

Untersuchung der Effekte von Infrarotstrahlung auf die Energieauflösung eines Timepix Detektors mit CdTe Sensor

Zulassungsarbeit aus der Physik

Vorgelegt von
Markus Pfaffinger
23. März 2015

Erlangen Centre for Astroparticle Physics
Physikalisches Institut IV
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Betreuerin: Prof.Dr.G.Anton

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theorie	3
2.1	Der Timepix Detektor	3
2.1.1	Der ToT Modus	4
2.2	Das Sensormaterial CdTe	6
2.2.1	Wirkung von Infrarotstrahlung auf CdTe	6
3	Experiment	9
3.1	Messaufbau	9
3.1.1	Regelung der Temperatur	9
3.1.2	Regulation der Luftfeuchtigkeit	10
3.1.3	Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit	11
3.1.4	Verwendete LED's	12
3.1.5	Positionierung der LED's und der Strahlungsquelle	13
3.1.6	Kalibrierung des verwendeten Detektors	15
3.2	Versuchsdurchführung	21
4	Auswertung	23
4.1	Methode	23
4.2	Ergebnisse	24
4.2.1	Einfluss der Luftfeuchtigkeit	24
4.2.2	Einfluss der Temperatur	25
4.2.3	Vergleich der Wirkung verschiedener Bias Spannungen bei gleicher Wellenlänge	25
4.2.4	Vergleich der LED's bei gleicher Bias Spannung	29
5	Zusammenfassung	41
	Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung des Charge Sharing [2]	5
2.2	Timepix Detektor mit USB Readout [1]	5
2.3	Absorptionseffizienz von Röntgen-Photonen für CdTe und Si [2] . .	7
3.1	Gesamter Versuchsaufbau	10
3.2	Aufbau der Wärmeleitung	11
3.3	Aufbau mit Silica Gel	12
3.4	Bestimmung der Wellenlänge der 830 nm LED	17
3.5	Bestimmung der Wellenlänge der 850 nm LED	17
3.6	Position der Strahlungsquelle	18
3.7	Befestigung der LED's	18
3.8	Abstand der LED's	19
3.9	Messung der LED Intensitäten	19
3.10	THL Equalization Werte	20
3.11	Maske des Chips	20
4.1	Beispiel für eine Luftfeuchtemessung	31
4.2	Luftfeuchtemessung im Bereich von 10 Stunden	31
4.3	Beispiel für eine Temperaturmessung	32
4.4	Temperaturmessung im Bereich von 10 Stunden	32
4.5	Messung bei 400 V Bias Spannung ohne LED	33
4.6	Energieauflösung der 830 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	34
4.7	Aktive Pixel der 830 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	34
4.8	Energieauflösung der 850 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	35
4.9	Aktive Pixel der 850 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	35
4.10	Energieauflösung der 880 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	36
4.11	Aktive Pixel der 880 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	36
4.12	Energieauflösung der 950 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	37
4.13	Aktive Pixel der 950 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen	37
4.14	Energieauflösung aller LED's bei 300 V Bias Spannung	38

4.15	Aktive Pixel aller LED's bei 300 V Bias Spannung	38
4.16	Energieauflösung aller LED's bei 400 V Bias Spannung	39
4.17	Aktive Pixel aller LED's bei 400 V Bias Spannung	39
4.18	Energieauflösung aller LED's bei 500 V Bias Spannung	40
4.19	Aktive Pixel aller LED's bei 500 V Bias Spannung	40

Tabellenverzeichnis

3.1	Übersicht über Temperatur- und Luftfeuchtheitswerte während der Messungen	12
3.2	Wichtigste Werte der verwendeten LED's	13
3.3	Intensitäten für die 830 nm LED	14
3.4	Intensitäten für die 850 nm LED	14
3.5	Intensitäten für die 880 nm LED	14
3.6	Intensitäten für die 950 nm LED	14
3.7	Einstellungen für das E03-W0083 Board	16
4.1	Daten für alle Messungen	25
4.2	Übersicht der Auflösungen ohne LED	28
4.3	Übersicht der besten Auflösungen für 830 nm	28
4.4	Übersicht der besten Auflösungen für 850 nm	28
4.5	Übersicht der besten Auflösungen für 880 nm	28

1 Einleitung

In der Arbeit von Drogov [3] wurde ein positiver Einfluss von Infrarotstrahlung auf die Energieauflösung von CdZnTe festgestellt. Drogov verwendete verschiedene Detektorgrößen von $3 \cdot 3 \cdot 1.5 \text{ mm}^3$ bis $10 \cdot 10 \cdot 5 \text{ mm}^3$. Diese Detektoren bestanden aus einem einzigen Pixel.

