierung, Multiplexern und Vorverstärker, um das Eingangssignal für den Bereich des ADC's anzupassen. Auf der Platine befinden sich 8 Eingänge. Drei Multiplexer mit jeweils drei Eingängen ermöglichen es einen dieser Eingänge auszuwählen. Ein Multiplexerkanal bleibt ungenutzt. Die Vorverstärkung ermöglicht die Auswertung von single ended Eingangssignale zwischen 0 und 0,9 V. Die Eingangssignale sind mit $50\ \Omega$ terminiert. Im AnaRM ist das AnaFP direkt mit *Flyspi* über zwei Samtec (BTH-060-02-L-D-A) Steckverbinder verbunden. Die Stromversorgung erfolgt über das *Flyspi* Modul. [4]

3.3 Inbetriebnahme

Die Stromversorgung des gesamten Moduls wird über einen Mini-USB Anschluss sichergestellt. Für die Funktionstüchtigkeit benötigt das AnaRM Spannung von 4,7 V [7]. Der Spannungsabfall im Kabel darf nicht über 350 mV betragen [8]. Es empfiehlt sich für den Betrieb die Stromversorgung über ein USB-Hub mit einer externen Stromversorgung zu verwenden. Außerdem sollte nur das vorgesehene Mini-USB-Kabel verwendet werden. Dieses ist besonders kurz und dick um die Verluste gering zu halten. In der Kalibrierungsanleitung der entsprechenden Dokumentation der Arbeitsgruppe [19] finden sich detaillierte Informationen dazu. Dort ist auch die Belegung der Eingangskanäle dokumentiert. Damit die Software zum Auslesen der Daten funktioniert, muss auf das richtige Setzen der Pfade zu den Softwaremodulen im *Halbe*-Repository geachtet werden.

3.4 Kalibrierung

Auch für das AnaRM wurde zunächst eine einfache Kalibrierung für den verwendeten Kanal 7 durchgeführt. Dabei wurde wie bei der Messung am *Red Pitaya* vorgegangen. In Abbildung 3.2 sind die gemessenen Mittelwerte zu verschiedenen Eingangsspannungen dargestellt. Bei jeder Eingangsspannung wurden 16 384 Messwerte aufgenommen. An die Messwerte wurde dann eine lineare Funktion angepasst. Die Fitparameter sind:

$$\begin{aligned} \text{gain:} & \quad -2947 \pm 16 \text{ (LSB/V)} \\ \text{offset:} & \quad 3241 \pm 9 \text{ (LSB)} \end{aligned}$$

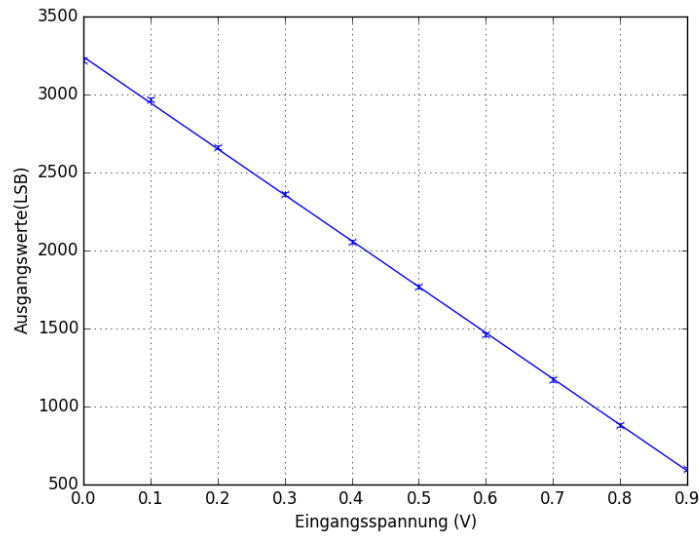


Abbildung 3.2: Einfache Kalibrierung für Kanal 7 auf dem Flyspi. Als Fitfunktion wurde eine Gerade gewählt. Die Verteilung der Residuen bei mehr Messpunkten in Abschnitt 3.5 rechtfertigt aber eine andere Fitfunktion.

Die folgende Aufnahme der Kennlinie (Abschnitt 3.5) ermöglicht aber eine genauere Kalibrierung und lässt auch auf eine andere Fitfunktion schließen.

3.5 Kennlinie

Auch die Aufnahme der Kennlinie erfolgte wie bei *Red Pitaya*. In Abbildung 3.3 ist die Messung an Kanal 7 für Eingangsspannungen zwischen 0 und 0,9 V dargestellt. In Abbildung 3.4 ist die Verteilung der Residuen für eine lineare Fitfunktion zu sehen. Diese sind nicht gleichmäßig um Null verteilt. Es ist deutlich eine Systematik zu erkennen, die auf eine quadratische Abhängigkeit schließen lässt. Tatsächlich wird die Annahme mit der entsprechenden Verteilung in Abb. 3.5 bestätigt. Als Fit wurde hier eine quadratische Funktion der Form $V(\text{LSB})$ gewählt. Die Fitfunktion ist in Gleichung 3.1 angegeben. Der gemessene Ausgangswert in LSB ist hier mit D bezeichnet. U steht für die mit den Fitparametern a , b und c resultierende Spannung.

$$U(D) = a \cdot D^2 + b \cdot D + c \quad (3.1)$$

Die Parameter des quadratischen Fits sind in Tabelle 3.1 angegeben. In Abb. 3.5 sind die Residuen in LSB angegeben. Nach der HBP SP9 Spezifikation [4] wird die quadratische Abhängigkeit durch den Vorverstärker verursacht.

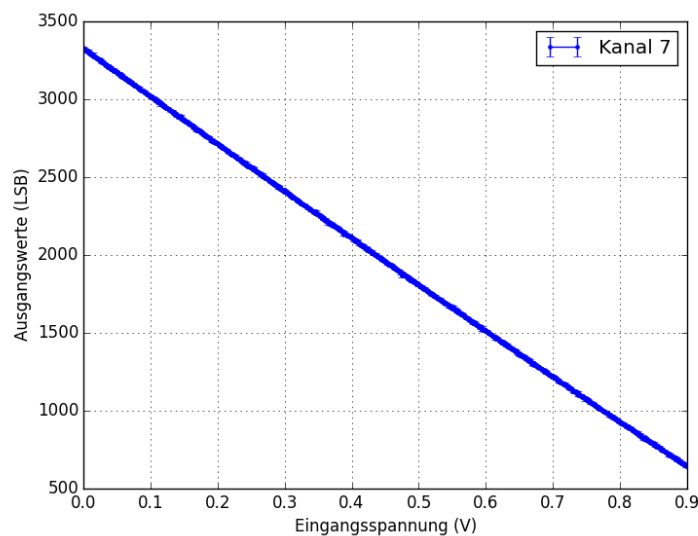
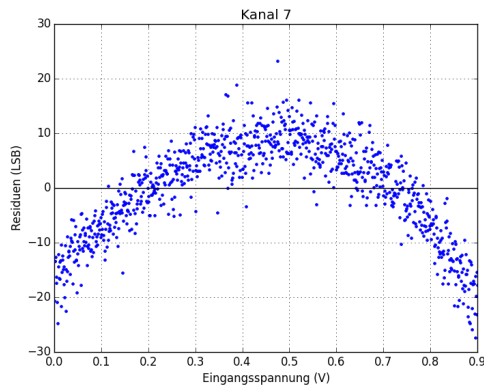
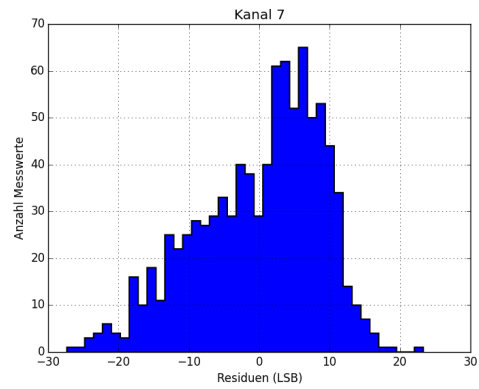


Abbildung 3.3: Die gemessene Kennlinie für Kanal 7 des AnaRM.



(a) Verteilung bezüglich der Eingangsspannung.



