

Bachelor Thesis

**Untersuchung zur
Strahlentoleranz elektronischer
Komponenten im Hinblick auf
ihren Einsatz in der
Ausleseelektronik des
Elektromagnetischen
Kalorimeters des $\overline{\text{PANDA}}$
Experimentes**

von Matthias Sachs
Justus Liebig Universität Gießen

Sommersemester 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Das \bar{P}ANDA Experiment	5
2	Interaktion und Auswirkungen	7
2.1	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie	7
2.1.1	Herauslösen von Elektronen aus den Atomhüllen (Ionisation)	7
2.1.2	Comptoneffekt	7
2.1.3	Paarerzeugung von Elektron und Positron	8
2.1.4	Bremsstrahlung	8
2.2	Strahlungsschäden und Ausheilung	9
2.3	Verhalten von Halbleitern bei Strahlung	10
2.3.1	Erhöhung des Dunkelstroms	10
2.3.2	Änderung der Ladung	11
2.3.3	Trapping Centers	11
2.4	Abhängigkeit von der Dosis	12
2.5	Ausheilungsprozesse	13
2.6	Auswirkungen auf Schaltungen	14
2.7	Auswirkungen von Strahlung auf das elektronische Rauschen	15
2.8	Maßnahmen gegen Strahlungsschäden	16
3	Versuchsspezifisch	17
3.1	Spannungsregler	17
3.2	Aufbau des Reglerboards	18
3.3	Versuchsaufbau	20
3.4	Quelle und Bestrahlungsplan	20
3.5	Weitere Geräte	21
3.6	Versuchsdurchführung	22
4	Versuchsauswertung	23
4.1	MCP1703	23
4.2	TPS79333	23
4.3	Rauschverhalten	27
4.4	Umbau und Aufrüsten des Reglerboards	28
4.5	LP2992	29
4.6	REG102	31
4.7	TPS73218	33
4.8	Zusammenfassung der Ergebnisse	36
5	Ausblick und Verbesserungen	37

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, die vorgelegte Thesis selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt zu haben, die ich in der Thesis angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Thesis erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der ‚Satzung der Justus-Liebig-Universität zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis‘ niedergelegt sind, eingehalten. Gemäß § 25 Abs. 6 der Allgemeinen Bestimmungen für modularisierte Studiengänge dulde ich eine Überprüfung der Thesis mittels Anti-Plagiatssoftware.

Datum

Unterschrift

1 Das $\bar{\text{PANDA}}$ Experiment

Das $\bar{\text{PANDA}}$ Experiment ist ein Großexperiment. Stehen soll es an der FAIR-Anlage, die derzeit auf dem Gelände der GSI in Darmstadt gebaut wird. Mehr als 450 Physiker aus 17 Ländern sind bei diesem Schlüsselexperiment beteiligt, welches einen tiefen Einblick in die Welt des Standardmodells ermöglichen soll. Bei $\bar{\text{PANDA}}$ sollen hochenergetische Antiprotonen mit Impulsen zwischen $1,5 \frac{\text{GeV}}{c}$ und $15 \frac{\text{GeV}}{c}$ auf verschiedene Protonen-Targets geschossen werden. Durch den Aufbau als Fixed-Target-Experiment erhofft man sich hohe Luminositäten, die im Bereich von $2 \cdot 10^{32} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-1}$ liegen. Durch die Annihilation von Protonen und Antiprotonen entstehen neue Teilchen, die mit dem $\bar{\text{PANDA}}$ Detektor gemessen werden sollen. Wie auch in anderen Hochenergieexperimenten wird der Detektor nach dem Zwiebelschalenmodell gebaut. Der schematische Aufbau ist in Abbildung (1.0.1) gezeigt. Um den Wechselwirkungspunkt herum befindet sich das elektromagnetische Kalorimeter (EMC), welches unter anderem in Gießen gebaut wird. Das EMC soll geladene Teilchen messen, die durch die Anihilation von Protonen und Antiprotonen entstehen. Zu den detektierbaren Teilchen zählen Photonen und Elektronen, aber auch Hadronen. Die Kristalle, die für das EMC verwendet werden, bestehen aus Bleiwolframat PbWO_4 . Diese sind wie in einem Fass ringförmig angeordnet. Um den kompletten Raumwinkel von 4π

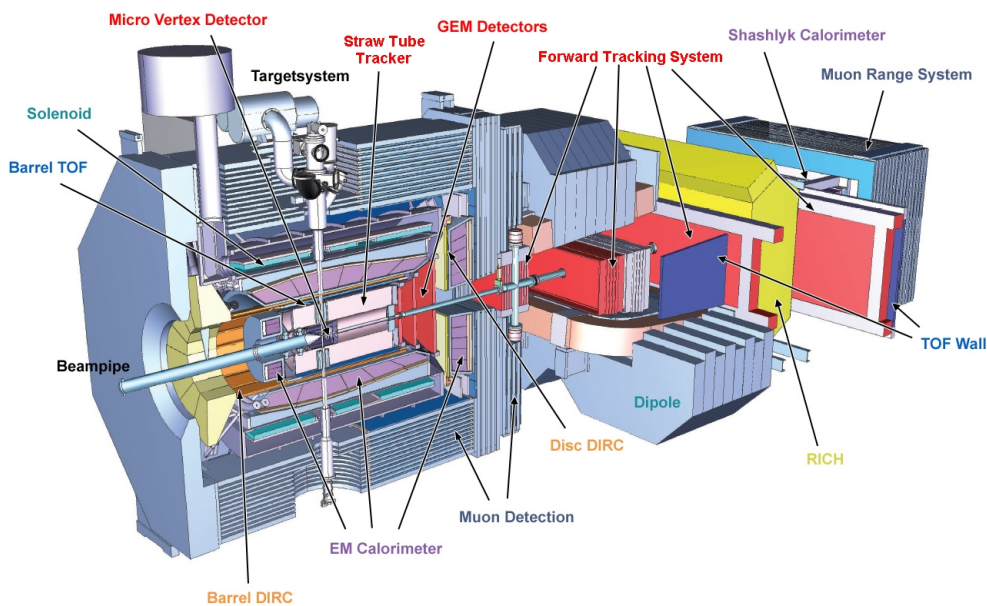


Abbildung 1.0.1: $\bar{\text{PANDA}}$ Detektor

[1]

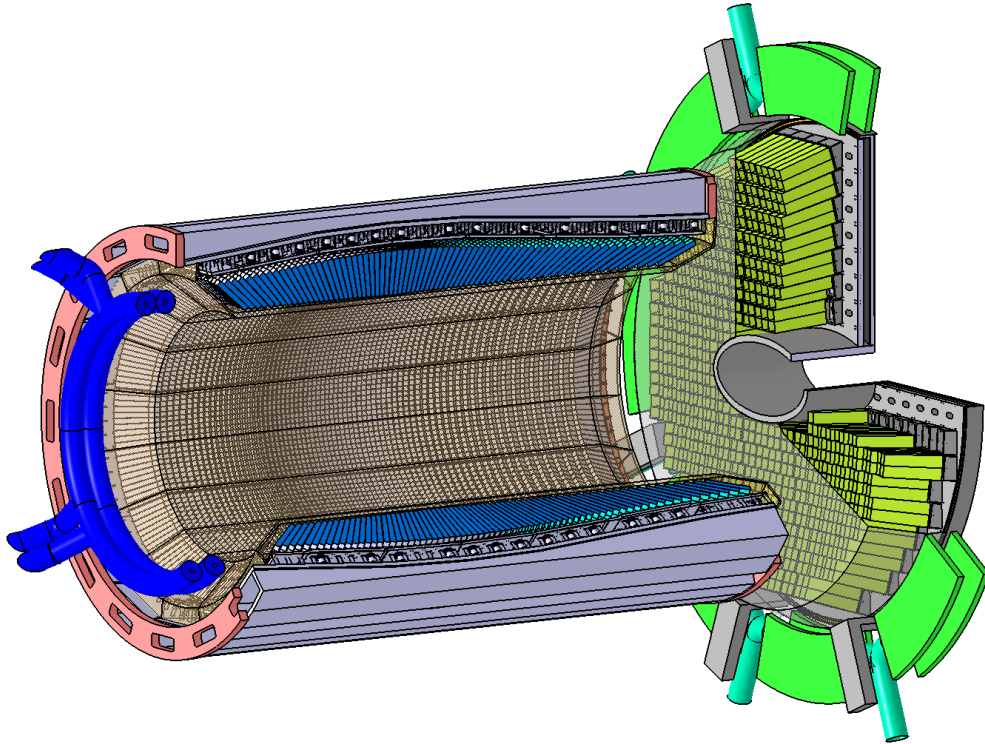


Abbildung 1.0.2: Elektromagnetische Kalorimeter

[1]

abzudecken, werden die offenen Enden des Fasses mit Kappen, welche ebenfalls mit Kristallen bestückt sind, abgedeckt. An der Rückseite eines jeden Kristalles kleben zwei Avalanche-Photodioden (APDs), welche die Lichtausbeute messen. Die APDs bieten sich an, da sie auch in hohen Magnetfeldern, wie sie im Detektor herrschen, funktionieren. An den APDs hängt die Ausleseelektronik des EMC, welche die Daten aller APDs sammeln und auslesen soll. Da nach dem EMC noch weitere Bestandteile des Detektors folgen, ist die Elektronik des EMCs Strahlung ausgesetzt. Ob und welche Effekte dies auf die Elektronik hat, soll im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden.

2 Interaktion und Auswirkungen

2.1 Wechselwirkung von Strahlung mit Materie

Betrachtet man die Wechselwirkung von Strahlung mit Materie, so muss man zwischen geladener und ungeladener Strahlung unterscheiden. Schwere geladene Teilchen wechselwirken über die Coulombwechselwirkung und lassen sich durch die Bethe-Bloch-Gleichung beschreiben. Da in dieser Arbeit nur mit einer γ -Quelle gearbeitet wurde, soll im folgenden die Wechselwirkung von nicht geladenen Teilchen genauer betrachtet werden. In Abbildung (2.1.1) ist der Absorptionskoeffizient in Abhängigkeit der Photonenenergie in einem beliebigen Absorber gezeigt. Der totale Verlauf ist als Summe der drei wichtigsten Effekte geplottet.

2.1.1 Herauslösen von Elektronen aus den Atomhüllen (Ionisation)

Der schon 1905 von Albert Einstein theoretisch beschriebene Photoelektrische Effekt ermöglicht es Photonen mit Materie zu interagieren. In der Erklärung fiel zum erstenmal der Begriff des Lichtquanten. Beim Einstrahlen der Lichtquanten auf eine Photokathode werden durch die Photonen Energie auf die sich in der Kathode befindlichen Elektronen übertragen. Wenn die Energie der Photonen groß genug ist, so können die Elektronen das Coulombpotential der Atome verlassen, wodurch eine Ionisierung entsteht. Die Bedingung für den Photo-Effekt lautet

$$E_\gamma = h \cdot \nu = W_a + E_{\text{kin}} \quad (2.1)$$

Dabei ist W_a die Auslösearbeit und E_{kin} die kinetische Energie der Elektronen. Der Photo-Effekt findet im niederenergetischen Bereich, bis zu ungefähr 5 MeV statt. Dominant ist er jedoch nur bis zu Energien von 1 MeV. Der dominierende Anteil für größere Energien wird vom Comptoneffekt verursacht.

2.1.2 Comptoneffekt

Im Energiebereich zwischen 1 und 10 MeV findet der Comptoneffekt statt. Die Photonen werden im Feld eines Atoms an dessen Valenzelektronen gestreut. Anders als beim Photo-Effekt werden die Photonen nicht absorbiert, sondern verlieren nur einen Teil ihrer Energie, wodurch sie ihre Wellenlänge ändern. Betrachten kann man den Effekt klassisch als elastischen Stoß. Aus den Erhaltungssätzen für Impuls und Energie lässt sich die Wellenlängenänderung durch

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e \cdot c} (1 - \cos(\theta)) \quad (2.2)$$

berechnen.