Der in dieser Arbeit untersuchte Timepix Detektor kann unter anderem mit CdTe Sensoren bestückt werden. Jedoch ist der Sensor nur 1 mm dick und auf ein pixeliertes ASIC gebonded. Es stellt sich also die Frage, wie ein dünner pixelierter CdTe Sensor mit bump bonds auf Strahlung im Infrarotbereich reagiert. Wenn die Effekte ebenfalls bei dem gebondeten CdTe auftreten, ist es ferner interessant, wie groß der Einfluss verschiedener Wellenlängen und Intensitäten auf den Sensor ist. Die folgende Arbeit befasst sich mit einer Vermessung des Effektes von Infrarotstrahlung auf den CdTe Sensor eines Timepix Detektors, wobei versucht wurde sämtliche äußeren Einflüsse zu minimieren. So wurde von Drogov [3] festgestellt, dass die Energieauflösung von der Temperatur des Sensors abhängig ist. Außerdem ist durch die Diplomarbeit von Anastasia Bakst [4] bekannt, dass der Detektor auf große Schwankungen der Luftfeuchtigkeit ebenfalls sensibel reagiert. Diese Arbeit legt ihren Schwerpunkt in eine genaue Vermessung der Effekte verschiedener LED's bei verschiedenen Intensitäten, wobei die Randeffekte durch Temperatur und Luftfeuchtigkeit minimiert wurden.

2 Theorie

Im Folgenden wird auf die verwendete Software und die Einstellungen des Timepix im ToT Modus und auf dessen Eigenschaften eingegangen. Außerdem wird kurz auf das verwendete Detektormaterial (CdTe) eingegangen.

2.1 Der Timepix Detektor

Der Timepix ist eine Weiterentwicklung des Medipix2 Detektors, der von der Medipix-Kollaboration entwickelt wurde [5].

Der Detektor (siehe Abbildung 2.2) besteht aus einem pixelierten ASIC mit 65536 Pixeln. Jeder dieser Pixel besitzt eine eigene Pixelelektronik. Die Pixel haben eine Größe von $55\mu\text{m}$ und sind in einer Matrix mit je 256 Pixeln Länge und Breite angeordnet. Die effektive Fläche beträgt also $1,4 \cdot 1,4\text{ cm}^2$. Sie werden mit sogenannten „bump bonds“ mit dem Sensor verbunden. Als Sensormaterial können verschiedene Halbleiter verwendet werden. Am häufigsten finden sich hierbei Si und CdTe, die auf das ASIC gebonded werden.

Der benutzte Sensor besteht aus CdTe und ist nur mit jedem 2. Pixel gebonded. Deshalb beträgt die effektive Pixelgröße $110\mu\text{m}$ [6].

Bewegen sich ionisierende Teilchen durch den Sensor (zum Beispiel Elektronen, Photonen oder Myonen), so wechselwirken diese mit dem Sensormaterial und bilden Elektron-Loch-Paare. Die von außen angelegte Bias Spannung erzeugt ein elektrisches Feld im Sensor und sorgt für einen Drift der erzeugten Ladungsträger zu den Elektroden. Bei diesem Drift kann es zum sogenannten charge sharing kommen. Beim charge sharing wird das Signal auf mehrere Pixel verteilt, da die Ladungsträger sich beim Drift zerstreuen. In Abbildung 2.1 ist eine schematische Darstellung dieses Effektes zu sehen.

Beim Drift werden an den Pixelelektroden Ladungen influenziert. Der entstehende influenzierte Strom wird von der Pixelelektronik integriert und zu Spannungspulsen umgeformt. Der Zeitraum, über den integriert wird, ist dabei so gewählt, dass ein Elektron durch den gesamten Sensor driften kann. Während dieser Zeit kann nicht

zwischen zwei unterschiedlichen Teilchen unterschieden werden, da die gesamte influenzierte Ladung des Zeitintervalls integriert wird.

Der Timepix kann in verschiedenen Modi betrieben werden. Für die Messungen im Rahmen dieser Arbeit spielt der ToT Modus eine besondere Rolle. Dieser ist im Kapitel 2.1.1 genauer erläutert. Ferner kann man den Detektor auch nur die Anzahl der Treffer in einer bestimmten Zeit zählen lassen, was aber in dieser Arbeit keine Verwendung findet. Außerdem kann der Timepix noch in einem „time of arrival“ (ToA) Modus betrieben werden, der die zeitliche Lage des Ereignisses relativ zum Ende des Frames misst.