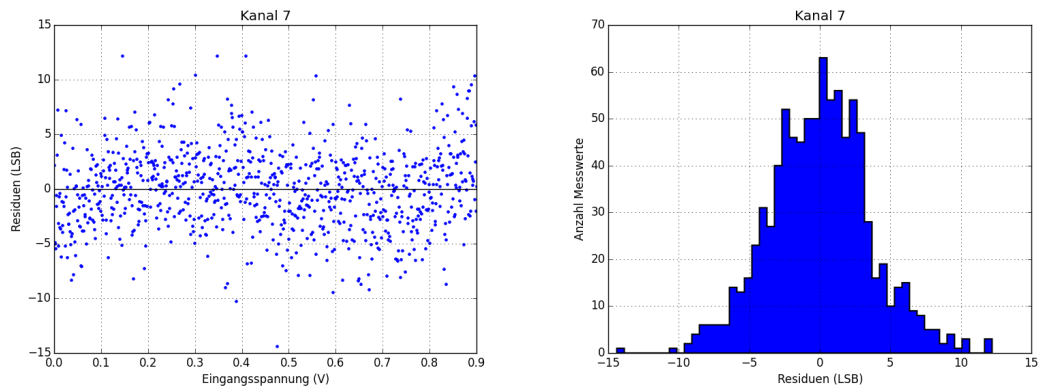
(b) Histogramm der Residuen.

Abbildung 3.4: Verteilung der Residuen bei einem linearen Fit. Die Systematik spricht für eine quadratische statt linearer Fitfunktion.

Parameter	Fit der Kennlinienmessung
a (V/LSB ²)	$(5,0056 \pm 0,0751) \cdot 10^{-9}$
b (V/LSB)	$(-3,5462 \pm 0,0030) \cdot 10^{-4}$
c (V)	$1,1250 \pm 0,0003$

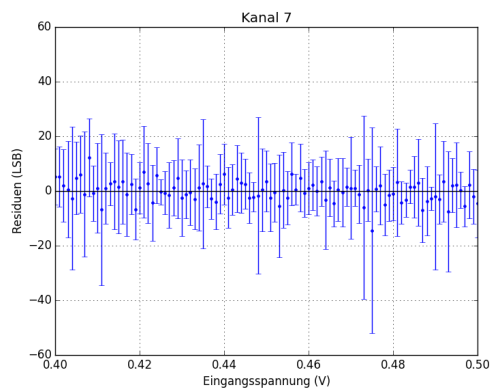
Tabelle 3.1: Die Fitparameter a,b und c der quadratischen Fitfunktion für die Kennlinie von Kanal 7. Hier als Funktion V(LSB).

3 Das Analog Readout Module (AnaRM)



(a) Verteilung bezüglich der Eingangsspannung.

(b) Histogramm der Residuen.



(c) Residuen über einen kleineren Bereich mit Fehlerbalken.

Abbildung 3.5: Verteilung der Residuen bei einem quadratischen Fit. Die Residuen erscheinen zufällig um Null verteilt. Dies rechtfertigt die quadratische Fitfunktion.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich zwischen dem *Red Pitaya* und dem AnaRM Messgerät um entscheiden zu können welches für einen Einsatz im Brainscales Hardware System [4] geeigneter wäre. In diesem Kapitel sind verschiedene, vergleichende Messungen aufgeführt.

4.1 Statische Kenngrößen

Zur Bestimmung der Nichtlinearität und des Nullpunktfehlers (dem y - Achsenabschnitt der Kennlinie) der beiden ADC Systeme kann auf die Kennlinienmessung der Kapitel 2.5 und 3.5 zurückgegriffen werden. Die gemessenen statischen Kenngrößen sind in Tabelle 4.1 angegeben.

Außerdem sind hier die entsprechenden Werte aus den Datenblättern der verwendeten ADC aufgeführt [27], [28]. Diese sind aber nur bedingt aussagekräftig, da insbesondere die integrale Nichtlinearität von weiteren Bauteilen im ADC-System beeinflusst werden kann. Die tatsächlich gemessenen Werte können daher höher ausfallen.

Bei der Bestimmung der Nichtlinearitäten wurden als ideale Kennlinie die lineare Fitgerade verwendet. Der maximale Wert der Residuen des Fits entspricht also der INL. Hier konnte nicht auf die ideale zu erwartende Kennlinie zurückgegriffen werden, da die Ausgabewerte der maximale Eingangsspannung nicht mit dem erwarteten Wert von 2^{13} beziehungsweise 2^{12} übereinstimmen.

Das liegt vermutlich an weiteren Bauteilen wie Vorverstärkern vor dem ADC in den beiden Systemen. Der externe $50\ \Omega$ Widerstand bei *Red Pitaya* wurde als Fehlerquelle ausgeschlossen.

Die so bestimmten integralen Nichtlinearitäten sind deutlich zu groß. Solche großen Abweichungen lassen eine systematische Verformung der Kennlinie vermuten. Die Residuen (Abb. 2.7 für Kanal 1 von *Red Pitaya*) erscheinen aber zufällig verteilt. Die hohen INL lassen sich durch das Rauschen des Sourcemeters erklären. Die gewählte Messmethode

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

aus 15 Durchläufen mit jeweils 16 384 Messwerte erweist sich als nicht ausreichend um den statistischen Fehler zu unterdrücken. Dadurch sind auch die Fehler der INL sehr hoch. Die Fehler resultieren aus dem Fehler des jeweiligen Mittelwerts der entsprechenden Kennlinienmessung und ist durch das Rauschen entsprechend hoch.

		Nullpunktfehler (LSB)	INL (LSB)		DNL (LSB)		
	Messwert		Messwert	Lit. ADC	Mittelwert	Maximum	Lit. ADC
Pitaya	Kanal 1	$-127,92 \pm 0,45$	$32,98 \pm 66,01$	1	$0,29 \pm 0,02$	0,57	0,3
	Kanal 2	$-61,46 \pm 0,46$	$33,96 \pm 48,73$		$0,28 \pm 0,02$	0,57	
AnaRM	Kanal 7	$622,86 \pm 1,18$	$27,34 \pm 23,31$	2(max.)	$1,10 \pm 0,04$	1,46	2(max.)

Tabelle 4.1: Die gemessenen statischen Kenngrößen der beiden ADC Systeme. Außerdem sind die Literaturwerte (Lit. ADC) der verbauten ADC's [27], [28] angegeben. Die INL ist deutlich zu hoch. Das ist dem Rauschen im Messaufbau geschuldet und äußert sich auch im Fehler. Des Weiteren wurde die DNL nicht über den vollen Bereich gemessen.

Bei der Bestimmung der differentiellen Nichtlinearität kommt hinzu, dass die Stufenbreite bestimmt werden muss, bei der sich der Ausgabewert um 1 LSB ändert. Bei einem 14 Bit (bzw. 12 Bit) ADC und einem Eingangsbereich von ± 1 V (bzw. 0,9 V) entspricht das aber sehr kleinen Spannungen. Das Sourcemeter weist ein Rauschen auf, das deutlich über diesem Spannungswert liegt. Eingangsspannungen müssen daher mehrmals aufgenommen werden. Die Mittelwerte ergeben dann die gesuchte Stufenform.

Da das mehrmalige Aufnehmen der Messwerte bei sehr kleinen Schrittweiten der Eingangsspannung zeitaufwendiger ist, wurde zur Bestimmung der differentiellen Nichtlinearität nur über einen Bereich von 7 mV gemessen. In Abbildung 4.1 ist die gemessene Stufenform an Kanal 1 von *Red Pitaya* dargestellt. Die Eingangsspannung wurde in Schritten von $2 \cdot 10^{-5}$ V durchgeführt. Zu sehen sind die Mittelwerte aus 100 aufgenommenen Messreihen. Insgesamt dauert die Messung für einen Kanal dann ~ 18 h.

Allerdings treten immer noch vereinzelt Werte auf, die von der erwarteten Stufenform abweichen. Das ist dem Rauschen des Sourcemeters geschuldet. Die Werte der entsprechenden Stufe sowie der benachbarten Stufen können dann nicht mehr zur Bestimmung der differentiellen Nichtlinearität berücksichtigt werden, da nicht klar ist wie breit diese Stufen tatsächlich sind.

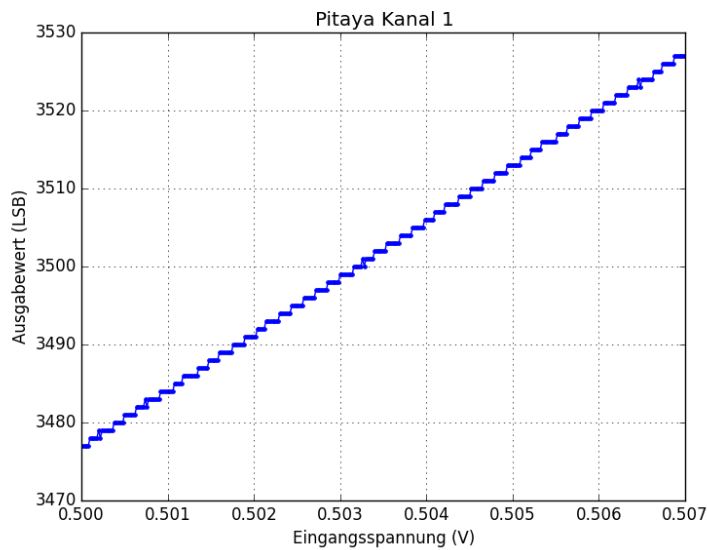


Abbildung 4.1: Die zur Bestimmung der differentiellen Nichtlinearität verwendeten Daten für Kanal 1 von *Red Pitaya*. Die Eingangsspannung ist stark verarscht. Damit die Stufenform deutlich wird, müssen die Mittelwerte von mehreren Messungen verwendet werden. Zu sehen sind die Mittelwerte aus 100 aufgenommenen Messreihen.