2 Interaktion und Auswirkungen

2.1.3 Paarerzeugung von Elektron und Positron

Einsteins berühmte Formel $E = mc^2$ legt den Grundstein für den dritten Effekt der Wechselwirkung mit Materie. Bei der Paarerzeugung reicht die Energie der Photonen aus um ein Elektron und ein Positron zu erzeugen. Dafür muss die Energie die Ruhemasse von Elektron und Positron übersteigen. Bei einer Ruhemasse des Elektrons von $0,511 \frac{\text{MeV}}{c^2}$ setzt die Paarerzeugung ab ungefähr 1 MeV ein und dominiert ab 10 MeV die Wechselwirkung. Zu beachten ist, dass durch die Erzeugung ein Rückstoß auf den Kern erfolgt, welcher ebenfalls kompensiert werden muss. Dadurch ergibt sich für die benötigte Energie

$$E_\gamma \geq 2 \cdot m_e c^2 + 2 \frac{m_e c^2}{m_{\text{Kern}}} c^2 \quad (2.3)$$

Bei der Paarerzeugung unterscheidet man zwischen der Erzeugung am Kern und an den Valenzelektronen. Entsteht das Paar im Feld des Kernes, so geht die Energie des Photons nur in die Masse und die kinetische Energie des Paares. Bei der Erzeugung an einem Valenzelektron wird ein Teil der Energie auf das Elektron übertragen und durch den hohen Impulsübertrag aus dem Atom herausgeschlagen, wodurch nach dem Wechselwirkungsprozess drei Teilchen frei werden.

2.1.4 Bremsstrahlung

Die in den vorher beschriebenen Prozessen frei werdenden Elektronen können nach ihrer Freisetzung ebenfalls mit der Materie wechselwirken. Eine mögliche Wechselwirkung ist die Ablenkung eines Elektrons im elektrischen Feld eines Atomkernes. Das Elektron ändert seine Richtung, wodurch es Energie, welche in Form eines γ -Quants entsteht, abgibt. Ist dieses Photon noch energiereich, so kann es erneut mit der Materie wechselwirken.

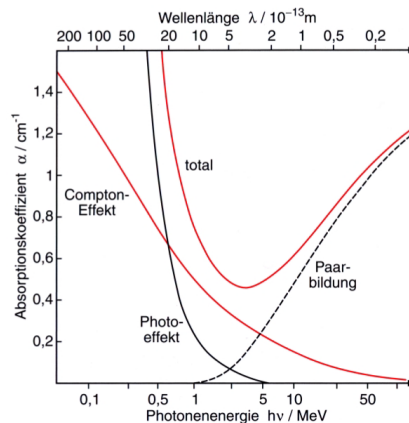


Abbildung 2.1.1: Energieverlust von Photonen in Abhängigkeit ihrer Energie

[2]

2.2 Strahlungsschäden und Ausheilung

Um die Schäden durch Strahlung besser zu charakterisieren, muss man sie in verschiedene Prozesse einteilen. Man unterscheidet bei Strahlung zwischen ionisierenden und nicht ionisierenden Teilchen. Die ionisierende Strahlung gibt man in Gray [$1\text{Gy} = 1\frac{\text{J}}{\text{Kg}}$] an. Bei nicht ionisierenden Teilchen wird der Teilchenfluss [cm^{-2}] angegeben. Man kann die Schäden durch Strahlung in verschiedene Kategorien einteilen.

Primäre Schäden entstehen direkt bei der Bestrahlung, während sekundäre Schäden erst später auftreten. Diese werden meistens von primären Effekten ausgelöst. Die Art der Schäden hängt maßgeblich mit der Art der Strahlung zusammen. So schädigen schwere Teilchen wie Protonen oder Neutronen die Gitterstruktur von Kristallen und Halbleitern, da der Impulsübertrag bei einem Stoß größer als bei leichten Teilchen ist.

In Abbildung (2.2.1) sind verschiedene Möglichkeiten für Fehlstellen visualisiert. Der Frenkel-Defekt ist ein Punktfehler im Gitter. Durch ein einfallendes Teilchen wird ein Atom aus dem Gitter geschlagen (PKA= Primary Knock-on Atom). Dieses hinterlässt eine Fehlstelle und kann bei genügend hoher Energie weiter Defekte verursachen. Eine Leerstelle ist ein unbesetzter Platz im Gitter. Wird in die Leerstelle ein Fremdatom eingebaut, so spricht man von einer Verunreinigung im Gitter. Die Fremdatome können sich auch zwischen den Gitteratomen befinden, ebenso wie herausgeschlagene Atome des Gitters. Wenn die Schäden im Gitter sich über mehrere Gitterpunkte strecken, spricht man von Clusterdefekten. Um die Schäden in Abhängigkeit der Teilchensorte zu verdeutlichen, liefert Tabelle (2.2.2) ein Beispiel. Es handelt sich um einen Siliziumkristall, der mit verschiedenen Teilchen beschossen wird, wobei jeder Strahl eine Energie von 1 MeV besitzt. Aus der Tabelle kann man erkennen, dass die Wechselwirkung und die Masse der Teilchen für die Schäden verant-

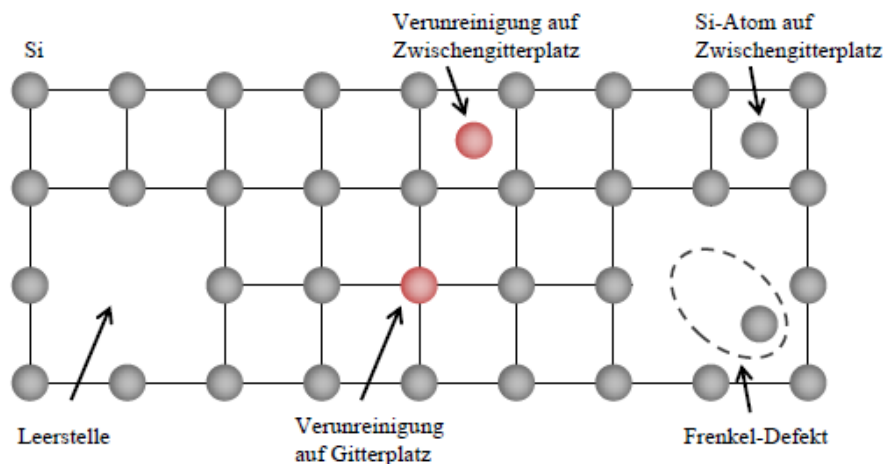


Abbildung 2.2.1

[4]

2 Interaktion und Auswirkungen

Strahlung	e ⁻	p ⁺	n	Si ⁺
Wechselwirkung	Coulomb	Coulomb und starke Ww.	starke Ww.	Coulomb
T_{max}	155 eV	133.7 keV	133.9 keV	1 MeV
T_{av}	46 eV	210 eV	50 keV	265 eV
E_{min} für Punktdefekt	260 keV	190 eV	190 eV	25 eV
E_{min} für Cluster-Defekt	4.6 MeV	15 keV	15 keV	2 keV

Quelle: G. Lutz, *Semiconductor Radiation Detectors*, Springer-Verlag, 1999

Abbildung 2.2.2: Schäden

wortlich sind. Dabei ist T_{max} die maximale und T_{av} die durchschnittliche Stoßenergie. Die Schwereren Teilchen haben einen höheren Impuls und schädigen das Gitter viel stärker. Je nach Ladung der Teilchen wird die Stoßenergie größer oder kleiner.

Photonen und leichte geladene Teilchen können der Gitterstruktur nur sehr wenig anhaben. Dafür schädigen sie amorphe Oxide, welche unempfindlich gegen schwere Teilchen sind, da sie keine Kristallstruktur aufweisen und eine Versetzung kein Problem darstellt. Da Oxide als Isolator verwendet werden, bleiben die generierten Ladungen in den Bauteilen und erzeugen neue Ladungszentren.

2.3 Verhalten von Halbleitern bei Strahlung

Um die Auswirkungen auf die zu untersuchende Elektronik zu verstehen, muss man sich die Bandstruktur anschauen. Egal durch welche Strahlung die Schäden verursacht werden, es entstehen meistens neue Energieniveaus in der Bandlücke.

2.3.1 Erhöhung des Dunkelstroms

Neue Energieniveaus unter dem Valenzband können den Dunkelstrom erhöhen. Der Dunkelstrom, oder auch Leckstrom, ermöglicht es thermisch angeregten Elektronen die Bandlücke zu überwinden und ins Leitungsband zu gelangen. Wurden nun durch Kristalldefekte neue Energieniveaus in die Bandlücke eingefügt, so gelangen mehr Elektronen ins Leitungsband und der Dunkelstrom nimmt zu. Zwischen dem Dunkelstrom und dem Fluss der Strahlung besteht ein linearer Zusammenhang. Die Proportionalitätskonstante α nennt man die Damage Rate, welche materialunabhängig ist.

$$\frac{\Delta I_d}{V} = \alpha \cdot \phi_{eq} \quad (2.4)$$

Durch den erhöhten Stromfluss nimmt die Temperatur in dem Halbleiter zu, wodurch auch die thermische Anregung zunimmt. Dies nennt man einen Thermal

Runaway. Das Risiko steigt, wenn der Halbleiter schon vor Beginn der Benutzung warm ist. Durch eine niedrige Betriebstemperatur und Kühlung kann man dem entgegenwirken.

2.3.2 Änderung der Ladung

Eine Veränderung von Energieniveaus kann auch an PN-Übergängen schwerwiegende Probleme erzeugen. Durch die Fehler in der Gitterstruktur kann sich die Dotierkonzentration, welche die Differenz von Donator- und Akzeptorkonzentration ist, verändern. Bei einem n-dotierten Halbleiter wirken die neuen Energieniveaus wie Akzeptoren, wodurch die Konzentration der Donatoren sinkt. Sind alle Elektronen der Donatoren absorbiert, so setzt eine Typinversion ein, da weiter Akzeptoren durch die Fehlstellen entstehen. Durch die Veränderung der effektiven Dotierung ändert sich auch die Depletionsspannung, da sie über folgenden Zusammenhang mit der effektiven Dotierung zusammenhängt:

$$V_{\text{dep}} = \frac{e}{2\epsilon\epsilon_0} N_{\text{eff}} D^2 \quad (2.5)$$

Die Depletionsspannung ist die minimale Spannung, die benötigt wird, um den PN-Übergang komplett zu verarmen. Wird diese größer, kann die benötigte Spannung irgendwann nicht mehr von der Elektronik aufgebracht werden, wodurch der Übergang nicht mehr so genutzt werden kann wie geplant. Um dies zu verdeutlichen ist in Abbildung (2.3.1) die Typinversion eines Feldeffekttransistors gezeigt. Man erkennt, wie das n-dotierte Silizium sich invertiert und die Depletionszone größer wird.

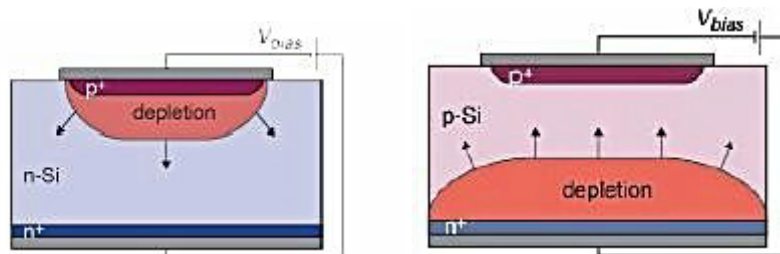


Abbildung 2.3.1: Vor und nach der Typinversion

[5]

2.3.3 Trapping Centers

Ladungsträger, die durch einen Halbleiter fließen, können von ungeladenen Störstellen eingefangen und verzögert wieder abgegeben werden. Dies ist vor allem in Bauteilen ein Problem, welche mit hoher Zeitaufösung betrieben werden, da sich die Signale verzögern. Es ist ebenfalls möglich, dass Elektronen mit Löchern, die durch die Strahlung entstehen, rekombinieren und dadurch überhaupt nicht ankommen. Diese Fallen sorgen für eine Verschlechterung der Signale.

RADIATION DAMAGE MECHANISMS

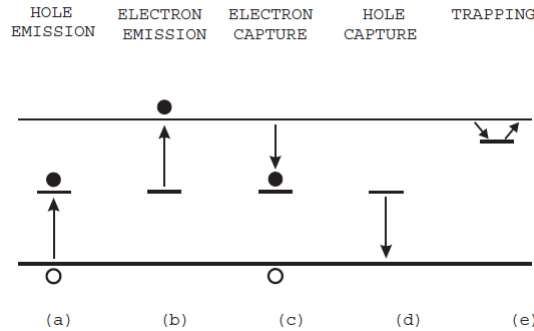


Abbildung 2.3.2: Halbleitereffekte bei Strahlung [8]

2.4 Abhängigkeit von der Dosis

Die Auswirkungen auf die Halbleiterbauteile ist von der Dosis abhängig. Um die Schäden zu beschreiben, wird das Norgett–Robinson–Torrens-Modell (NRT) verwendet. Es beschreibt eine Vorhersage für die Anzahl der Defekte, die durch das PKA erzeugt und durch "Damage Functions" beschrieben werden. Ein Beispiel für eine solche Funktion ist

$$\nu(T) = \frac{\kappa E_D(T)}{2E_d} [7] \tag{2.6}$$

, welche die Anzahl der Frenkeldefekte durch das PKA in Abhängigkeit der Energie T beschreibt. $E_D(T)$ ist die "Damage Energy" des PKA, während E_d die zum Herauslösen benötigte Energie ist. Der Faktor κ ist die "displacement efficiency" und liegt ungefähr bei 0,8. Durch Integration der Damage Funktion über das Spektrum der Rückstoßenergie und die Zeit erhält man die "displacements per atom", welche ein besseres Maß für die Schäden als der Teilchenfluss ist.

