

PRAKTIKUMSBERICHT

Charakterisierung der CURE-ADCs

NICO SCHWERSENZ

BETREUER:
MAURICE GÜTTLER,
JOSCHA ILMBERGER

27.02.2019

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick	3
2 Messaufbau	3
3 Messergebnisse	4
4 Auswertung	5
5 Schlussfolgerung	8

1 Überblick

Die Control Units for REticles [1] (CURE-Boards) können Retikel über Mosfets ein- und ausschalten, sowie die an den Retikeln anliegende Spannung überwachen. Ein CURE-Board ist mit 3 Chips ausgestattet. Jeder Chip besitzt einen ADC, der für das Auslesen sämtlicher Spannungen von zwei Retikeln verantwortlich ist. Von jedem Retikel werden mehrere Spannungen ausgelesen, wobei hier nur die 1.8V, 5V und 12V Eingänge vermessen werden. Die verschiedenen Eingänge werden per Multiplexer umgeschaltet.

Im Folgenden wird die Genauigkeit der ADCs untersucht. Es soll überprüft werden, ob die ADCs den Spezifikationen entsprechen.

2 Messaufbau

Das kalibrierte Sourcemeter [2] wird über den Raspberry Pi [3] via USB kontrolliert, der wiederum per ssh zugänglich ist. Das Sourcemeter besitzt einen Ausgang, der direkt auf dem zu messenden CURE-board angelötet wurde und einen Eingang, der die ausgegebene Spannung intern misst. Das CURE-board misst ebenfalls die vom Sourcemeter ausgegebene Spannung und gibt sie auf den Raspberry pi aus via I^2C aus.

Die verbauten ADCs haben eine Referenzspannung von 3.3V. Um sie vor Überspannung zu schützen, sind am 5V und 12V Eingang Spannungsteiler verbaut.

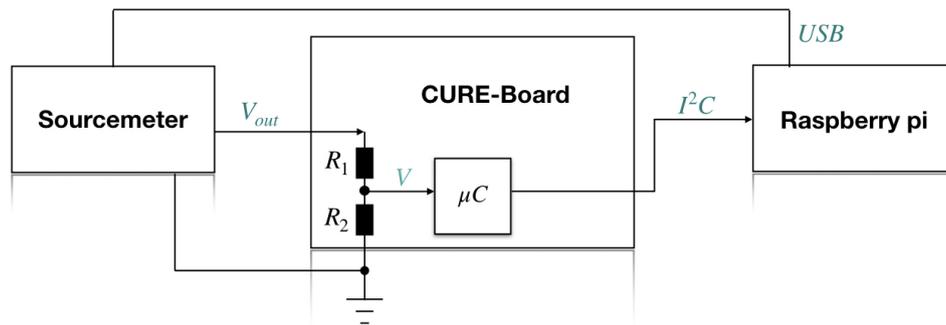


Abbildung 1: Messaufbau mit Spannungsteiler

Die am CURE-Board anliegende Spannung ist durch den Spannungsteiler aus R_1 und R_2 gegeben:

$$V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{out}. \quad (1)$$

Die dafür verwendeten Widerstände haben eine Toleranz von 1%. Es lässt sich nicht die Fehlerfortpflanzung nach Gauss anwenden, da die Verteilung der Widerstände in der Produktion nicht Gauss-verteilt ist. Vielmehr sind die Randwerte zu berücksichtigen. Die größte Spannung V erhält man, wenn R_2 1% über und R_1 1% unter dem angegebenen Wert liegt (V_{max}). Die kleinste Spannung erhält man im umgekehrten Fall (V_{min}). Obwohl die Verteilung der Fehler in positiver Richtung (ΔV_{max}) nicht gleich der in negativer Richtung (ΔV_{min}) ist, wird sie im Folgenden als symmetrisch angenommen. Der Fehler ist dann die halbe Intervallbreite. Die Darstellung und auch die Verständlichkeit profitieren davon.