In Tabelle 4.1 ist der gemessene Mittelwert mit der Standardabweichung und das Maximum angegeben.

An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass die hier bestimmten Werte der INL und DNL nicht befriedigend sind. Die Messungen sind vielmehr eine Demonstration der Messmethode. Für eine genaue Messung müsste das Rauschen des Sourcemeters besser unterdrückt werden. Zusätzlich sollte die DNL über den gesamten Eingangsbereich (0 - 1 V bzw. 0 - 0,9 V) vermessen werden.

4.2 Temperaturabhängigkeit

Die Temperaturabhängigkeit der beiden elektronischen Geräte wurde mit einem Klimaschrank vermessen. Dazu wurde eine außerhalb erzeugte Testspannung an die im Schrank befindlichen Geräte angelegt. Es wurden jeweils 100 000 Messwerte bei einer Temperatur- und Gleichspannungseinstellung aufgenommen. Dazu musste die limitierte Datenaufnahme von *Red Pitaya* mehrmals wiederholt werden. Bei jeder neuen Temperatureinstellung wurde zwei Stunden gewartet, damit sich die tatsächliche Temperatur

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

möglichst genau auf die Zieltemperatur einstellt. Der Fehler lässt sich aufgrund gemessener Schwankungen und der in der Steuersoftware angegebenen Unsicherheit mit ± 1 °C abschätzen.

Die gemessenen Daten sind in Tabelle 4.2 angegeben. Bezüglich der Temperaturabhängigkeit ist hier für beide Geräte keine Systematik erkennbar.

Auffällig ist der Fehler der 50°/0,1 V Messung. Dieser ist bei beiden Modellen größer als bei allen übrigen Ergebnissen. Dies ließ sich bei einer Wiederholung der Messung zu einem späteren Zeitpunkt auch so reproduzieren. Die Messwerte und ihre Fehlergrenzen stimmen trotzdem gut mit den Erwartungswerten überein.

Eingangsspannung (mV)	Temperatur (°C)	AnaRM (mV)	Red Pitaya (mV)
100	20 ± 1	94,5 ± 3,6	99,7 ± 4,2
	30 ± 1	96,9 ± 3,6	100,6 ± 4,2
	40 ± 1	96,9 ± 3,6	101,1 ± 4,3
	50 ± 1	92,3 ± 5,6	102,2 ± 6,9
500	20 ± 1	501,9 ± 4,0	499,9 ± 4,5
	30 ± 1	500,5 ± 3,9	499,8 ± 4,5
	40 ± 1	500,9 ± 3,9	500,4 ± 4,5
	50 ± 1	499,6 ± 3,9	500,1 ± 4,6
900	20 ± 1	892,6 ± 3,9	900,3 ± 4,7
	30 ± 1	889,6 ± 3,8	899,5 ± 4,6
	40 ± 1	888,7 ± 3,8	899,5 ± 4,5
	50 ± 1	885,2 ± 3,8	898,0 ± 4,6

Tabelle 4.2: Temperaturmessungen. Es wurden bei jeder Einstellung jeweils 100 000 Messwerte aufgenommen. Angegeben sind jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen.

Außerdem ist in Abbildung 4.2 die über den gemessenen Zeitraum aufgenommene Spannung beider Geräte bei unterschiedlichen Temperaturen dargestellt. Die Eingangsspannung beträgt immer 0,5 V. In Abbildung 4.3 sind die zugehörigen Histogramme dargestellt. Wie auch bei den Mittelwerten in Tabelle 4.2 ist im Rahmen der Genauigkeit des Sourcemeters keine Systematik erkennbar. Dies gilt sowohl für ein ADC-System bei verschiedenen Temperaturen als auch für einen Vergleich der beiden Module untereinander. Keines der beiden Geräte ist also bei Temperaturen bis zu 50 °C merklich ungenauer.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

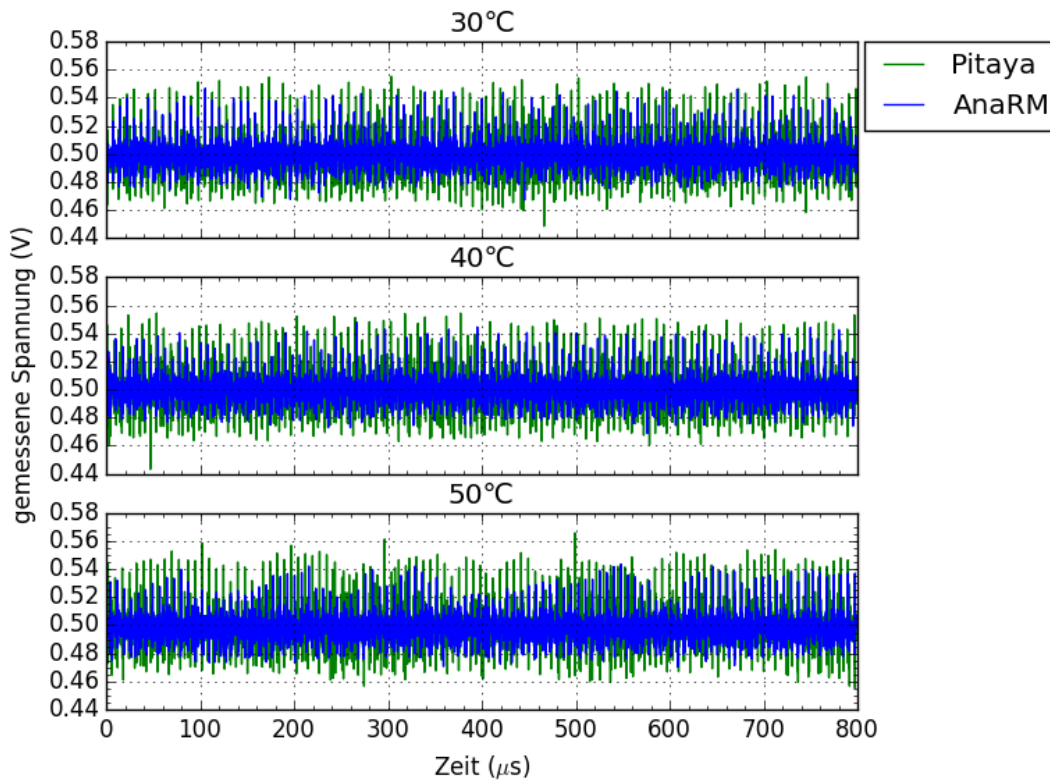
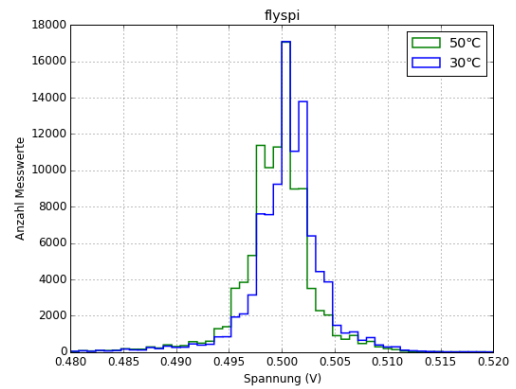
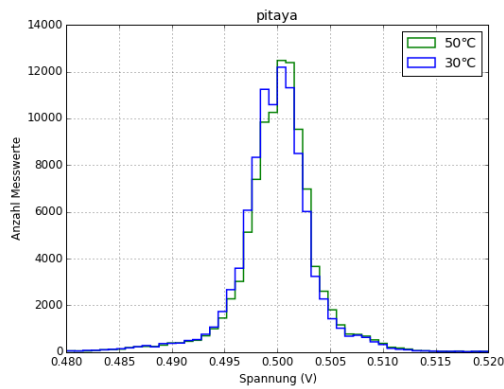


Abbildung 4.2: Messung mit *Pitaya* und AnaRM bei unterschiedlichen Temperaturen im Klimaschrank. Die Eingangsspannung beträgt hier immer 0,5 V. Es ist keine Systematik feststellbar.