Für die Bestrahlung mit Photonen zeigt die Damage Function ein sättigendes Verhalten. Nach [3] gilt für die Änderung der Stromverstärkung B eines MOS-FET mit der Dosis D .

$$\Delta \frac{1}{B} = K \cdot D^n \tag{2.7}$$

K ist eine Konstante des Transistors. Das sättigende Verhalten lässt sich mit den neuen Energieniveaus in der Bandlücke erklären. Wenn alle Energieniveaus unter dem Leitungsband besetzt sind, auch die Neuen, zeigt der Halbleiter wieder ein normales Verhalten, auch wenn er andere Werte liefert. Die Sättigung ist jedoch nicht unbegrenzt. Wird die Dosis zu hoch, können die Schäden die Sättigung verlassen und weiter ansteigen, wodurch das Bauteil funktionsuntüchtig wird.

Der Verlauf kann auch von der Sättigung abweichen, wenn es mehrere Effekte gibt, die miteinander konkurrieren. Ein Beispiel wäre die Schäden durch Strah-

lung und das Ausheilen. Da die Effekte genau das Gegenteil bewirken, kann es Abweichungen von der Sättigung geben.

2.5 Ausheilungsprozesse

Um den Schäden von Strahlung entgegen zu wirken, muss man versuchen, die Halbleiter wieder in ihre ursprüngliche Form zu bringen. Auch in der deutschen Literatur hat sich hier für der Begriff Annealing eingebürgert. Es bedeutet soviel wie Ausglühen oder Ausheilen. Die geschädigten Halbleiter werden in einem Ofen erwärmt wodurch die Selbstheilung einsetzt, welche durch die Diffusion verursacht wird. Bei der Ausheilung unterscheidet man zwischen beneficial annealing, reverse annealing und nicht ausheilbaren Fehlstellen. Letztere heilen wie ihr Name schon sagt nicht aus und sind somit bleibende Schäden. Beim Ausheilen sollen freie Gitteratome mit den Fehlstellen im Gitter rekombinieren und sich so das Gitter reparieren. Geschieht dies, so spricht man von beneficial annealing, da dies der gewünschte Effekt ist. Allerdings können auch die freien Gitteratome untereinander Bindungen eingehen, wodurch das Gitter weiter geschädigt wird und sich neue Akzeptoren bilden. Dieses reverse annealing muss man versuchen zu unterbinden. Dabei macht man sich zu nutze, dass die verschiedenen Heilungsprozesse unterschiedliche Zeitabhängigkeiten aufweisen. Aus allen drei Effekten setzt sich die Gesamtheilung zusammen. Zuerst setzt das beneficial annealing ein. Die Dotierungskonzentration bewegt sich in Richtung der Ursprünglichen. Zeitlich versetzt kommt das reverse annealing dazu. Die Änderung der Dotierungskonzentration nimmt wieder zu. Ab einer gewissen Zeit dominiert dieser Effekt und die Heilung verursacht mehr Schäden. Veranschaulicht ist dies in Abbildung (2.5.1). Man erkennt die zuerst einsetzende Heilung und dann den Umschwung. Durch das Heilen verbessert sich auch der Dunkelstrom. Die Energieniveaus in der Bandlücke gehen wieder zurück, wodurch für die thermische Anregung in das Leitungsband wieder mehr Energie benötigt wird. Der Dunkelstrom sinkt.

Ein weiterer Punkt auf den man beim Ausheilen achten muss, ist die Temperatur, mit der die Behandlung durchgeführt wird. Schon bei Raumtemperatur können Ausheilprozesse einsetzen. Bei höheren Temperaturen ist die Ausheilung effektiver, da es sich um Diffusionsprozesse handelt, die bei höherer Bewegung im Gitter besser funktioniert. Die Bauteile vertragen hohe Temperaturen jedoch nicht, wodurch die Heilprozesse beschränkt werden, da sonst das Bauteil irreparabel beschädigt wird. Um ein optimales Ausheilen zu ermöglichen, muss man alle Faktoren einbeziehen und versuchen das Optimum zu finden.

2 Interaktion und Auswirkungen

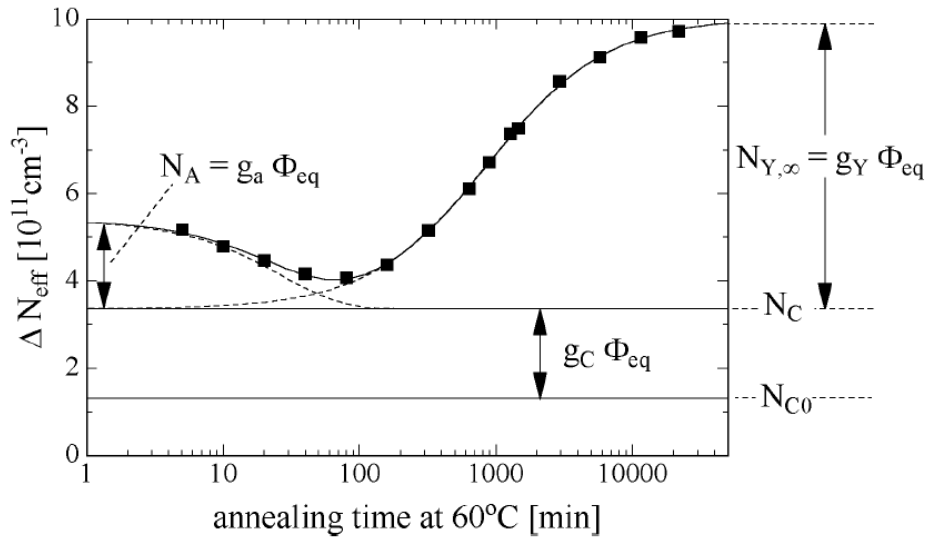


Abbildung 2.5.1: Auswirkung der Annealingzeit auf die Änderung der Dotierungskonzentration

[4]

2.6 Auswirkungen auf Schaltungen

Nachdem im vorherigen Abschnitt die Auswirkungen von Strahlung auf Halbleiter beschrieben worden, sollen nun die Auswirkungen auf Schaltungen wie einem Spannungsregler diskutiert werden. Abbildung (2.6.1) zeigt den schematischen Aufbau des Spannungsreglers LP2992 der Firma Texas Instruments. Im Inneren befinden sich hauptsächlich ein Operationsverstärker, ein Transistor

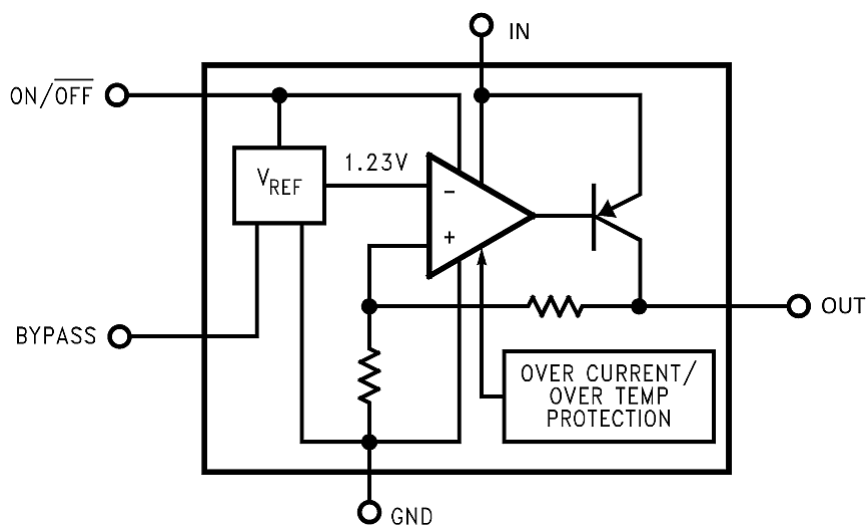


Abbildung 2.6.1: Schaltplan des LP2992

[12]

2.7 Auswirkungen von Strahlung auf das elektronische Rauschen

und ein paar Widerstände.

Halbleiterwiderstände können unter Bestrahlung ihren Widerstand ändern. Durch die Schäden in der Gitterstruktur nimmt die Ladungsträgerdichte ab, wodurch sich der Widerstand vergrößert. Dies kann dafür sorgen, dass andere Bauteile durch die geringere Spannung nicht mehr richtig funktionieren.

Auch Transistoren können nachfolgende Bauteile in ihrer Funktion beeinträchtigen, denn der Stromverstärkungsfaktor leidet auch unter den Strahlungsschäden. In der Basis rekombinieren die Ladungen durch die neuen Energieniveaus schneller, wodurch der Basisstrom größer wird. Weitere Effekte, wie die Verringerung der Majoritätsladungsträgerdichte, sorgen für einen weiteren Abfall der Verstärkung. Im Schaltplan erkennt man sofort, dass ein sinkender Stromverstärkungsfaktor den Output des Spannungsreglers verkleinert. Auch die Frequenzabhängigkeit der Transistoren kann sich bei Bestrahlung verändern. Sperrschichtkapazitäten können größer werden und dadurch ein stärkeres Rauschen verursachen. Auf das Rauschverhalten wird später in dem Kapitel genauer eingegangen.

In der kompletten Schaltung addieren sich alle Effekte der Bauteile zusammen, was es unmöglich macht, die Auswirkung vorherzusagen. In einer Schaltung tauchen weitere Effekte auf, die in die Kategorie Strahlenschäden fallen. Da die Schaltung in ein vorgefertigtes Gehäuse passen muss, sind die verschiedenen Bauteile mit wenig Abstand dicht nebeneinander. Dies ermöglicht Sperrströmen zwischen den Bauteilen zu fließen und weitere Störungen zu verursachen. Auch können Bauteile durch Schäden in vorherigen Teilen gehemmt oder auch zerstört werden, wenn sich die Eingangsspannung verändert. Fatal kann dies für einen Operationsverstärker sein, da dieser Signale miteinander vergleicht. So kann es sein, dass der Operationsverstärker falsche Signale verarbeitet. Zusammenfassend kann man feststellen, dass größere Schaltungen anfälliger für Strahlungsschäden sind, da sich die Fehler der Bauteile fortpflanzen und durch den Aufbau neue Effekte entstehen können.

2.7 Auswirkungen von Strahlung auf das elektronische Rauschen

Im vorherigen Abschnitt wurde in Zusammenhang mit Schäden in Schaltungen das Rauschverhalten angesprochen. Die verschiedenen Rauschtypen, auf welche im Folgenden eingegangen werden soll, sind:

- $\frac{1}{f}$ -Rauschen
- Rauschen durch Widerstände
- Shot Noise
- Rauschen durch Gittereffekte

Der frequenzabhängige Teil des Rauschens, der zu höheren Frequenzen abnimmt, nennt man das $\frac{1}{f}$ -Rauschen oder auch rosa Rauschen. Es tritt bei Halbleiterbauteilen auf und lässt sich unter anderem durch Fluktuationen der Elektronen

2 Interaktion und Auswirkungen

im Leitungsband erklären. Durch Oberflächenströme in den Halbleiterbauteilen entstehen Rauschsignale mit der charakteristischen Frequenzabhängigkeit. Durch höhere Dunkelströme können die einzelnen Bestandteile ihr Rauschen vergrößern. Das durch thermische Bewegung entstehende Rauschen wird durch die neuen Energieniveaus der Bandlücke begünstigt. Abschwächen kann man das thermische Rauschen wieder durch kühlen.

Das Schrotrauschen tritt an Bauteilen mit Potentialschwellen auf. Die Energie der Elektronen ist statistisch verteilt. Es kann zu Schwankungen in der Flussdichte kommen. Ein Beispiel für eine Potentialschwelle ist ein PN-Übergang. Kommt es nun zu Veränderungen der Sperrschicht in einem solchen Übergang, hat dies Auswirkungen auf das Schrotrauschen. Wird die Gitterstruktur der Halbleiter beschädigt, so treten ebenfalls Rauscheffekte auf, da die Flussdichte in einem inhomogenen Gitter ebenfalls ortsabhängig sein wird.

Es ist davon auszugehen, dass sich das Rauschen durch die Bestrahlung vergrößern wird. Dies wird im Verlauf der Arbeit aufgeriffen werden, um zu überprüfen, wie sich das Rauschen verhält.