$$V_{max} = \frac{R_2 + \Delta R_2}{R_2 + \Delta R_2 + R_1 - \Delta R_1} \times V_{out} = \frac{1.01 \times R_2}{1.01 \times R_2 + 0.99 \times R_1} \times V_{out} \quad (2)$$

$$V_{min} = \frac{R_2 - \Delta R_2}{R_2 - \Delta R_2 + R_1 + \Delta R_1} \times V_{out} = \frac{0.99 \times R_2}{0.99 \times R_2 + 1.01 \times R_1} \times V_{out} \quad (3)$$

$$\Delta V = \frac{1}{2} \times (V_{max} - V_{min}) \quad (4)$$

3 Messergebnisse

Für den 1.8V Eingang wurden Spannungen von 0 V bis 1.9 V durchlaufen, für den 5 V Eingang bis 5.2 V und für den 12 V Eingang bis 12.2 V. Start- und Stop-Werte wurden am Raspberry Pi gesetzt, der dann 10000 äquidistante Spannungen am Sourcemeter setzte. Die Spannung wurde sowohl vom Sourcemeter als auch vom CURE-Board ausgelesen. Für die folgenden Diagramme dient allerdings nicht die vom Sourcemeter gesetzte sondern die vom Sourcemeter gemessene Spannung V_{in} als Referenz, die vom Sourcemeter intern gemessen wird.

An den Plot CURE-Spannung gegen Sourcemeter-Spannung wurde ein linearer Fit gelegt, dessen Fit-parameter später verglichen werden (Steigung und y-Achsenabschnitt). Anschließend wurde dieser Fit punktweise von den Messwerten abgezogen wurde.

Aufgetragen wird zum Einen die vom CURE-Board gemessene Spannung minus den Fit an die Daten (Residuum) gegen die vom Sourcemeter gemessene Spannung. Die Messwerte liegen daher um $y=0$ verteilt. So lassen sich eventuelle systematische Tendenzen besser erkennen. Zum Anderen ist die Winkelhalbierende gegen die vom Sourcemeter gemessene Spannung aufgetragen. Rechts daneben ist die Statistik der Messung inklusive Gaussfit bei 10000 Messungen zu sehen.

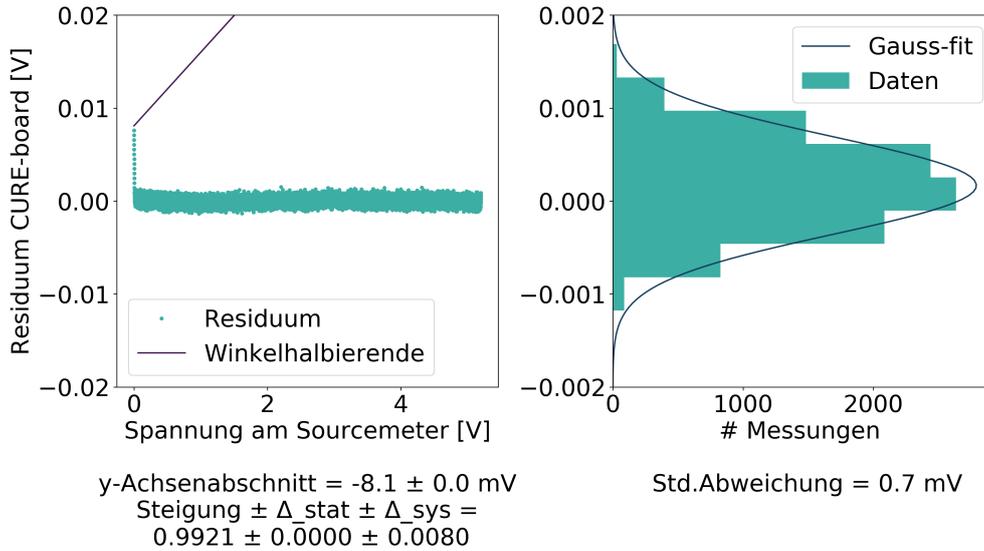


Abbildung 2: Spannungsdurchlauf am 5V Eingang. Zu sehen sind links das Residuum der CURE-Spannung gegen die vom Sourcemeeter gemessene Spannung V_{in} . Der y-Achsenabschnitt sowie die Steigung sind die Fit-Parameter des Geraden-Fits an die Daten. Auffällig ist die Abweichung unter 0.1 V. Die Winkelhalbierende ist nicht flach, da der lineare Fit wie oben beschrieben nicht die Steigung 1 hat. Rechts das Histogramm mit Gauss-Fit dargestellt.