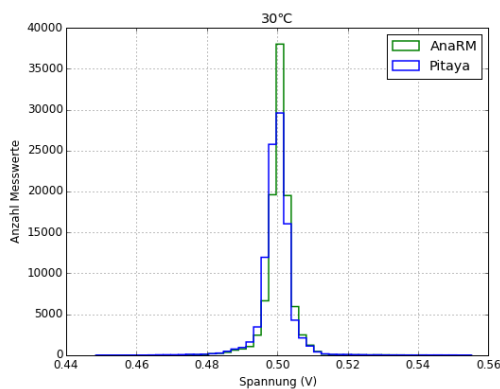
Daher ist nach diesen Messungen auch keines der beiden bezüglich einer Temperaturabhängigkeit dem anderen vorzuziehen.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

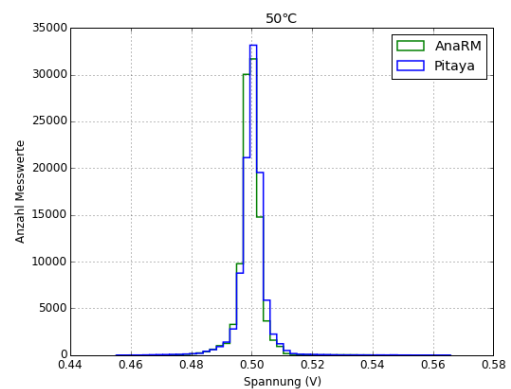


(a) *Pitaya* Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen.

(b) Messungen mit dem AnaRM (*flyspi*) bei unterschiedlichen Temperaturen.



(c) Beide Geräte bei 30 °C.



(d) Beide Geräte bei 50 °C.

Abbildung 4.3: Histogramme zu der vergleichenden Temperaturmessung. Dargestellt ist die Anzahl der gemessenen Werte der Ausgangsspannung beider Geräte bei 0,5V Eingangsspannung und zwei unterschiedlichen Temperaturen in unterschiedlichen Konstellationen. Auch hier ist keine Systematik feststellbar.

4.3 Rauschen

In diesem Kapitel wird untersucht, inwieweit Rauschen beziehungsweise systematische Störungen innerhalb der ADC Systeme die Ausgabewerte beeinflussen.

Dafür wurden Schaltungen konstruiert die jeweils mit einer Batterie als Spannungsquelle zwei verschiedene rauschfreie Spannungsquellen darstellen. Die Messungen mit diesen werden in diesem Kapitel vorgestellt.

4.3.1 Rauschfreie Quelle 1

Wie schon in Abschnitt 2.3.1 erwähnt, liefert das bisher verwendete Sourcemeter [22] nur ein sehr verrauschtes Signal. Für eine genauere Untersuchung wird also eine deutlich rauschärmere Spannungsquelle benötigt. Dazu empfiehlt sich ein Aufbau mit einer Batterie. An diesem sollte die Ausgangsspannung zwischen 0 und 1 V frei wählbar sein. Das lässt sich mit einem Potentiometer und einem Spannungsteiler realisieren. In Abbildung 4.4 ist der Schaltplan des dafür verlöteten Aufbaus dargestellt.

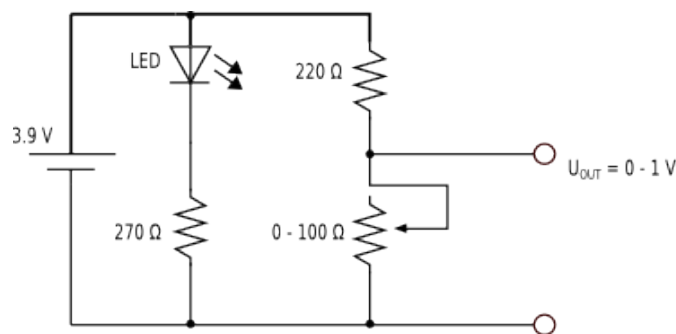


Abbildung 4.4: Schaltplan für die rauschfreie Spannungsquelle 1 aus einem Lithium-Ionen-Akkumulator und einem Spannungsteiler. Außerdem wurde eine LED verbaut, um eine bessere Übersicht über den Zustand des Aufbaus zu bekommen.

In Tabelle 4.3 sind die gemessenen Werte bei verschiedenen Spannungen aus der Batterie und dem Sourcemeter dargestellt. Zu jeder Einstellung wurden 16 384 Werte mit *Red Pitaya* aufgenommen.

Die Standardabweichung des Mittelwerts und die Spitze-Spitze-Spannung bei der Messung mit der Batterie ist ungefähr eine Größenordnung kleiner als die Werte des Sourcemeters. In Abbildung 4.5 sind die gemessenen Spannungen bei einer festgelegten Eingangsspannung in Abhängigkeit des Messzeitpunkts dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass das Rauschen des Sourcemeters das interne Rauschen des ADC Systems überdeckt.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

	Spannung (mV)	Mittelwert (mV)	Spitze - Spitze (mV)
Batterie 1	300	$289,0 \pm 0,7$	15,6
Sourcemeater		$268,5 \pm 8,1$	157,7
Batterie 1	690	$707,8 \pm 0,8$	14,0
Sourcemeater		$656,5 \pm 8,2$	150,7
Batterie 1	800	$830,4 \pm 0,8$	19,1
Sourcemeater		$771,1 \pm 8,1$	152,9

Tabelle 4.3: Vergleich zwischen der rauschfreien Quelle 1 (Batterie 1) und dem Sourcemeater. Angegeben sind die eingestellten Spannungen an den Quellen und die dazu gemessenen Werte. Die Standardabweichung des Mittelwertes und die Spitze-Spitze Wert ist bei der Batterie ungefähr eine Größenordnung kleiner.

Außerdem weist das aufgezeichnete Signal der Batterie eine unerwartete Störung von etwa ± 10 mV auf. Daher wurde in Abschnitt 4.3.2 das Rauschen für weitere Untersuchungen in einem faraday'schen Käfig vermessen.

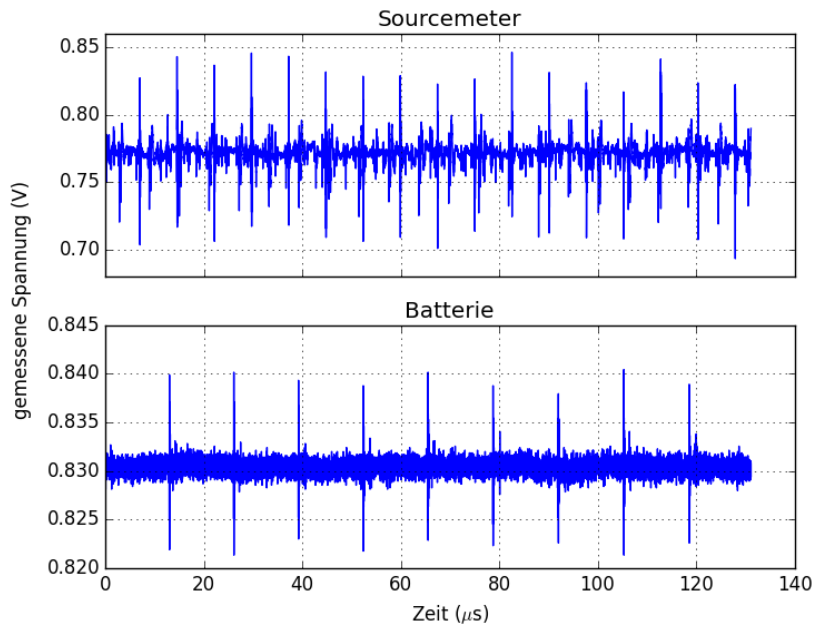


Abbildung 4.5: Die Signale des Sourcemeters und der rauschfreien Quelle 1 (Batterie). Beide Signale wurden mit *Red Pitaya* aufgenommen. Das Rauschen im Signal des Sourcemeters ist wesentlich größer. Im Signal der Batterie ist eine deutliche Störung von 70 MHz erkennbar.

4.3.2 Rauschfreie Quelle 2 und faradayscher Käfig

Um eine Last mit $50\ \Omega$ Eingangswiderstand zu treiben, wäre ein Spannungsteiler mit deutlich kleinerem Ausgangswiderstand notwendig. Die entsprechenden Ströme sind dann aber zu groß. Deutlich praktikabler ist hier die Verwendung eines Operationsverstärkers. Die zur Verfügung stehenden Modelle müssen aber mit einer höheren Versorgungsspannung betrieben werden. Dafür wurde eine andere Batterie mit einem linearen Spannungsregler verwendet. In Abbildung 4.6 ist der verwendete Schaltplan zu sehen.