2.8 Maßnahmen gegen Strahlungsschäden

Gegen Ende der theoretischen Ausführung soll noch auf Maßnahmen zur Minimierung der Schäden durch Strahlung eingegangen werden. Der erste Schritt ist die Wahl der Materialien. In Abhängigkeit von der Strahlungsart kann man zwischen kristallinen und amorphen Strukturen wählen. Um einen Halbleiter resistenter zu machen, kann man den Halbleiter mit elektrisch inaktiven Atomen dotieren. Fügt man zum Beispiel Sauerstoff in ein Siliziumgitter ein, so wird es unanfälliger gegenüber geladener Hadronen [6]. Bei Ausheilungsprozessen kann man mit der Wahl der richtigen Temperatur gewünschte Heilprozesse fördern und unerwünschte unterdrücken.

3 Versuchsspezifisch

3.1 Spannungsregler

Die Spannungsregler sollen die Ausleselektronik des EMC's vor zu hohen Spannungen schützen und auch bei Spannungsschwankungen einen konstanten Wert ausgeben. Da diese der Strahlung im Detektor ausgesetzt sind, muss das Verhalten von den Spannungsreglern bei Bestrahlung untersucht werden. Die in dieser Arbeit thematisierten Spannungsregler sind in Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Wahl der ersten Beiden war willkürlich, inbezug auf den Hersteller, da noch keine Daten für die Strahlentoleranz vorlagen. Es sollten ein 5V und ein 3,3V Regler untersucht werden. Die drei Letzten wurden aufgrund der Ergebnisse der ersten Beiden von dem Hersteller Texas Instruments gewählt. Alle Regler sind LDO Spannungsregler. LDO steht für Low-Drop-Out und besagt, dass der Voltagedrop klein ist. Da Spannungsregler als Bauteile Strom benötigen und keine externe Spannung beziehen, wird ein Teil der Eingangsspannung für die Versorgung verwendet. Dadurch ergibt sich eine Differenz zwischen der geregelten Ausgangsspannung und der Eingangsspannung bei welcher die Regelspannung erreicht wird. Dies nennt man den Voltagedrop. Des weiteren wurde darauf geachtet, dass die Regler ein niedriges Rauschen verursachen.

Alle Regler sind in einem SOT-23 Gehäuse untergebracht. Die Anzahl der Pins und die Beschaltung ist in Abbildung (3.1.1) zu sehen. Um alle Regler unter gleichen Bedingungen zu untersuchen, wurde ein Board entwickelt, welches beide Pintypen verwenden kann. Bei den Reglern von Texas Instruments gibt es die Pins EN und NR, welche beim 3 Pinregler von Microchip fehlen. EN gibt dem Benutzer die Möglichkeit den Spannungsregler mit einer äußeren Spannung ein und aus zu schalten. Benötigt man diese Funktion nicht, so kann der Pin EN mit dem IN Pin zusammenschaltet werden. Der Pin mit der Bezeichnung NR soll das Rauschen dämpfen und wird über einen kleinen Kondensator gegen Masse geschaltet.

Name	Hersteller	Regelspannung	max. Eingangsspannung	Belastung
TPS79333	Texas Instruments	3,3V	6V	200mA
MCP1703	Microchip	5V	16V	250mA
LP2992	Texas Instrument	5V	16	250mA
REG102	Texas Instrument	5V	12V	250mA
TPS73218	Texas Instrument	1,8V	5,5V	250mA

Tabelle 3.1: verschiedenen Spannungsregler

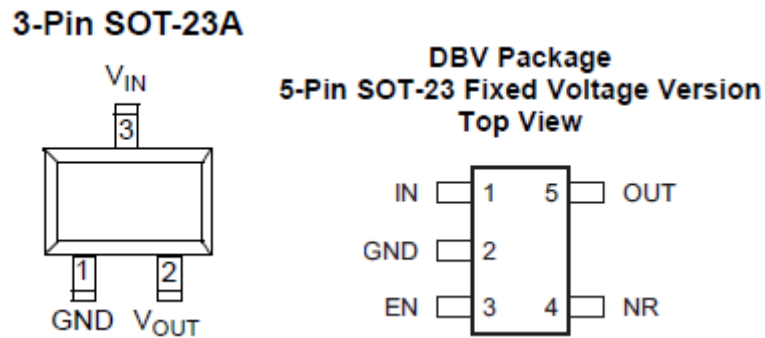


Abbildung 3.1.1: Pinbelegung links Mirochip und rechts Texas Instruments

3.2 Aufbau des Reglerboards

In den Datenblättern werden für die Spannungsregler jeweils Beschaltungspläne vorgeschlagen. Ein Beispiel für eine Verschaltung liefert Abbildung (3.2.1), welche aus dem Datenblatt des TPS79333 entnommen wurde. In Tabelle 3.2 sind die benötigten Kondensatorwerte eingetragen. Da man nicht alle passenden

Name	C_{In}	C_{Out}	C_{By}
TPS79333	$0,1\mu\text{F}$	$10\mu\text{F}$	$0,01\mu\text{F}$
MCP1703	$1\mu\text{F}$	$1\mu\text{F}$	
LP2992	$\geq 1\mu\text{F}$	$\leq 4,7\mu\text{F}$	$10\mu\text{F}$
REG102	$0,1\mu\text{F}$	optional	$0,01\mu\text{F}$
TPS73218	optional	optional	optional

Tabelle 3.2: vorgesehenen Kondensatorwerte

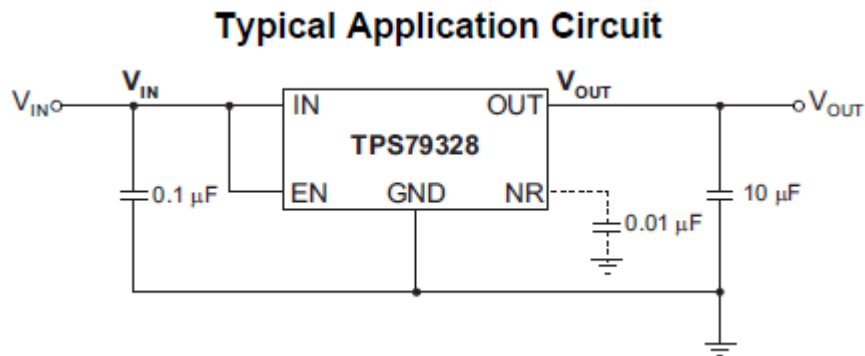


Abbildung 3.2.1: Beschaltung des TPS79333

[10]

Kondensatoren in einer Schaltung verwenden kann, wurde für die ersten Beiden das Board mit $C_{In} = 0,1\mu\text{F}$, $C_{Out} = 10\mu\text{F}$, $C_{By} = 0,01\mu\text{F}$ bestückt. Der Schaltplan ist in Abbildung (3.2.2) zu sehen. Vor und hinter dem Spannungsregler befinden sich jeweils ein 100nF Kondensator um das hochfrequente Rau-

3.2 Aufbau des Reglerboards

schen auskoppeln zu können. Am NR Pin ist ein Jumper eingebaut um das Board auf 3-Pin und 5-Pin Reglern einzustellen. Das Board wurde eigends zusammengelötet und ist unter Abbildung (3.2.2) zu sehen. Auf die zwei mal vier Pins kommt ein Aufsatz (Abbildung (3.2.3)) mit dem jeweiligen Spannungsregler. Dies ermöglicht ein schnelles Wechseln. Nachdem die Messungen der ersten Beiden Reglern beendet worden war, musste das Board mit einem 100nF Keramikcondensator an C_{In} und C_{Out} ergänzt werden. Auf die Gründe dafür wird später genauer eingegangen.

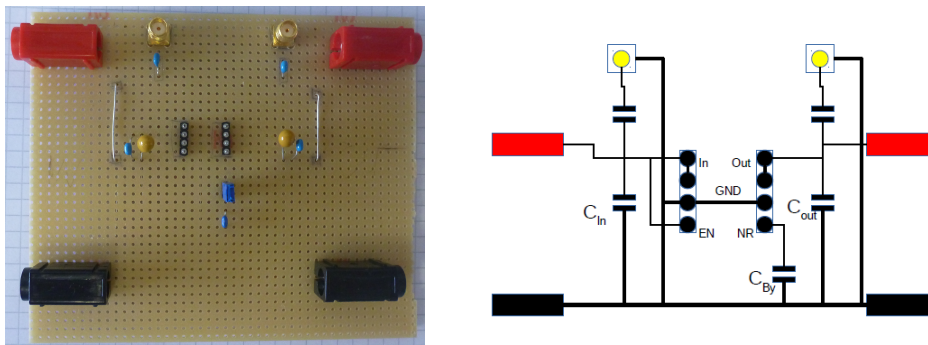


Abbildung 3.2.2: links Board und rechts der Schaltplan

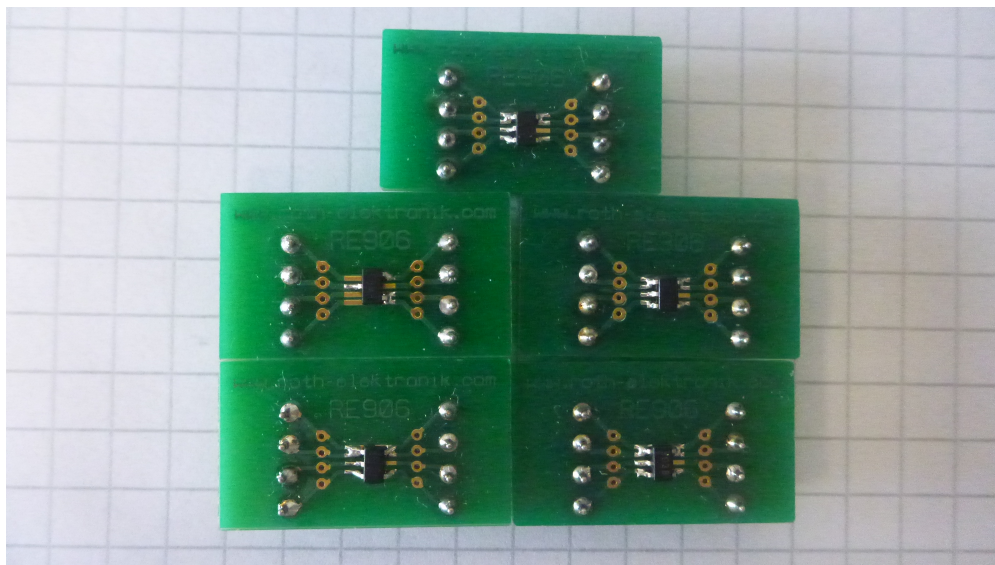


Abbildung 3.2.3: Spannungsregler mit Aufsatz

3.3 Versuchsaufbau

Für die Messung der Spannungsregler wurden folgende Instrumente verwendet

- Programmable Power Supply HM8143 als Spannungsquelle
- Last-Konstanter 32EL 150R30 zur Simulation der Last am Ausgang der Spannungsregler
- Digit Multimeter zur Bestimmung der Ausgangsspannung

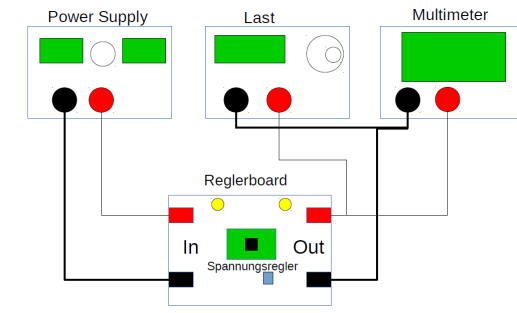


Abbildung 3.3.1: Versuchsaufbau

3.4 Quelle und Bestrahlungsplan

Die Bestrahlung der Spannungsregler wurde im Strahlencentrum an der Cobaltquelle durchgeführt. Cobalt emittiert γ -Strahlung der Energie [NACHSCHLAGEN]. Während meiner Arbeit lag die Aktivität der Quelle bei $1,22 \frac{\text{Gy}}{\text{min}}$. Der Plan für die Bestrahlung erstellen wir wie in Tabelle (3.3).

Durchgang	bestrahlte Dosis [Gy]	Ingesamte Dosis[Gy]
1	10	10
2	40	50
3	25	75
4	25	100
5	50	150
6	50	200
7	100	300
8	100	400

Tabelle 3.3: Bestrahlungsplan

3.5 Weitere Geräte

Um das Rauschen, was aus den SMA-Buchsen ausgekoppelt wird, zu analysieren wurde ein Logarithmic Detector des Typs AD8313 und ein Spectrum Analyzer verwendet, welcher von 1 MHz bis 1GHz durchgefahen wurde. Die Ausgangsspannung des Detector wurde gegen die Frequenz aufgetragen (Abbildung 3.5.2). Damit der Logarithmic Detector im linearen Verlauf bleibt wurde das Signal aus dem Spectrum Analyzer um -30 dbm gedämpft.