2.1.1 Der ToT Modus

Der Timepix ermöglicht eine Messung der in jedem Pixel deponierten Energie mit Hilfe des „time-over-treshold“ (ToT) Modus. Das von den driftenden Ladungsträgern induzierte Signal in den Pixelelektroden wird integriert und in ein Spannungssignal umgewandelt. Es wird ein spezifisches Triggerlevel (THL) gewählt. Wenn das Signal über den THL Wert ansteigt, beginnt der Pixel die Zeit zu messen, bis das Signal wieder unter diesem Wert ist. Die Anzahl der Clockschläge, die hiermit ermittelt wird (ToT), ist von der Energie abhängig. Somit können Rückschlüsse auf die Energie gezogen werden [6].

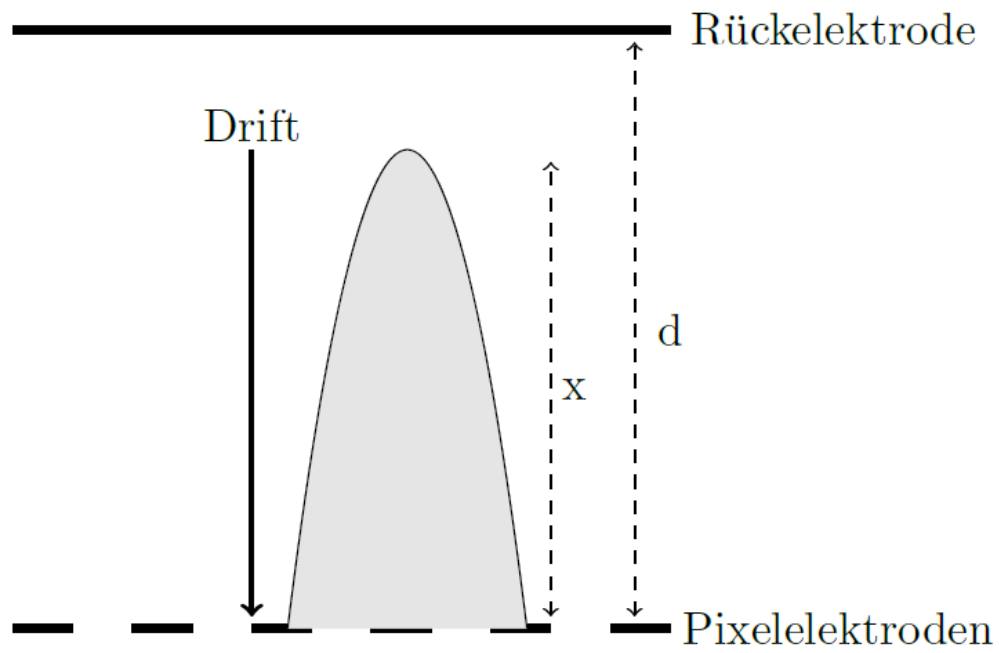


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Charge Sharing [2]



Abbildung 2.2: Timepix Detektor mit USB Readout [1]

2.2 Das Sensormaterial CdTe

Der Timepix wird vorwiegend mit zwei verschiedenen Halbleitermaterialien besetzt. Bei CdTe gibt es die Alternative, den Detektor stattdessen mit CdZnTe (auf das die Infraroteinflüsse von Drogov [3] bereits gemessen wurden) zu besetzen. CdTe besitzt jedoch die höhere mechanische Stabilität. Der Einsatz von Zink als Zusatzmaterial hat neben den positiven Effekten, wie z.B. die Steuerbarkeit der Bandlücke des Halbleiters, den Nachteil, dass durch die Verwendung des dritten Materials der Herstellungsprozess des Kristalls erschwert wird [7].

Generell kann Silizium als Sensormaterial verwendet werden. Die Vorteile von Silizium sind hierbei nicht von der Hand zu weisen. Es besteht eine lange Erfahrung mit dem Material und man kann es gut in sehr reinen Kristallen züchten. Der große Fortschritt bei der Herstellung von Silizium ermöglicht es außerdem, den Sensor relativ günstig herzustellen.

Wie man aber in Abbildung 2.3 erkennen kann, ist die Absorption von Röntgen-Photonen bei Cadmiumtellurid wesentlich besser als bei Silizium. Diese besseren Eigenschaften von Cadmiumtellurid sind auf die hohen Kernladungszahlen Z ($Z_{Cd} = 48$ und $Z_{Te} = 52$) und die hohe Dichte von $5,85 \text{ g cm}^{-3}$ zurückzuführen. Diese Eigenschaften liefern bei realistischer Dicke des Materials höhere Absorptionswahrscheinlichkeiten von Photonen in Energiebereichen von einigen hundert keV als es bei Silizium möglich wäre.