Die folgenden Messungen wurden außerdem in einem faradayschen Käfig durchgeführt um mögliche äußere Störungen ausschließen zu können. Der Aufbau ist in Abbildung 4.7 dargestellt. In Abbildung 4.8 sind die von *Red Pitaya* und dem AnaRM gemessenen Spannungen zu sehen während sich das jeweils andere Gerät in eingeschaltetem Zustand mit im Käfig befand. Beide Messungen zeigen neben dem eigentlichen Rauschen das schon zuvor bemerkte deutlich größere Störsignal mit einer Frequenz von ungefähr 70 kHz.

Diese Störung verschwindet wenn die Batterieschaltung nicht an das Messgerät ange-

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

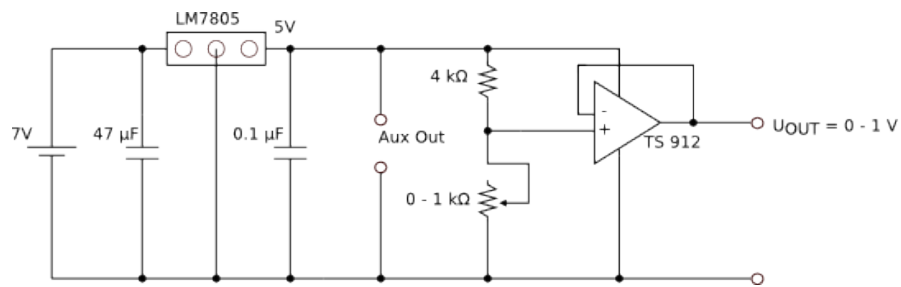


Abbildung 4.6: Rauschfreie Quelle 2: Dieser Aufbau aus einem Operationsverstärker [26], linearen Spannungsteiler [25] und einer Nickel-Metallhydrid-Batterie gewährleistet einen geringeren Ausgangswiderstand. So lassen sich auch Lasten mit $50\ \Omega$ Terminierung verwenden.

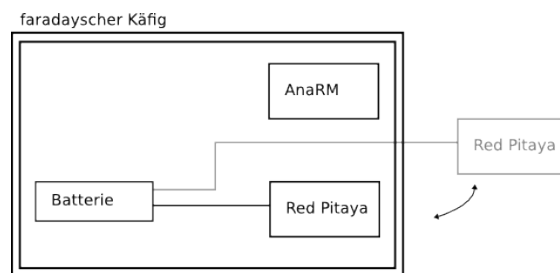


Abbildung 4.7: Der Aufbau der folgenden Messungen. Die Messungen wurden in einem faradayschen Käfig durchgeführt. Zunächst befanden sich beide Messgeräte und die Batterie mit der zugehörigen Schaltung im Käfig. Später wurden auch Messungen durchgeführt bei der sich das Gerät außerhalb befand (hier grau dargestellt). Das jeweils andere Gerät (hier AnaRM) war bei den Messungen zunächst ein - später dann ausgeschaltet.

geschlossen ist. Das ist in Abbildung 4.9 gut zu erkennen.

In Abbildung 4.10 sind die Signale dargestellt, wenn das andere Gerät ausgeschaltet ist. Hier ist zu erkennen, dass die Störung bei der Messung mit dem AnaRM verschwunden ist. Bei der *Red Pitaya*-Messung ist dies nicht der Fall.

Wenn sich die Signalquelle im faradayschen Käfig befindet und das Messgerät außerhalb verschwindet in beiden Fällen die 70 kHz Störung. Das ist in Abbildung 4.11 zu sehen.

Deutung der Störung

Das *Red Pitaya* Messinstrument strahlt eine Störung mit 70 kHz ab. Die Störung kann über Antennen in Form von offenliegenden Leitungen in den Messaufbau einkoppeln. Das ist bei der selbstverlöteten Batterieschaltung der Fall.

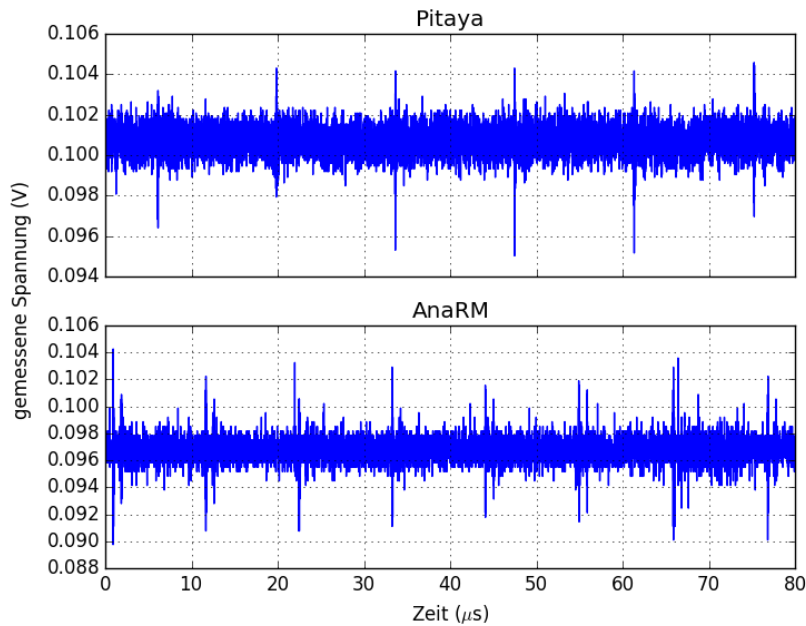


Abbildung 4.8: Gemessene Spannungen der rauschfreien Quelle 2. Der komplette Aufbau befand sich mit beiden Messinstrumenten im faradayschen Käfig. Diese Werte wurden aufgenommen während sich das jeweils andere Gerät in eingeschaltetem Zustand im Käfig befand. In beiden Signalen ist eine Störung mit ≈ 70 kHz erkennbar.

Rauschen im Vergleich

Wenn nun die 70 kHz Störung abgeschirmt ist, kann das übrige Rauschen der beiden Geräte verglichen werden. In Tabelle 4.4 ist jeweils die Standardabweichung des Mittelwerts, die Spitze-Spitze-Spannung sowie das 0,9 - Quantil bezüglich der Abweichung zum Mittelwert angegeben. Die Spitze-Spitze-Spannung ist bei der Messung mit *Flyspi* etwas höher. Auf den Mittelwert und die Standardabweichung hat das aber keine Auswirkungen.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

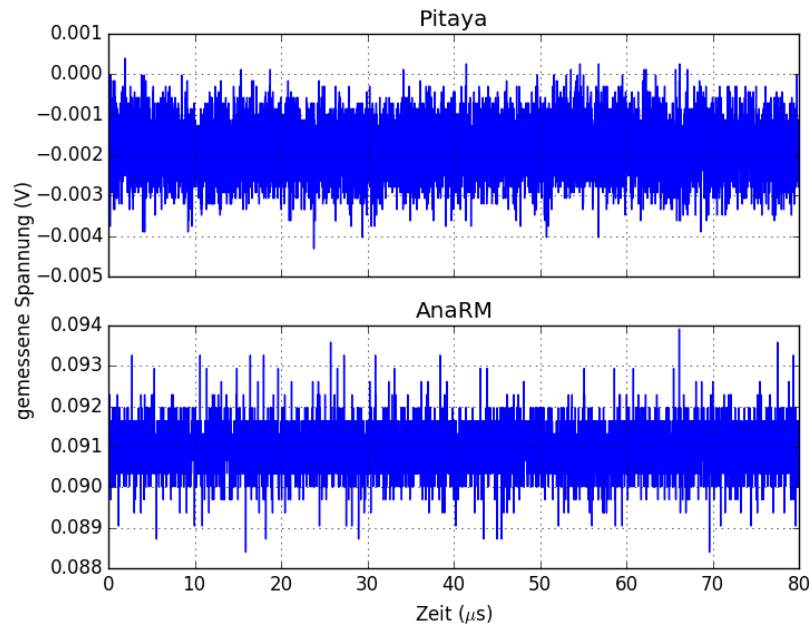


Abbildung 4.9: Wenn überhaupt kein Signal an das Messgerät angeschlossen ist, verschwindet die Störung. Das jeweils andere Gerät war dabei eingeschaltet.