4 Auswertung

Der lineare Fit beschreibt die Daten gut, der Regressionskoeffizient weicht um 10^{-8} von 1 ab.

Der y-Achsenabschnitt sowie die Steigung sind die Fitparameter des linearen Fits an die Daten. Die statistischen Fehler ergeben sich aus der Fitungenauigkeit. Da ein linearer Zusammenhang zwischen V_{out} und V_{in} besteht, wobei der Proportionalitätsfaktor aus dem Spannungsteiler hervorgeht, ist der systematische Fehler in der Geradensteigung gerade der Fehler aus beiden Widerständen im Spannungsteiler (Gleichung 4).

Auffällig ist die große Abweichung der Messwerte von der Winkelhalbierenden bei kleinen Spannungen bis zu 0.1 V, die bei allen Spannungsdurchläufen auftritt. Die Auflösung der ADCs, die mit 12 Bit bei einer Referenzspannung von 3.3 V

$$1LSB = 3.3V/2^{12} \approx 8.06 * 10^{-4}V \quad (5)$$

entspricht, ist nicht dafür verantwortlich. Was zu dieser systematischen Abweichung führt, wird hier nicht weiter untersucht.

Da mit den ADCs keine Spannungen nahe 0V detektiert werden sollen, wird im

Folgenden nur der relevante Bereich untersucht. Von den 10000 Messwerten wurden deshalb die letzten 2000 Messwerte ausgewählt. Das führt dazu, dass nur Spannungen bis zu 16%, 17% und 19% unter bzw. 6%, 4% und 2% über dem Nennwert berücksichtigt werden - für den 1.8V, 5V und 12V Eingang respektive. Das führt dazu, dass die Randwerte die Statistik und damit den Gaussfit nicht beeinflussen (Abb. 3).

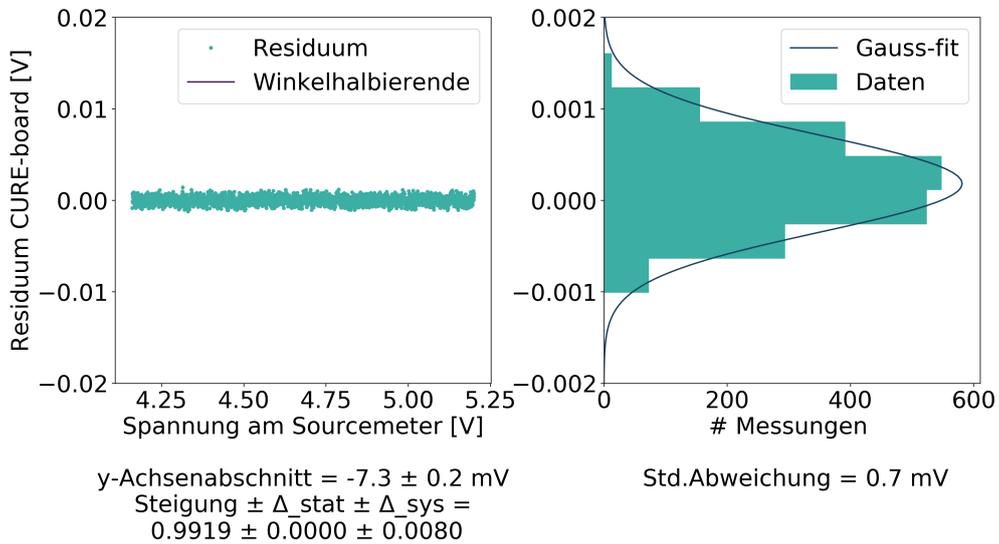


Abbildung 3: Wie in Abb. 3, reduziert auf die Messwerte 8000 bis 10000.