Es lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Frequenz sehen.

Für die letzten drei Spannungsregler musste noch ein Precision LCR Meter verwendet werden, um den ESR von Kondensatoren zu bestimmen. ESR steht für Equivalent Series Resistance und beschreibt den Reihenwiderstand des Kondensators. In der Theorie ist der ohmsche Widerstand unendlich groß. In der Praxis ist dies offensichtlich nicht der Fall. Man kann sich einen Kondensator wie in Abbildung (3.5.1) vorstellen. Der rot eingefärbte Widerstand ist der

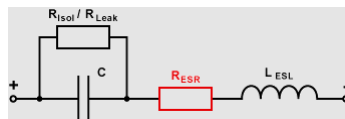


Abbildung 3.5.1: Schaltbild eines Kondensators in der Praxis

[14]

gesuchte Reihenwiderstand, der die ohmsche Komponente auf einen endlichen Wert setzt. Bei den im Board verbauten Kondensatoren wurde der ESR gemessen und dementsprechend reagiert.

Für die Ausheilprozesse wurde ein kleiner Heizofen, der auf 80° C betrieben wurde, verwendet. Die Zeit der Ausheilung im Ofen wurde für alle Heilprozesse auf 8 Stunden eingestellt um die Ergebnisse vergleichen zu können.

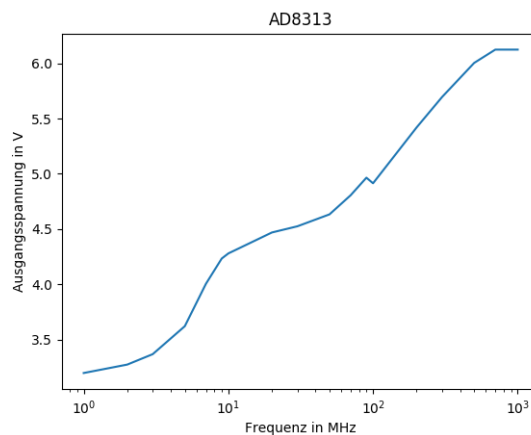


Abbildung 3.5.2: Frequenzabhängigkeit des AD8313

3.6 Versuchsdurchführung

Um am Ende alle Messergebnisse vergleichen zu können, wurde versucht immer die gleiche Messroutine beizubehalten. Damit die Spannungsregler nie kalt betrieben wurden, wurden sie ein paar Minuten laufengelassen, um die Betriebstemperatur zu erreichen. Durch die Klimaanlage im Labor konnte eine ähnliche Temperatur zwischen den Messungen erreicht werden. Begonnen wurde bei jeder Messung ohne Last. Nachdem der Spannungsbereich abgefahren wurde, wurde die Last um 50 mA erhöht und erneut gemessen. War die Ausgangsspannung nicht mehr konstant und fiel immer weiter wurde dies notiert und die Messung beendet. Aus dem Graphen konnte der Voltage Drop bestimmt werden. Dieser ist die Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung am Punkt, an welchen die Sättigung einsetzt. Da die ersten Beiden kein schwankendes Verhalten zeigten, wurden sie erst am Ende im Ofen behandelt. Bei den anderen Drei waren ab 200 Gray Ausheilungen von Nöten um sie wieder betreiben zu können.

Da die Zeit bei den Heilprozessen eine wichtige Rolle spielt, wurde versucht direkt nach der Bestrahlung die Messungen durchzuführen. Da sich die Quelle im Strahlencentrum befindet und die Messung im Physikgebäude stattfand konnten zwischen Bestrahlung und Messung anderthalb Stunden liegen.

4 Versuchsauswertung

4.1 MCP1703

Der MCP1703 der Firma Microchip ist ein 5 V-Regler, der mit bis zu 250 mA belastet werden kann. Betrachtet man den unbestrahlten Verlauf, so stellt man fest, dass bei geringer Belastung die gewünschte Ausgangsspannung erreicht wird. Mit steigender Last steigt auch die Ausgangsspannung bis maximal 5,03 V an, was völlig in Ordnung ist (Abbildung 4.2.1). Nach einer Bestrahlung von 50 Gray sind noch keine Abweichungen festzustellen. Ab einer Dosis von 75 Gray zeichnen sich die ersten Veränderungen ab. Die Ausgangsspannung fängt im Sättigungsbereich weiter an zu steigen. Die Differenzen zum Sollwert sind bei 100 Gray noch klein. Ab 150 Gray steigt die Ausgangsspannung immer weiter an. Nach 300 Gray ist von einer Sättigung nicht mehr viel zu erkennen. Am Ende der Bestrahlungen von insgesamt 400 Gray liefert der Spannungsregler ungefähr 0,5 V mehr als er es sollte, was ihn nichteinsetzbar macht. Der Voltage Drop jedoch änderte sich bei der Bestrahlung nur sehr wenig. Abgesehen von der Abweichung bei 75 Gray bleibt der maximale Drop bis zu 200 Gray konstant bei 0,5 V. Da man ab dieser Bestrahlung nicht mehr von einer Sättigung und somit einem Voltage Drop ausgehen kann, sind die Plots für 300 und 400 Gray nicht mehr so aussagekräftig. Das Ergebnis der Bestrahlung des MCP1703 war negativ. Durch das Verhalten der Ausgangsspannung macht der Spannungsregler einen Einsatz unmöglich, da er die Elektronik dahinter gefährdet. Daraufhin beschlossen wir zwei weitere 5 V Regler zu untersuchen.

4.2 TPS79333

Der TPS79333 ist ein 3,3 V Spannungsregler. Dieses Modell besitzt 5 Pins und beschaltet sich dadurch etwas anders. Im Datenblatt für die TPS793 Modelle finden sich folgende Angaben. Die TPS793 Serie sind Low-Dropout Spannungsregler mit festen Ausgangsspannungen zwischen 1,8 und 4,75V, wodurch es kein Modell mit 5 V gibt. Belastet kann der Regler mit 200 mA werden. Die maximale Eingangsspannung liegt bei 6 V. Unbestrahlt liefert der Regler Ausgangsspannungen zwischen 3,3 und 3,28 V in Abhängigkeit der Last (Abbildung 4.2.2). Anders als beim MCP1703 sinkt beim TPS79333 die Ausgangsspannung mit zunehmender Last. Betrachtet man die Messungen bis 100 Gray, so fallen optisch keine Unterschiede auf. Vergleicht man die Messung bei 100 Gray mit der Unbestrahlten, so fallen die bestrahlten Messwerte im Durchschnitt nur $-0,007603636$ V. Bei weiterer Bestrahlung fällt die Ausgangsspannung weiter. Bei 400 Gray ist die Ausgangsspannung im Durchschnitt um $0,05474$ V gefallen. Unter voller Belastung ist eine maximale Differenz von $0,0929$ V gemessen

4 Versuchsauswertung

worden. Betrachtet man den Voltage Drop so fällt auf, dass im Bereich bis 200 Gray dieser ziemlich konstant bleibt. Der Maximale Drop beträgt unter voller Last ungefähr 0,5 V. Für Lasten zwischen 50 und 150 mA schwankt der Voltage Drop von 0,2 bis 0,3 V. Dies sind Schwankungen, die sich mit den wenigen Messwerten erklären lassen. Bei weiterer Bestrahlung nimmt der Voltage Drop und bewegt sich zwischen 0,1 und 2,7 V. Die Ergebnisse sehen deutlich besser als beim MCP1703 aus. Es wurde beschlossen, den TPS79333 zu verwenden und neue 5 V Regler zu testen. Da die Strahlentoleranz für den TPS7933 besser war, wurden für die Nächsten wieder welche von Texas Instruments ausgesucht.