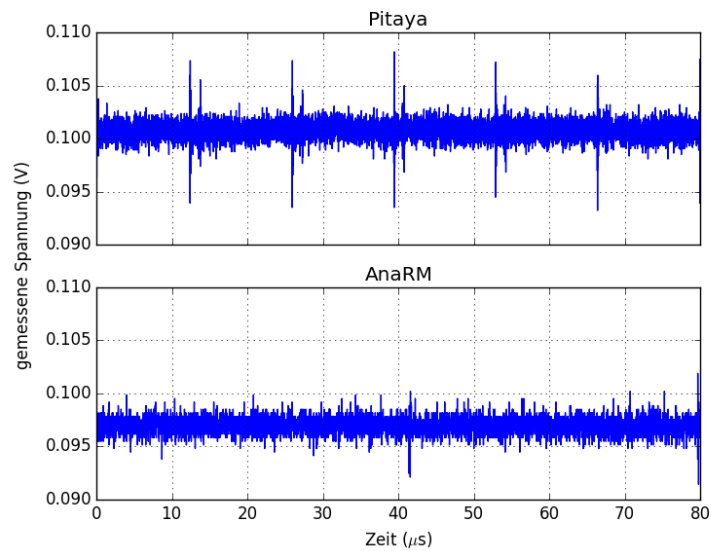


Abbildung 4.10: Wenn das jeweils andere Messgerät ausgeschaltet ist lässt sich nur bei Pitaya die Störung beobachten.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

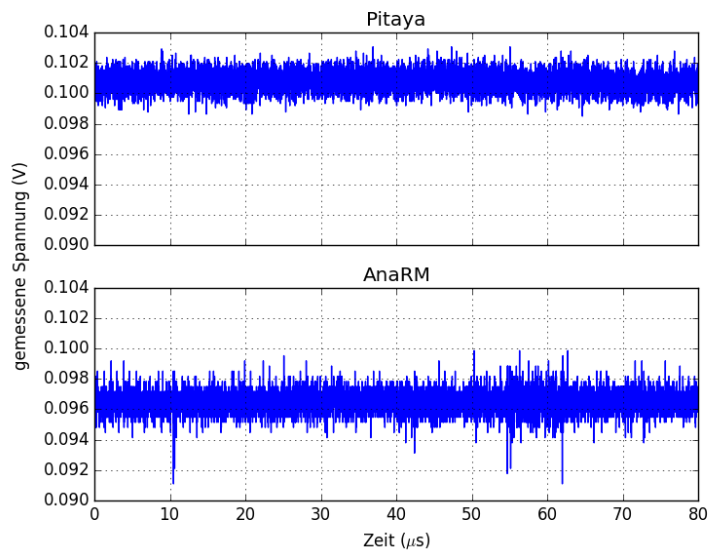


Abbildung 4.11: Die Signalquelle befindet sich im faradayschen Käfig und das Messgerät außerhalb. In beiden Fällen ist die Störung verschwunden.

	Eingangsspannung (mV)	Mittelwert (mV)	Spitze-Spitze (mV)	0,9-Quantil (mV)
Pitaya	100 ± 5	$100,75 \pm 0,62$	4,57	1,01
AnaRM		$96,47 \pm 0,67$	8,77	1,03
Pitaya	500 ± 5	$501,08 \pm 0,61$	4,43	1,00
AnaRM		$506,67 \pm 0,58$	6,41	0,92

Tabelle 4.4: Das Rauschen der beiden Geräte im Vergleich. Die 70 kHz Störung wurde bei der Messung abgeschirmt. Untersucht wurden 10 000 Messwerte. Angegeben ist der Mittelwert und die Standardabweichung sowie die Spitze-Spitze-Spannung und das 0,9-Quantil bezüglich der Abweichung zum gemessenen Mittelwert. Der Fehler der Batteriespannung wurde aus der Unsicherheit abgeschätzt mit der sich die Spannung am Potentiometer manuell einstellen lässt.

4.4 Crosstalk

4.4.1 Red Pitaya

Red Pitaya besitzt einen ADC (LTC2145CUP-14) mit zwei Eingangskanälen. Für die Vermessung des Crosstalks wurde an Kanal 2 repräsentativ ein Sinussignal mit 100 kHz angelegt [23]. An Kanal 1 liegt der SMA Stecker zunächst offen. Der schematische Aufbau ist in Abb. 4.12 dargestellt.

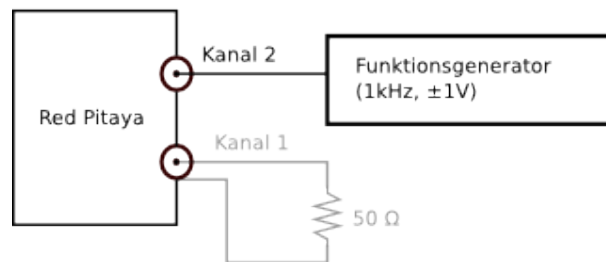


Abbildung 4.12: Der schematische Aufbau zur Vermessung des Crosstalks an *Red Pitaya*. An Kanal 2 wird eine Wechselspannung angelegt. Kanal 1 liegt zunächst offen. Später wird der Eingang mit einer 50 Ω Terminierung abgeschirmt (hier grau dargestellt).

In Abbildung 4.13 sind die gemessenen Spannungen an beiden Kanälen dargestellt. Auf Kanal 1 ist das an Kanal 2 angelegte Signal deutlich wiederzuerkennen.

Das ursprüngliche Signal hat dabei eine Amplitude von 1 V. Das auf Kanal 1 gemessene Signal hat eine Spitze-Spitze Spannung von 11,76 mV. Wird nun der Eingang von Kanal 1 mit einem 50 Ω Widerstand abgeschirmt, liegt die Spitze-Spitze-Spannung bei 8,85 mV.

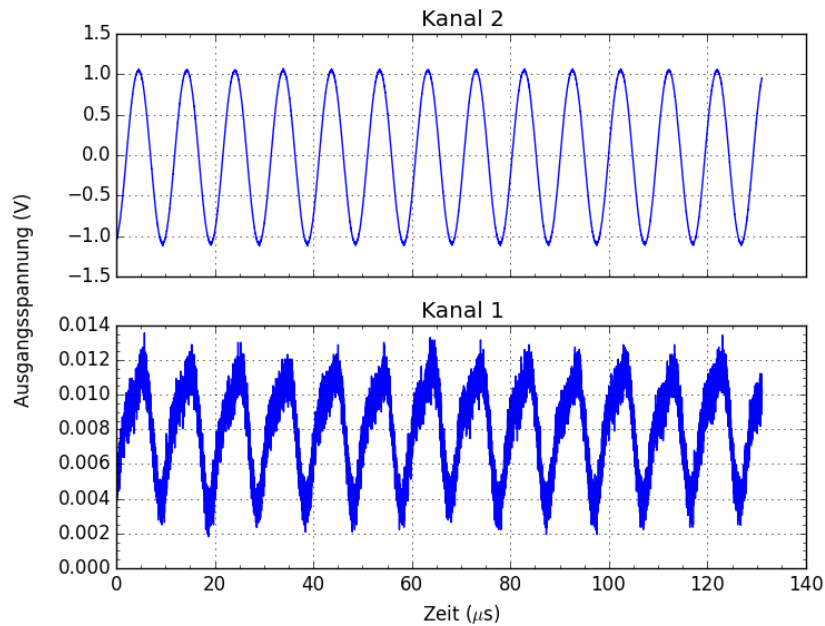


Abbildung 4.13: Ein 100 kHz Sinussignal auf Kanal 2 erzeugt ein beachtliches Signal auf Kanal 1.

4.4.2 AnaRM

Überblick der Signalwege

Auf dem AnaRM befinden sich 3 Multiplexer mit jeweils 3 Eingängen. Dadurch lässt sich einer der acht Eingänge selektieren. Ein Kanal der Multiplexer bleibt ungenutzt. Das Signal wird dann vom Vorverstärker weiterverarbeitet.

Für die folgende Messung wurden zwei Kanäle verglichen deren Leitungen direkt nebeneinander verlaufen und zu dem selben Multiplexer führen. Dadurch kann es zu kapazitiven Kopplungen kommen. Die zwei Signalwege sind in Abbildung 4.14 schematisch dargestellt. Durch die Multiplexer liegen hier nicht zwei gänzlich unabhängige Signalwege vor, wie es bei *Red Pitaya* der Fall ist.

Messung

In Abb. 4.15 ist das an Kanal 7 gemessene Signal dargestellt. Im oberen Bild liegt kein Signal am benachbarten Kanal an, während im unteren ein Sinussignal aufgenommen wird. Es ist kein Unterschied zu sehen.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

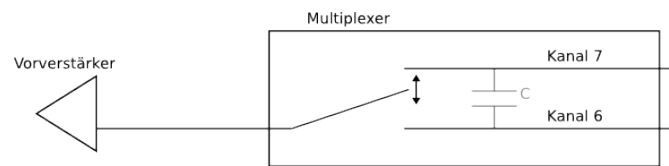


Abbildung 4.14: Die Signalwege zweier benachbarter Eingangskanäle auf dem AnaRM. Ein Crosstalk entspricht einer kapazitiven Kopplung mit einem Kondensator C. Die Abbildung ist vereinfacht. Tatsächlich besitzt das Modul drei Multiplexer mit jeweils drei Eingängen. In diesem Fall wurde aber nur die Abhängigkeit dieser zwei Kanäle untersucht.