Zusätzlich wurde eine Mehrfachmessung bei konstanter Spannung gemacht, um die statistischen Eigenschaften der ADCs zu untersuchen. Vor jedem Auslesen der Spannung wurde die Spannung neu gesetzt. Das Histogramm für 10000 Messwerte am 1.8 V Eingang ist in Abbildung 4 zu sehen. Die Messgenauigkeit ist mit 2LSB sehr gut.

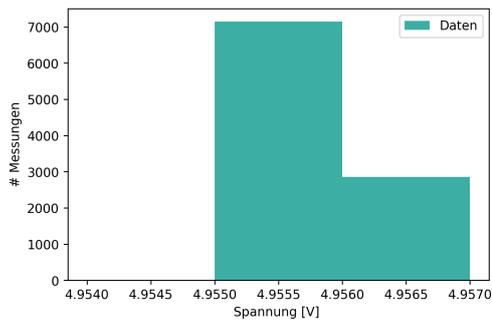


Abbildung 4: Geringe Streuung der Einzelmessung von 2 LSB am 5V-Eingang

Die Messergebnisse sind in drei Tabellen dargestellt, je eine Tabelle für eine Eingangsspannung. Eingetragen sind Boardnummer, Retikelnnummer, die Steigung des Geraden-Fits, sowie der y-Achsenabschnitt des Geraden-Fits Y_0 . Außerdem ist in der letzten Spalte die Standardabweichung des Gauss-Fits σ des Histogramms des Residuums zu sehen. Die statistischen Fehler entspringen dem Fit-Fehler. Der systematische Fehler beim 1.8V Eingang ist durch den Fehler des ADCs an sich bestimmt aus den Fehlern der beiden Widerstände im Spannungsteiler (Gleichung 2).

Board	Retikel	Steigung $\pm\Delta_{stat} \pm \Delta_{sys}$	$Y_0 \pm \Delta_{stat}$ [mV]	σ [mV]
002	4	$0.996 \pm 0.001 \pm 0.0044$	12.4 ± 1.4	5.9
002	5	$1.00 \pm 0.001 \pm 0.0044$	3.9 ± 1.2	5.9
107	1	$0.999 \pm 0.001 \pm 0.0044$	0.3 ± 1.1	4.4
107	3	$0.995 \pm 0.001 \pm 0.0044$	10.9 ± 2.2	8.5

Tabelle 1: Fitparameter für den Spannungsdurchlauf von 0V bis 1.9V, nur die letzten 2000 von insgesamt 10000 Messwerten sind berücksichtigt. Steigung und y-Achsenabschnitt Y_0 aus dem linearen Fit der Daten, der statistische Fehler entspricht dem Fit-Fehler, der systematische Fehler ist durch die Toleranz der Widerstände bestimmt. Die Std.-Abweichung σ kommt aus dem Histogramm des Residuums.

Board	Retikel	Steigung $\pm\Delta_{stat} \pm \Delta_{sys}$	$Y_0 \pm \Delta_{stat}$ [mV]	σ [mV]
002	4	$0.992 \pm 0 \pm 0.008$	-7.3 ± 0.2	0.7
002	5	$0.995 \pm 0 \pm 0.008$	-1.5 ± 0.1	0.7
107	1	$0.993 \pm 0 \pm 0.008$	2.3 ± 0.2	0.7
107	3	$0.991 \pm 0 \pm 0.008$	-0.4 ± 0.2	0.7

Tabelle 2: Fitparameter für den Spannungsdurchlauf von 0V bis 5.2V, nur die letzten 2000 von insgesamt 10000 Messwerten sind berücksichtigt.