4.2 TPS79333

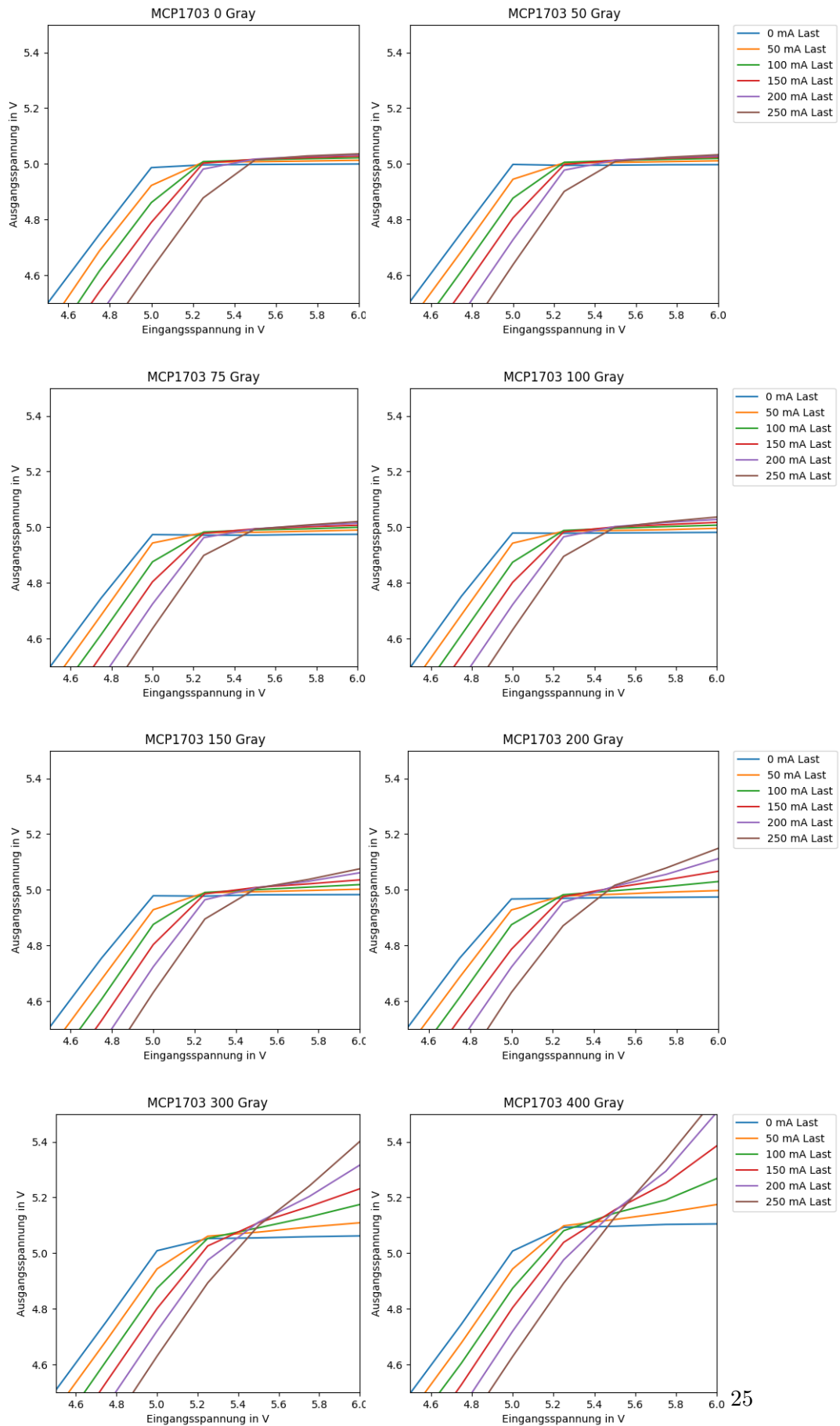


Abbildung 4.2.1: Messungen am MCP1703

4 Versuchsauswertung

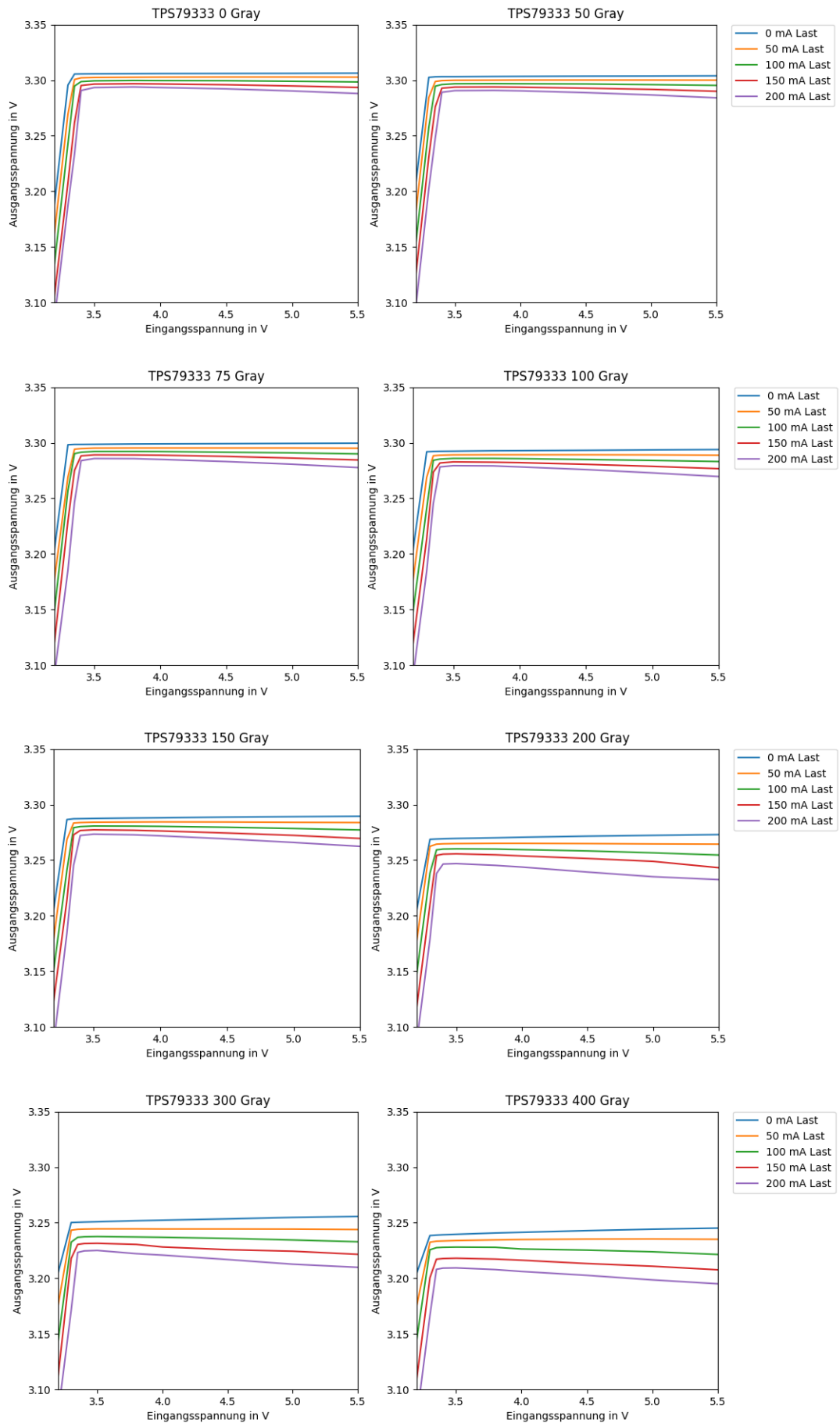


Abbildung 4.2.2: Messungen am TPS79333

4.3 Rauschverhalten

Um das Rauschenverhalten der Spannungsregler zu untersuchen, wurden an den bestrahlten Spannungsreglern (400 Gray) vor und hinter den Reglern das Rauschen gemessen. Dies wurde mit dem Logarithmic Detector gemacht, welcher an das Multimeter angeschlossen wurde. Für verschiedene Eingangsspannungen und Lasten wurde das Signal des Logarithmic Detector aufgenommen. Da das Rauschen nicht einen konstanten Wert liefert, wurde die Grenzen, inden sich das Signal bewegte, aufgenommen. Um das Rauschverhalten vor und hinter dem Regler zu vergleichen, wurde die Differenz der Mittelwerte von vor und hinter dem Regler ermittelt. Als durchschnittliche Differenz ergaben sich für den MCP1703 0,123 V und für den TPS79333 0,185 V. Der AD8313 liefert nach seinem Datenblatt $100 \frac{mV}{dB}$, was eine Änderung von 1,23 dB und 1,85 dB zur Folge hat.

Zusammenfassend kann man erkennen, dass das Rauschverhalten der Spannungsregler unabhängig von Last und Eingangsspannung ist. Dies konnte bei beiden Reglern beobachtet werden. Das Rauschenverhalten ist auch nach einer Bestrahlung von 400 Gray im Bereich des Annehmbaren.

U_{In} in V	Last in mA	U_{AD8313} (vorne) in V	U_{AD8313} (hinter) in V	Differenz in V
4	0	3,58-3,62	3,43-3,48	0,145
	100	3,63-3,65	3,48-3,5	0,15
	200	3,62-3,65	3,46-3,48	0,165
5	0	3,63-3,64	3,5-3,53	0,12
	100	3,63-3,65	3,5-3,53	0,125
	200	3,63-3,65	3,48-3,52	0,14
6	0	3,64-3,69	3,49-3,56	0,14
	100	3,6-3,62	3,55-3,59	0,04
	200	3,66-3,68	3,57-3,6	0,085

Tabelle 4.1: Messung am MCP1703

U_{In} in V	Last in mA	U_{AD8313} (vorne) in V	U_{AD8313} (hinter) in V	Differenz in V
3	0	3,67-3,69	3,52-3,56	0,14
	100	3,64-3,66	3,5-3,53	0,135
	200	3,7-3,73	3,48-3,52	0,215
3,4	0	3,69-3,72	3,47-3,5	0,22
	100	3,71-3,73	3,43-3,51	0,25
	200	3,67-3,69	3,47-3,52	0,185
4	0	3,7-3,72	3,53-3,56	0,165
	100	3,67-3,7	3,49-3,53	0,175
	200	3,69-3,72	3,51-3,54	0,18

Tabelle 4.2: Messung am TPS79333

4.4 Umbau und Aufrüsten des Reglerboards

Nachdem die Ergebnisse für den 5 V Regler ungenügend waren, wurde mit der Anschaffung von zwei neuen Reglern und einem 1,8 V Regler begonnen. Die Wahl fiel auf die Modelle LP2992, REG102 und TPS73218, da sie alle von Texas Instruments sind. Dies ermöglichte die weitere Verwendung des Reglerboards, da die Beschaltung der Pins die Selbe wie beim TPS79333. Auch die Kondensatoren wurden erstmal so verwendet, wie sie schon im Board waren. Nur der REG102 funktionierte auf dem Board. Die beiden anderen lieferten ihren Sollwert und fielen danach langsam, bis sie weit unter dem Wert lagen und anfangen um mehr als ein Volt in der Ausgangsspannung zu schwanken. Zuerst wurde vermutet, dass dies an den nicht passenden Kondensatorwerten liegen könnte. Darauf hin wurde der Schaltplan auf einem Steckbrett noch einmal mit den Werten aus dem Datenblatt zusammengebaut. Das Ergebnis blieb das Selbe. Die Ausgangsspannung fiel wieder und zeigte starke Schwankungen. Um die Schwankungen zu verringern wurden parallel zu C_{In} und C_{Out} jeweils ein 100 nF Keramikkondensator auf das Steckbrett gesteckt. Mit Einbau der Keramikkondensatoren zeigten alle drei Spannungsregler das gewünschte Ergebnis. Daraufhin wurde das Reglerboard mit den beiden Kondensatoren bestückt. Auch auf dem Board funktionierten alle Spannungsregler. Die Erklärung für das Schwanken muss der ESR der Kondensatoren sein. Mit dem Precision LCR Meter wurde der ESR von den Kondensatoren gemessen. Die Messung ist in Tabelle 4.3 dargestellt. Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand der Kondensatoren, die im Board verwendet werden, ungefähr dreimal so groß wie bei den Keramikkondensatoren. Durch das hinzufügen der Keramikkondensatoren werden die ESR kleiner und die Kapazitäten der Kondensatoren am Eingang und Ausgang verändern sich nur minimal. Dannach konnten die Messreihen wieder normal durchgeführt werden.

Frequenz in kHz	$R_{\text{Boardkondensator}}$ in Ω	R_{Keramik} in Ω	R_{parallel} in Ω
1	0,5	8,66	0,4727074236
10	0,42	0,8	0,2754098361
20	0,41	0,41	0,205
50	0,4	0,2	0,1333333333
80	0,38	0,16	0,1125925926
100	0,37	0,14	0,1015686275
150	0,35	0,14	0,1
200	0,33	0,12	0,088

Tabelle 4.3: ESR Messung

4.5 LP2992

Der LP2992 wurde neben dem REG102 als neue Spannungsregler ausgesucht. Es handelt sich beim LP2992 um einen Low-Noise Ultra-Low-Dropout Regulator. Die Ausgangsspannung ist auch hier fix auf 5 V eingestellt. Der Kondensator am Noise-Pin wurde nachdem der Regler auf dem Board erfolgreich getestet wurde nicht mehr angepasst. Sein Vorteil ist ein weites Eingangsspannungsspektrum, das bis 16 V reicht. Unbestrahlt liefert der LP2992 Ausgangsspannungen von 4,95 V bis 4,98 V. Schon bei niedriger Bestrahlung fangen die Messwerte an zu fallen. Nach 75 Gray lässt sich mit dem Auge der Unterschied deutlich erkennen. Die Spannung am Ausgang ist um ungefähr 0,03 V gesunken. Nach weiterer Bestrahlung war eine Aufnahme von Messwerten nicht mehr möglich. Der LP2992 konnte keine Spannung mehr halten und schwankte stark, unabhängig von Last und Eingangsspannung. Der Vollständigkeit halber wurde der Regler weiter mit den anderen bestrahlt. Nach 200 Gray wurde die erste Ausheilung vorgenommen. Nach acht Stunden bei 80° C wurde der LP2992 noch einmal gemessen. Es ergab sich, dass er bis 150 mA Last wieder stabile Werte lieferte. Diese lagen zwar deutlich unter den Unbestrahlen, aber er funktionierte wieder. Auf dem Steckbrett konnte eine volle Belastung erreicht werden. Verleicht man die Messungen von Board und Steckbrett, so ist zu erkennen, dass sich die Messwerte sehr ähnlich sind. Dies zeigt, dass die Ausgangsspannung unabhängig vom Rauschkondensator ist. Nach weiteren 100 Gray konnte nur noch eine Belastung bis 100 mA gemessen werden, die aber durch 8 Stunden im Ofen auf 150 mA erhöht werden konnte. Ebenso sah es nach 400 Gray aus. vor dem Heilprozess fing der Regler bei 100 mA an zu schwanken. Nachher konnte eine volle Belastung erreicht werden. Die Ausgangsspannung lag zwar 0,2 V unter dem Anfang, aber der LP2992 zeigte noch immer den gewünschten Verlauf.

Betrachtet man den Voltage Drop, so ist dieser für einen Low-Drop Spannungsregler sehr groß. Im unbestrahlten Fall liegt dieser bei bis zu 0,5 V. Der Verlauf ändert sich kaum bis zu 75 Gray. Danach kann über den Voltage Drop bis zu 200 Gray keine Aussage getroffen werden, da das Schwanken dies nicht ermöglichte. Nachdem der Spannungsregler wieder funktionierte, blieb der Drop in der Größenordnung und nahm nur etwas zu.

Zusammenfassend kann man über den LP2992 folgendes sagen. Die Ausgangsspannung nimmt ab, während der Voltage Drop zunimmt. Interessant ist aber die zunehmende Anfälligkeit gegenüber dem ESR der Kondensatoren auf dem Board. Die in der Theorie beschriebene Ausheilung lässt sich experimentell gut bestätigen. Auch wenn die anfänglichen Spannungen nicht mehr erreicht werden konnten, wurde der Regler wieder in Betrieb genommen. Ein Einsatz des LP2992 ist generell möglich. Eine genauere Aussage soll im nächsten Abschnitt getroffen werden, nachdem der zweite 5 V Spannungsregler untersucht worden ist.