In Abb. 4.16 ist das Signal dargestellt wenn am Nachbarkanal ein Rechtecksignal anliegt. Diesmal ist eine Störung feststellbar.

In Tabelle 4.5 sind die Mittelwerte, Standardabweichungen und Spitze-Spitze-Spannungen der Messungen an Kanal 7 angegeben. Selbst die durch das Rechtecksignal hervorgerufene Störung hat keine merklichen Auswirkungen auf den Mittelwert und dessen Fehler.

Kanal 6	Kanal 7	
	Mittelwert (mV)	Spitze-Spitze (mV)
kein Signal	$86,39 \pm 0,97$	5,19
100 kHz Sinus	$86,45 \pm 0,94$	5,83
100 kHz Rechteck	$86,45 \pm 1,05$	30,74

Tabelle 4.5: Crosstalk beim AnaRM: Vergleich zwischen einem Sinussignal, einem Rechtecksignal und keinem Signal am Eingang des benachbarten Kanals.

4 Vergleich zwischen Red Pitaya und AnaRM

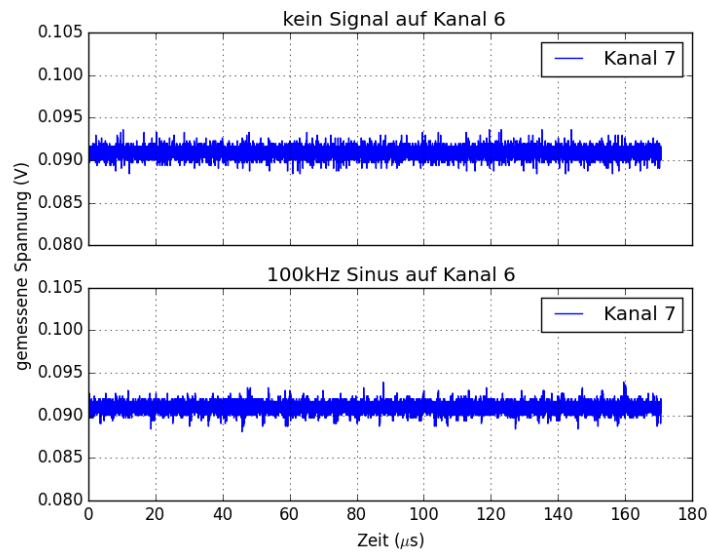


Abbildung 4.15: Vergleich zwischen den Messungen wenn am benachbarten Eingang kein Signal und ein Sinussignal anliegt. Das Sinussignal hat keine Auswirkungen.

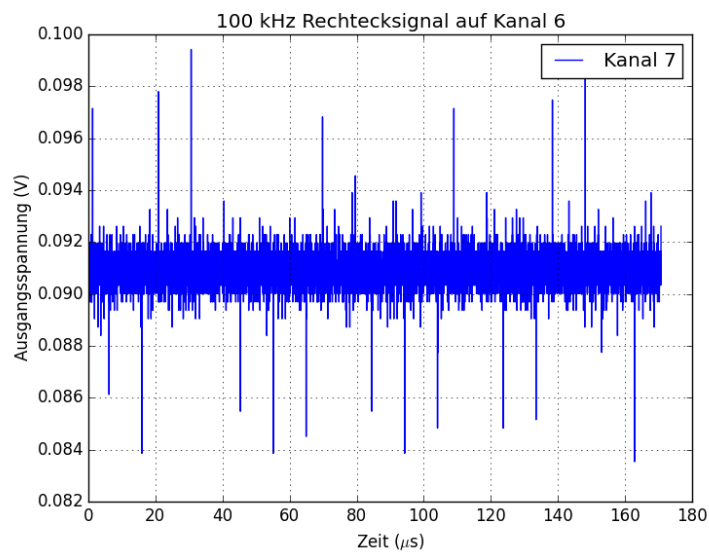


Abbildung 4.16: Bei einem Rechtecksignal auf Kanal 6 ist auf Kanal 7 eine Störung erkennbar.

5 Diskussion

Ziel dieser Arbeit ist es bei der Entscheidung helfen zu können, ob sich *Red Pitaya* als ADC-System im Brainscales Hardware System eignet. Dazu wurde in den vorangegangenen Kapiteln das Messgerät *Red Pitaya* und das bisher verwendete Analog Readout Module (AnaRM) vorgestellt.

Anschließend wurden beide Geräte miteinander verglichen. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über beide ADC-Systeme. Es sind einige wichtige Eigenschaften sowie zusammengefasste Ergebnisse der Messungen aus dem vorherigen Kapitel angegeben.

Red Pitaya bietet die Möglichkeit zwei Kanäle gleichzeitig auszulesen. Dadurch ist hier aber auch ein deutlicher Crosstalk messbar. Das AnaRM besitzt nur einen unabhängigen Kanalweg. Es kann immer nur ein Signal gemessen werden. Ein Crosstalk ist auch deswegen nicht festzustellen.

Bei weiteren Messungen wurde ein Störsignal festgestellt, welches *Red Pitaya* mit einer Frequenz von 70 kHz abstrahlt. Dieses kann in andere Aufbauten einkoppeln und zu unerwünschten Störungen führen. Bei dem AnaRM wurde nichts dergleichen gemessen.

Die Messungen zu den integralen und differentiellen Nichtlinearitäten sind leider nicht besonders aussagekräftig. Das Rauschen des Sourcemeters hat die Messungen zu stark beeinflusst. Die gemessenen Werte sind deutlich zu hoch und auf das Rauschen zurückzuführen. Außerdem konnte die DNL nicht über dem gesamten Bereich gemessen werden, da eine Messreihe sehr oft (~ 100 -mal) aufgenommen werden musste, um das Rauschen zu unterdrücken. Dadurch hätte eine Messung über den gesamten Bereich zu lange gedauert. Für aussagekräftige Werte der INL und DNL müssten weitere Messungen durchgeführt werden.

Die Messungen zur Temperaturabhängigkeit zeigen keine maßgeblichen Unterschiede zwischen den beiden ADC-Systemen.

Bei den Untersuchungen zum Rauschen der Systeme zeigt *Red Pitaya* geringere Spitze-Spitze-Werte. Dies ist allerdings nur der Fall, wenn die Störung abgeschirmt ist.

Letztendlich ist es aber nicht die Absicht des Autors eines der Module gegenüber dem anderen zu empfehlen. Eine Entscheidung hängt von weiteren Faktoren ab, die im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht wurden. In dieser Arbeit wurde vielmehr gezeigt, dass

sich *Red Pitaya* als ADC - Modul im Brainscales Hardware System prinzipiell eignet. Das Messinstrument erfüllt die nötigen Anforderungen. Der ADC bietet eine geeignete Abtastrate und Auflösung. Der zu messende Bereich von 0 - 0,9 V (mit 50 Ω Terminierung) liegt im Eingangsbereich von *Red Pitaya*. Allerdings wird hier ein Bit der maximalen Auflösung nicht genutzt.

Es wurde auch gezeigt, dass sich mit einer geeigneten FPGA Konfiguration der Arbeitsspeicher zum Aufzeichnen der Messwerte nutzen lässt. Dadurch ist eine kontinuierliche Datenaufnahme über einen ausreichenden Zeitraum möglich. Die nötigen FPGA Konfigurationen sind von anderen Nutzern entwickelt worden und öffentlich zugänglich.

Ein wesentlicher Vorteil von *Red Pitaya* gegenüber dem AnaRM ist die geforderte [10] Ethernet Schnittstelle. Des Weiteren kann ein *Red Pitaya* Modul zwei Signale gleichzeitig auslesen. Die Abmessungen des Geräts liegen dabei immer noch in der Größenordnung einer Kreditkarte.

Ein Nachteil ist die Störung die das Gerät abstrahlt. Diese ließe sich aber mit einer passenden Abschirmung unterdrücken. Außerdem sind für *Red Pitaya* im Gegensatz zum AnaRM keine Schaltpläne verfügbar. Die Hardware ist nicht *open source*.

Zusammenfassend wäre *Red Pitaya* nach der Einschätzung des Autors dennoch geeignet und schnell einsatzbereit. Insbesondere da die benötigte FPGA Konfiguration öffentlich zugänglich ist.