Board	Retikel	Steigung $\pm\Delta_{stat} \pm \Delta_{sys}$	$Y_0 \pm \Delta_{stat}$ [mV]	σ [mV]
002	4	$0.992 \pm 0 \pm 0.015$	-17.6 ± 0.4	2.0
002	5	$0.988 \pm 0 \pm 0.015$	-11.2 ± 0.4	1.7
107	1	$0.986 \pm 0 \pm 0.015$	-24.2 ± 0.4	1.7
107	3	$0.990 \pm 0 \pm 0.015$	-18.3 ± 0.4	1.8

Tabelle 3: Fitparameter für den Spannungsdurchlauf von 0V bis 12.2V, nur die letzten 2000 von insgesamt 10000 Messwerten sind berücksichtigt.

Die Geradensteigung ist im Idealfall 1. Sie liegt damit fast überall im Fehlerbereich.

Der Offset liegt für die 1.8 V und 5 V Eingänge bei maximal 10.9 mV, für den 12 V Eingang bei maximal 24.2 mV. Es kommen sowohl positive als auch negative Offsets vor.

Die Streuung der Messwerte liegt bei 0.7 mV für den 5 V Eingang über maximal 2 mV für den 12 V Eingang bis hin zu 8.5 mV für den 1.8 V Eingang. Die Einzelmessung ist damit am 5V-Eingang am genauesten.

Die vielleicht wichtigste Größe ist aber die totale Abweichung der vom CURE-Board gemessene Spannung bei der Referenz. Die gemessene Spannung lässt sich aus dem Geraden-Fit berechnen. Dies entspricht der mittleren gemessenen Spannung, da hier statistische Schwankungen schon korrigiert sind. Es wurde über die vier ADCs gemittelt. Da der Fehler der Widerstände proportional zur Spannung ist, ist die totale Abweichung für den 12V Eingang am größten. Der Fehler der Steigung setzt sich aus der Ungenauigkeit des ADCs selbst und der Ungenauigkeit der Widerstände zusammen. Die totale Abweichung wurde dem Widerstandsverhältnis entsprechend in LSB umgerechnet.

V_{Ref}	Steigung	Δ steigung	γ_0 [mV]	σ [mV]	Δ_{ges} [mV]	Δ_{ges} [LSB]
1.8	0.9974	0.0044	6.9	6.2	11.4	14
5	0.9926	0.0091	-1.7	0.7	34.5	26
12	0.9890	0.0156	-17.8	1.8	114.2	35

Abbildung 5: Zusammenfassung der Messergebnisse inklusive totalem Fehler Δ_{ges} gemittelt über vier ADCs für die drei Eingänge

Es gibt Faktoren, die zwar in die Messung mit eingehen, aber nicht bei der Fehlerrechnung berücksichtigt wurden. Dazu gehören Zuleitungswiderstände, Kapazitäten und Induktivitäten. Erstere haben die gleiche Auswirkung wie der Spannungsteiler, sie ändern die Steigung der Fitgeraden. Das könnte der Grund sein, dass die Geradensteigungen teilweise leicht nach unten abweichen. Kapazitäten und Induktivitäten bewirken, dass die benötigte Auslesezeit und damit der Fehler der Einzelmessung steigt, was hier nicht weiter untersucht wurde. Die Raumtemperatur schwankte um maximal 0.5 °C im Messzeitraum, sodass Fehler bedingt durch Temperaturschwankungen auszuschließen sind.

5 Schlussfolgerung

Ziel war es, zu untersuchen, ob die Genauigkeit der ADCs innerhalb der Fehler liegt.

Der y-Achsenabschnitt liegt bei wenigen 10mV und ist somit nicht besonders relevant.

Entscheidend ist der Fehler durch die Widerstände, der zu einem zur Spannung linearen Fehler führt. Dementsprechend ist dieser Fehler am 1.8V Eingang am kleinsten mit etwa 10mV.

Obwohl der totale Fehler am 12V Eingang mit 114mV recht hoch ist, liegt dieser innerhalb der Genauigkeit, die durch die Widerstände limitiert ist

Literatur

- [1] Joscha Ilmberger. Development of the control unit for reticles (cure) for the wafer-scale integration system (wsi) v2.1, 2014.
- [2] Tectronix. *Keithley Sourcemeeter 2635*. Keithley Instruments, Mai 2013.
- [3] Adafruit. *Raspberry Pi*. Adafruit, 2014.