4 Versuchsauswertung

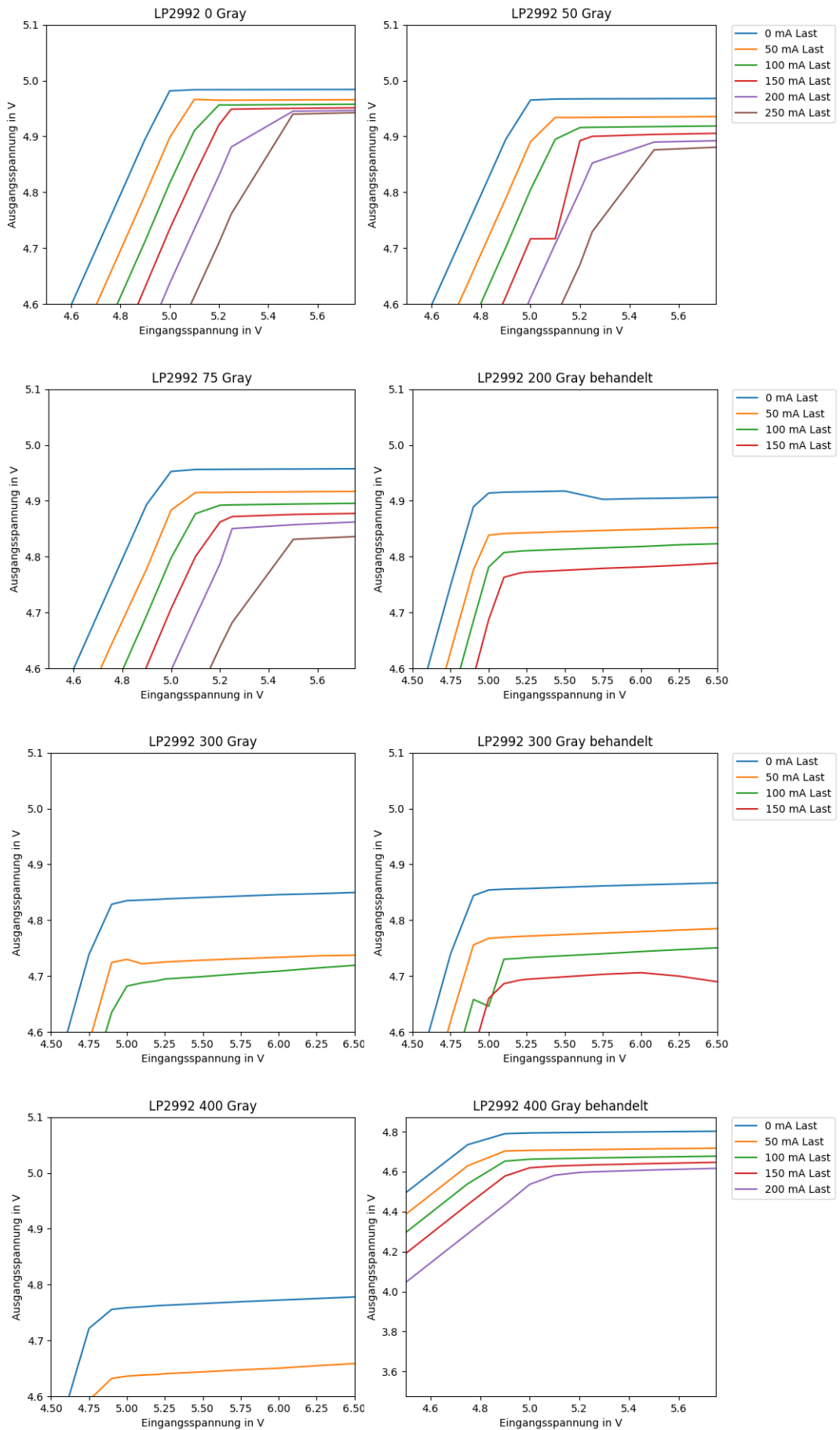
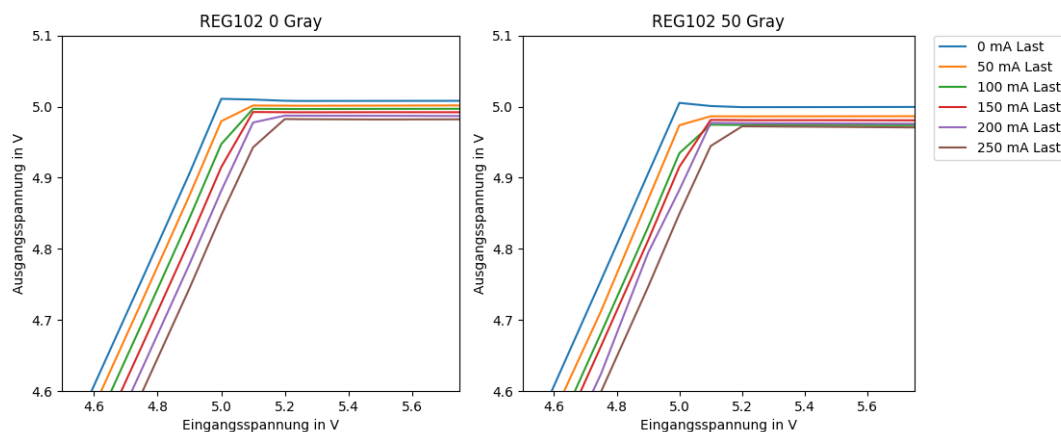


Abbildung 4.5.1: Messungen am LP2992

4.6 REG102

Der andere 5 V Spannungsregler ist ein REG102. Auch dieser ist ein Low-Drop Regulator, der mit 250 mA Last betrieben werden kann. Zur Stabilität wird am Ausgang kein Kondensator benötigt, wodurch für dieses Modell das Board nicht verändert werden musste. Unbestrahlt liefert der REG102 auch unter voller Last mit 4,98 V eine gute Spannung. Auch beim REG102 fängt die Ausgangsspannung unter Bestrahlung an zu fallen. Bei 75 Gray liefert der Spannungsregler immer noch Spannungen nahe der 5 V. Aber wie beim LP2992 können unter hohen Lasten keine stabilen Spannungen gemessen werden, wenn die Dosis auf über 100 Gray steigt. Betrachtet man den Graph für 100 Gray so ist zu sehen, dass die Spannung bei einer Last von 200 mA, deutlich gesunken ist. Für 250 mA konnten keine Messwerte mehr aufgenommen werden. Nach 150 Gray fing der Regler schon bei 200 mA und nach 200 Gray bei 150 mA an zu schwanken. Für kleine Lasten blieb die Ausgangsspannung weiter nahe der 5 V Grenze. Nachdem der REG102 ebenfalls acht Stunden im Ofen war, konnte der Regler wieder bis 250 mA belastet werden. Die Ausgangsspannung blieb für alle Lasten über 4,9 V. Bei weiterer Bestrahlung blieben alle Messwerte weiter über 4,9 V. Da alle Regler die selbe Zeit im Ofen bleiben sollten, wurde auch der REG102 nach 300 Gray wieder acht Stunden behandelt. Hier zeigte sich, dass die Ausgangsspannung niedriger wurde. Dies könnte ein Fall von reverse annealing sein. Bei 400 Gray konnte der Regler nur noch 50 mA vertragen, bevor er anfing zu schwanken, was aber durch erneutes Ausheilen korrigiert werden konnte. Der Voltage Drop lag immer unter 0,3 V, was im Vergleich zum LP2992 viel weniger ist. Vergleicht man die Graphen von unterschiedlichen Bestrahlungen ist kein charakteristischer Verlauf zu erkennen. Dennoch zeigt macht der REG102 einen besseren Eindruck als der LP2992 und überzeugt durch sein Verhalten bei hoher Bestrahlung.



4 Versuchsauswertung

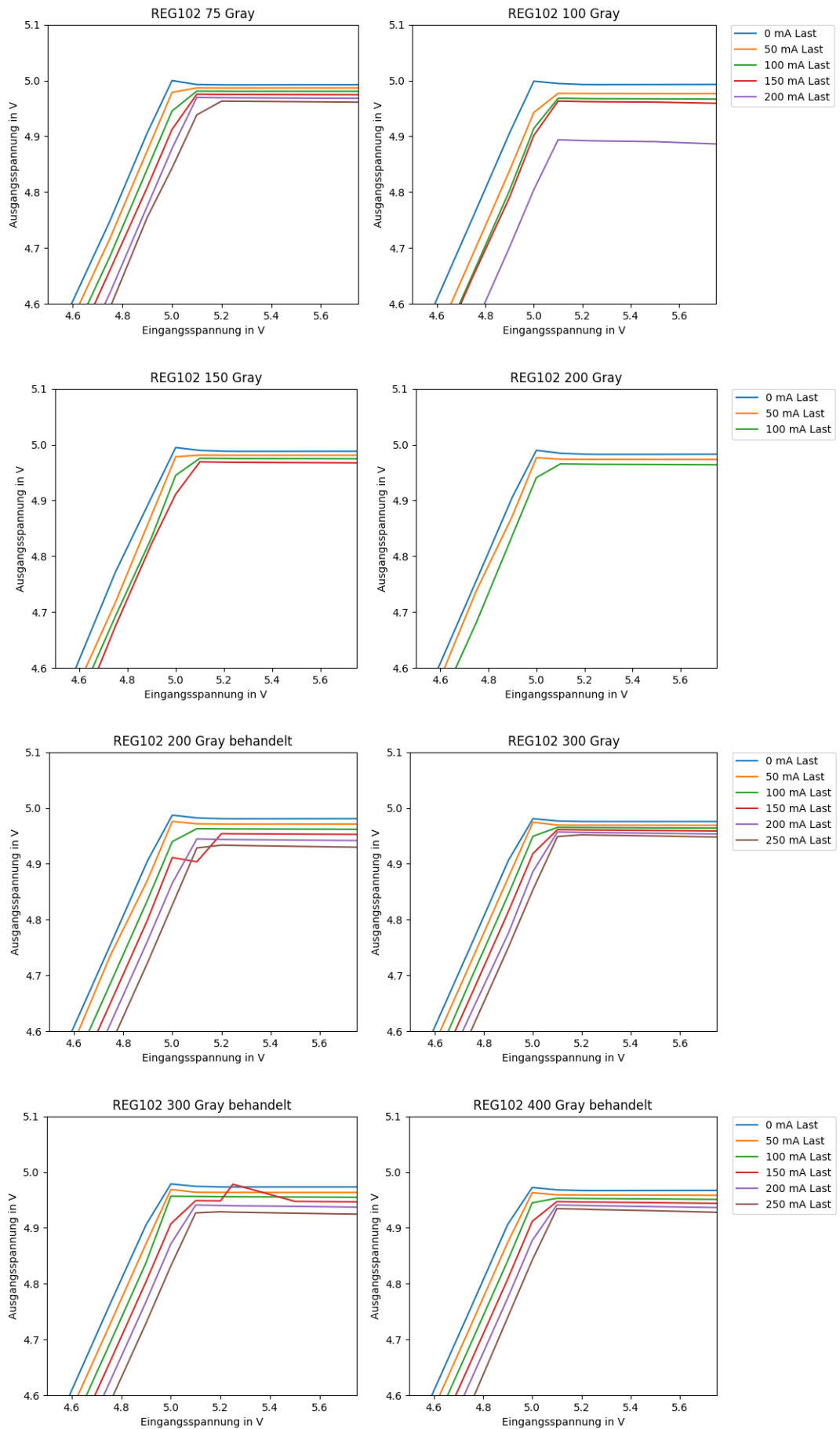
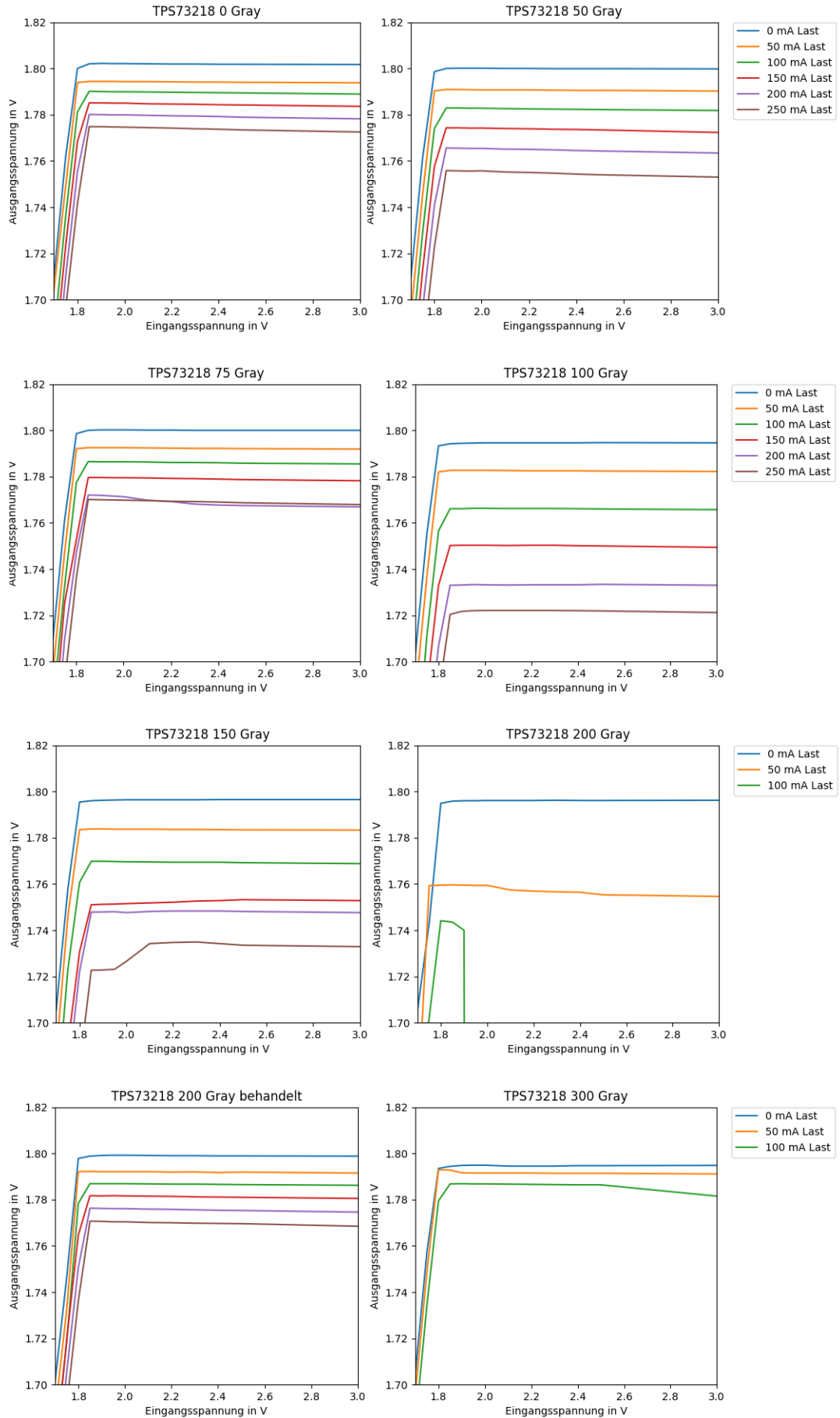