	Red Pitaya	AnaRM
Schnittstelle	Gigabit Ethernet	USB 2.0
Abtastrate	125 MS/s	125 MS/s
Eingangsbereich	± 1 V	0 - 0,9 V
Auflösung des ADC	14 Bit	12 Bit
Anzahl der Kanäle	2	Acht Eingänge, davon mit Multiplexern jeweils einer auswählbar
statische Kenngrößen	Messung nicht zufriedenstellend. INL-Messung stark verrauscht. DNL nicht über gesamten Bereich gemessen (siehe Tabelle 4.1).	
Temperaturabhängigkeit	Bei beiden Geräten keine Abhängigkeit im Rahmen des gemessenen Temperaturbereichs und der Messgenauigkeit (siehe Tabelle 4.2).	
Störungen	Störsignal mit 70 kHz. Dieses kann in Messaufbauten einkoppeln.	Keine Störung beobachtet.
Rauschen (100 mV Eingangsspannung)	4,57 mV _{Spitze-Spitze}	8,77 mV _{Spitze-Spitze}
Crosstalk	Deutlicher Crosstalk gemessen.	Kein echter Crosstalk festgestellt. Signalwege nicht völlig unabhängig.

Tabelle 5.1: Der zusammenfassende Vergleich zwischen *Red Pitaya* und dem AnaRM. Aufgeführt sind einige wichtige Kenngrößen der Systeme sowie zusammenfassende Ergebnisse der vorangegangenen vergleichenden Messungen.

6 Ausblick

Letztendlich bin ich zu dem Ergebnis gekommen, dass sich *Red Pitaya* im Brainscales Hardware System einsetzen lässt. Welches Gerät wirklich geeigneter ist, hängt aber von weiteren Faktoren ab. Insbesondere der zeitliche und finanzielle Aufwand lässt sich in meiner Position nicht abschätzen. Entscheidungen dieser Art müssen von anderen getroffen werden. Auch kann ich nicht absehen welche Nachteile entstehen, wenn für das ADC-System keine Schaltpläne verfügbar sind.

Außerdem sind die in der Arbeit dargestellten Messungen zur Bestimmung der INL und DNL nicht zufriedenstellend. Hier müsste das Messverfahren noch verbessert werden.

Die FPGA Konfiguration muss auch noch leicht abgeändert werden, um die geforderte maximale Menge an Messwerten in den Arbeitsspeicher zu schreiben. Aber auch das haben schon andere Nutzer umgesetzt und öffentlich gemacht.

Sollte es dazu kommen, dass *Red Pitaya* eingesetzt wird, muss über eine geeignete Anordnung der Module nachgedacht werden. Insbesondere eine Abschirmung der Störsignale erscheint hier sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- [1] P. Allen, D. Holberg. *CMOS Analog Circuit Design*. Oxford University Press. New York, 1987.
- [2] B. Epp. *Charakterisierung eines ADC Vorverstärkers*. Bericht Projektpraktikum, Universität Heidelberg, 2015.
- [3] A. Friedrich. *Charakterisierung von Adaption auf neuromorpher Hardware*. Bachelorarbeit, Universität Heidelberg, 2014.
- [4] HBP SP9 Specification. Neuromorphic Platform Specification. Human Brain Project, März 2014 URL: <https://gitviz.kip.uni-heidelberg.de/projects/hbp-sp9-specification--d9-7-1>.
- [5] H. Hinsch, *Elektronik - Ein Werkzeug für Naturwissenschaftler*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996.
- [6] M. Hock. *Modern Semiconductor Technologies for Neuromorphic Hardware*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2014.
- [7] Mündliche Kommunikation mit M. Hock, Dezember 2015.
- [8] Schriftliche Kommunikation mit J. Ilmberger, Januar 2016.
- [9] Mündliche Kommunikation mit C. Koke, Januar 2016.
- [10] E. Müller. *Novel Operation Modes of Accelerated Neuromorphic Hardware*. Dissertation, Universität Heidelberg, 2014.
- [11] Mündliche Kommunikation mit E. Müller, Januar 2016.
- [12] D. Schmidt. *Automated Characterization of a Wafer-Scale Neuromorphic Hardware System*. Masterarbeit, Universität Heidelberg, 2014.
- [13] Prof. Dr. H. Ziegler. Skriptum zur Vorlesung *Physikalische Messtechnik A*, Kapitel D *Analog - Digital und Digital - Analog - Wandler*. Universität Paderborn, 1999

Internetquellen (Stand: 29.12.2015)

- [14] Red Pitaya Homepage: <http://redpitaya.com/>
- [15] Red Pitaya Benutzerhandbuch http://wiki.redpitaya.com/index.php?title=User_Manual
- [16] Hardware Spezifikation von Red Pitaya http://wiki.redpitaya.com/index.php?title=Main_Page
- [17] Xilinx Zynq 7010 SoC http://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds187-XC7Z010-XC7Z020-Data-Sheet.pdf
- [18] Interne Dokumentation von *Red Pitaya*: <https://brainscales-r.kip.uni-heidelberg.de/projects/symap2ic/wiki/RedPitaya>
- [19] Interne Dokumentation der AnaRM Kalibrierung: https://brainscales-r.kip.uni-heidelberg.de/projects/adc-calib/wiki/Calibration_Howto
- [20] Übersicht ADC. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/283>
- [21] Open Source FPGA Design für Red Pitaya <https://github.com/HrRossi/RedPitaya.git>

Messgeräte (Stand: 29.12.2015)

- [22] Sourcemeter: Keithley 2635B, System SourceMeter. Produktübersicht: <https://www.keithley.de/products/dcac/currentvoltage/2600B/?mn=2635B>
- [23] Funktionsgenerator: Hewlett Packard 8116A Pulse/Function Generator
- [24] Oszilloskop: LeCroy WaveRunner HRO 64Zi Oscilloscope. Datenblatt: http://cdn.teledynelecroy.com/files/pdf/hro-12bit_datasheet.pdf

Bauteile (Stand: 29.12.2015)

- [25] Spannungsregler: Fairchild LM7805. Datenblatt: <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/lm/LM7805.pdf>

- [26] Operationsverstärker: STMicroelectronics TS 912. Datenblatt: <http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000501.pdf>
- [27] ADC auf dem Flyspi FPGA PCB: Texas Instruments ADS6125. Datenblatt: <http://www.ti.com/product/ads6125>
- [28] ADC auf Red Pitaya: Linear Technology LTC2145. Datenblatt: <http://www.linear.com/product/LTC2145-14>

Bildquellen (Stand: 29.12.2015)

- [29] Abb. 2.1 aus Red Pitaya User's Manual URL: <http://wiki.redpitaya.com/tmp/Interfaces.png>
- [30] Abb. 2.2 aus dem Datenblatt von Red Pitaya: URL: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/12dc/0900766b812dc396.pdf>
- [31] Abb. 3.1 Flyspi PCB aus HBP SP9 Specification URL: <https://gitviz.kip.uni-heidelberg.de/projects/hbp-sp9-specification--d9-7-1>.

Abkürzungen

ADC Analog-to-Digital Converter

AFS Andrew-File-System

DDR3 Double Data Rate 3

FPGA Field Programmable Gate Array

Gb Gigabit

HTML Hypertext Markup Language

LED Light-Emitting Diode

LSB Least Significant Bit

MiB Mebibyte, $1 \text{ MiB} = 2^{20} \text{ Bytes}$

PCB Printed Circuit Board

SD-Karte Secure Digital Memory Karte

SDRAM Synchronous Dynamic Random Access Memory

SMA SubMiniature version A

SoC System on a Chip

SSH Secure Shell

SSHFS Secure Shell File System

USB Universal Serial Bus

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr. Karlheinz Meier und Dr. Johannes Schemmel dafür bedanken, dass sie mir die Möglichkeit gegeben haben in dieser Gruppe arbeiten zu können.

Mein größter Dank geht an meinen Betreuer Matthias Hock, für die umfassende Hilfe während meiner gesamten Arbeit.

Außerdem möchte ich mich noch bei Mitja Kleider und Andreas Hartel bedanken, die mir bei zahlreichen Softwareproblemen geholfen haben und ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Mitja hat mir insbesondere bei der Inbetriebnahme von Red Pitaya und AnaRM geholfen.

Bei Andreas möchte ich mich besonders für das Aufsetzen der neuen FPGA Konfiguration bedanken.

Mein Dank gilt außerdem Gerd Kiene und Joscha Ilmberger sowie Eric Müller und Kai Husmann und allen, die mir während meiner Zeit bei Electronic Vision(s) zur Seite standen.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den 7. Januar 2016

Bernard Epp