Abbildung 4.6.1: Messungen am REG102

4.7 TPS73218

Als letztes sollte noch ein 1,8 V Spannungsregler getestet werden. Die Wahl fiel auf den TPS3218 der als 250 mA Low-Drop Regulator keine Kondensatoren benötigt, aber auch mit funktioniert. Die TPS73 Serie kann Eingangsspannungen bis 5,5 V vertragen. Auch der TPS7318 hatte kleine Probleme auf dem Reglerboard gehabt, welche sich durch die Keramikkondensatoren beheben ließen. Zu Beginn der Messung lag die Ausgangsspannung für höhere Lasten um 0,2 V unter den erwarteten 1,8 V. Nach 50 Gray lag die Ausgangsspannung bei 200 mA schon 0,04 V unter dem Sollwert. Warum die Spannungen nach 75 Gray wieder etwas anstiegen, könnte an Ausheilungsprozessen liegen. Diese können auch schon bei Raumtemperatur stattfinden, wenn die Bauteile nur herumliegen. Durch weiteres Bestrahlen fielen die Spannungswerte weiter, sodass unter voller Last nur noch 1,72 V ausgegeben wurde. Nach 150 Gray stiegen die Messwerte wieder etwas an. Auch hier lässt sich das Ergebnis mit der Zeit zwischen den Messungen erklären, welche durch ein Wochenende getrennt waren. Somit hatten der TPS73218 mehr Zeit zum ausheilen. Interessant ist, dass sich dies nur bei diesem Regler gezeigt hat, denn LP2992 und REG102 hatten die selbe Zeit zum regenerieren. Das Schwanken setzte ab 200 Gray ein und so wurde beschlossen, mit der Ausheilung zu beginnen, da nun alle drei Schwankten. Nach den acht Stunden im Ofen funktionierte der TPS73218 wieder und lieferte stabile Ausgangsspannungen. Nach weiteren 100 Gray lies der Regler nach und schwankte wieder ab 150 mA. Dies konnte zum Teil nach weiteren acht Stunden wieder etwas korrigiert werden, sodass er mit 200 mA belastet werden konnte. Am Ende, nach 400 Gray, lieferte funktionierte der TPS73218 wieder für alle Lasten und konnte durch erneutes Ausheilen nochmal verbessert werden. Obwohl es am Anfang nicht so gut aussah, reagierte der Regler gut auf die Regeneration und lieferte so auch noch nach 400 Gray gute Werte. Auch der Voltage Drop blieb während der Messreihen meistens unter 0,1 V. Ob die starken Schwankungen in den Graphen Ablesefehler oder der Drop so einen Verlauf besitzt kann man nicht sagen. Mehr Messwerte würden an dieser Stelle mehr Aufschluss bringen. Jedoch ist es wichtig, dass der Drop für alle Lasten klein bleibt. Das Fazit für diesen Spannungsregler ist positiv. Der TPS7318 liefert auch nach hoher Schädigung gute Ausgangsspannungen, wenn er Zeit zum heilen bekommt.

4 Versuchsauswertung



4.7 TPS73218

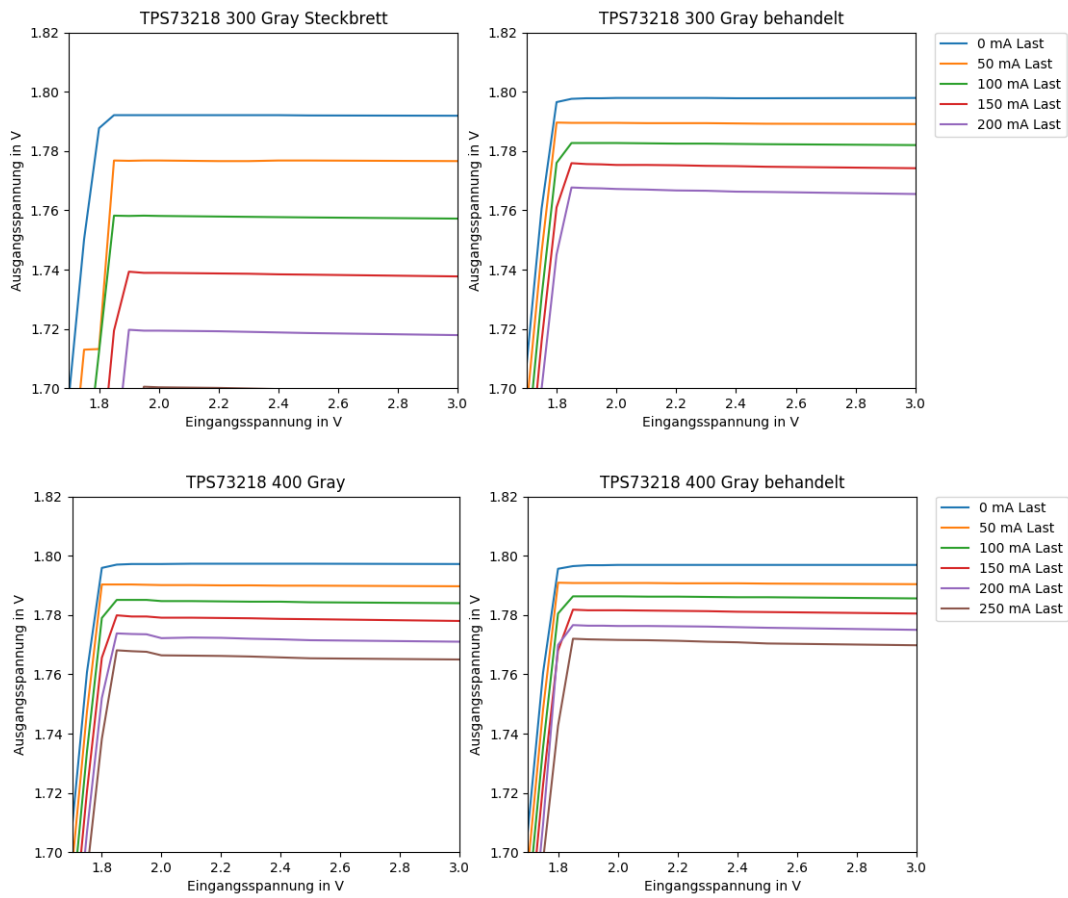


Abbildung 4.7.1: Messungen am TPS73218

4.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Nachdem alle fünf Spannungsregler untersucht wurden, sollen diese miteinander verglichen und ein Fazit über ihren Einsatz getroffen werden. Alle Spannungsregler bis auf den MCP1703 lieferten ähnliche Ergebnisse. Mit steigender Bestrahlung fällt die Ausgangsspannung. Dieser gab am Ende deutlich mehr aus, als er sollte. Da die Elektronik hinter dem Regler dadurch nicht geschützt sondern gefährdet wird, fällt dieser Spannungsregler weg. Die Regler von Texas Instrument konnten auf mit ihrer Strahlungshärte gegen Photonen ein besseres Ergebnis erzielen. Durch die Abnahme der Ausgangsspannung werden nachfolgende Bauteile nicht beschädigt. Es kann aber passieren, dass sie dann nicht mehr richtig funktionieren, wenn die Spannung zu gering ist. Des Weiteren muss auf die steigende Anfälligkeit gegenüber des ESR geachtet werden. Dies sollte in einer vernünftigen Schaltung weniger ein Problem sein. Denn schon auf einem Steckbrett konnten Schwankungen, die auf dem Board waren, verhindert werden. Es empfiehlt sich auf Kondensatoren mit niedrigem ESR zu setzen um Schwankungen entgegen zu wirken. Der Voltage Drop war nur leicht von der Bestrahlung abhängig. Meistens wurde der Wert etwas größer, blieb aber in gleicher Größenordnung.

Für den Einsatz im EMC des PANDA Experimentes werden folgende Spannungsregler auf Grund ihrer Toleranz gegen Photonen empfohlen. Für 3,3 V lieferte der TPS79333 gute Ergebnisse, wodurch keine weiteren getestet werden mussten. Ebenso sieht es mit dem TPS73218 aus. Auch hier waren die Ergebnisse positiv. Unter den 5 V Reglern muss man sich zwischen dem REG102 und dem LP2992 entscheiden. Beide würden sich eignen, jedoch liefert der REG102 etwas höhere Spannungen und ist stabiler, was für seinen Einsatz spricht.

5 Ausblick und Verbesserungen

Am Ende dieser Arbeit möchte ich noch einen Ausblick geben, wie es in Zukunft weitergehen kann. Ein wichtiger Aspekt wäre die Strahlentoleranz anderer Strahlungsarten gegenüber. Darunter würden Protonen, schwerere Hadronen und Neutronen fallen. Letztere wären besonders interessant, da Neutronen besonders hohe Schäden verursachen können und die Auswirkungen auf Elektronik noch nicht untersucht worden ist. Um die Messungen genauer zu machen, wäre es von Vorteil mehr als einen Spannungsregler von einer Serie zu verwenden. Dadurch könnte man einzelne Schwankungen aussortieren. Leider konnte während der Bestrahlung keine Messung durchgeführt werden. Da später im Detektor die Spannungsregler unter Bestrahlung arbeiten sollen. Ob und wie dies zu machen ist, müsste man sich noch genauer überlegen. Auch die Temperaturabhängigkeit müsste noch untersucht werden. Es wurde versucht immer bei der gleichen Temperatur zu messen, aber eine Messung im Temperaturschrank, der im Labor steht wäre eine Aufgabe der man sich noch widmen müsste. Was die Messung deutlich effektiver machen würde, wäre eine Computersteuerung. Die Messungen würden schneller gehen und es könnten dadurch mehr verschiedene Lasten gemessen werden. Auch das Board sollte man bei weiteren Versuchen verbessern. Statt einer Lochrasterplatine wäre eine kleine Platine in einem Gehäuse, die die Schaltung vor Umwelteinflüssen schützt. Dies wären ein paar Ideen um die Arbeit voran zu bringen. Bei längeren Überlegungen würden einem noch viele Möglichkeiten einfallen. All das ist noch Zukunftsmusik und soll nicht mehr im Rahmen dieser Bachelorarbeit liegen.

Literaturverzeichnis

- [1] <https://panda.gsi.de/oldwww/>
- [2] PD Dr. Jens Sören Lange , Anleitung zum Fortgeschrittenen Praktikum Comptoneffekt
- [3] Detlef Brumbi, Bauelemente-Degradation durch radioaktive Strahlung und deren Konsequenzen für den Entwurf strahlenresistenter elektronischer Schaltungen, Bochum 1990
- [4] Sabine Frech, Einfluss von Strahlenschäden auf Siliziumstreifensensoren aus unterschiedlichen Grundmaterialien, KIT 2012
- [5] Wencke Hansen, Strahlenschäden und Strahlenhärte von Halbleiterdetektoren, Aachen Wintersemester 06/07
- [6] Univ.Doiz.DI.Dr. Manfred Krammer, <https://web-docs.gsi.de/%7Ewolle/Schuelerlabor/TALKS/DETEKTOREN/VO-4-Halbleiterdetektoren.pdf>
- [7] Kurt E. Sickafus Eugene A. Kotomin Blas P. Uberuaga, Radiation Effects in Solids
- [8] Helmut Spieler, Semiconductor detector systems
- [9] Microchip, Datenblatt MCP1703
- [10] Texas Instruments, Datenblatt TPS793
- [11] Texas Instruments, Datenblatt TPS732
- [12] Texas Instruments, Datenblatt LP2992
- [13] Burr-Brown Products from Texas Instruments, Datenblatt REG102
- [14] <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/bau/0810091.htm>