Aufgrund der hohen Bandlücke von $1,52 \text{ eV}$ kann der Cadmiumtellurid Sensor - wie der Silizium Sensor - bei Raumtemperatur betrieben werden. Mittlerweile ist Cadmiumtellurid in ausreichend guter Qualität erhältlich, um hieraus sinnvoll Sensoren herstellen zu können. Für die Anwendung in der Röntgenbildgebung in der Medizin ist Cadmiumtellurid aufgrund seiner besseren Absorptionseigenschaften theoretisch Silizium vorzuziehen [2].

2.2.1 Wirkung von Infrarotstrahlung auf CdTe

Die Photonen im Infrarotbereich haben eine Energie knapp unterhalb der Bandlücke von CdTe. Sie werden daher im Detektor nur schwach absorbiert. Die Ladungsträger in tieferen Schichten erhalten in den beleuchteten Gebieten zusätzliche Energie und werden dadurch aus tiefen Störstellen in das Leitungsband angeregt. Diese sogenannte Photoleitung erhöht die Leitfähigkeit und somit den Leckstrom im Leiter. Die Erhöhung der Leitfähigkeit sorgt hierbei für eine Verbesserung der Ladungsträgersammlung [3].

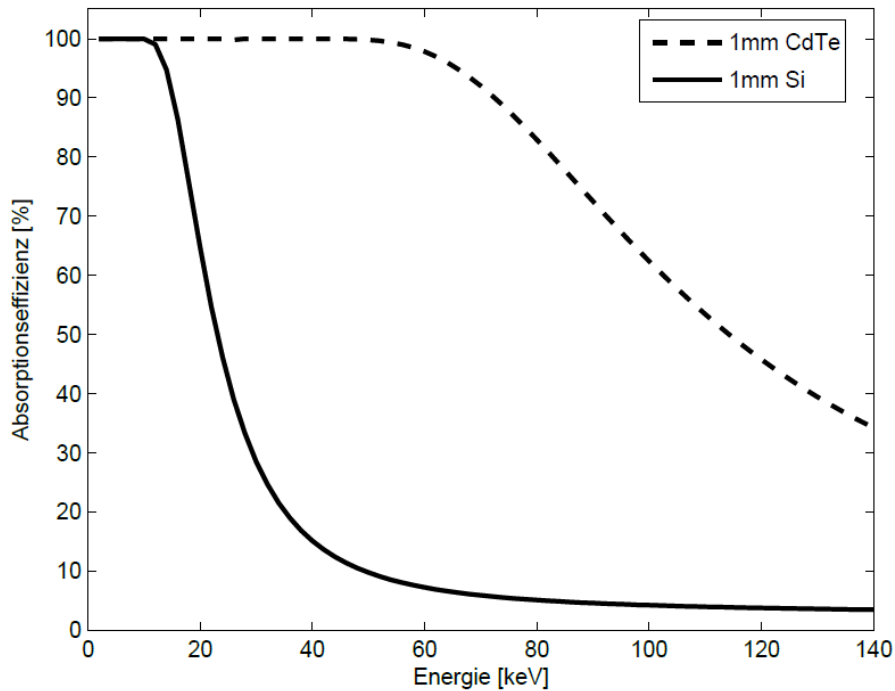


Abbildung 2.3: Absorptionseffizienz von Röntgen-Photonen für CdTe und Si [2]

Durch die Erhöhung des Leckstroms kommt es jedoch zu einem vermehrten Rauschen der Pixel, weswegen ein Mittelweg zwischen hoher Leitfähigkeit und noch akzeptablem Leckstrom gefunden werden muss. Der Ausgangspunkt für die in Kapitel 3.2 durchgeführten Experimente, bilden sowohl die Diplomarbeit von Anastasia Bakst [4] als auch die Arbeit von Dorogov et al. [3]. In der Arbeit von Dorogov wurden CdZnTe-Sensoren mit infrarotem Licht bestrahlt. Hierbei wurde eine Verbesserung der Energieauflösung festgestellt.

Die Bestrahlung bewirkte eine Veränderung des Gleichgewichtes zwischen der Sammlung von Haftstellen und der Ladungsträgerkonzentration. Als Resultat wurde die Ladungssammlungseffizienz verbessert. Nach Dorogov soll die Bestrahlung die Detrapping Zeit verkürzen und die Lebensdauer der Träger erhöhen. Somit zeigt sich eine Verbesserung der Energieauflösung.

3 Experiment

3.1 Messaufbau

Wie in den Arbeiten von Anastasia Bakst [4] und von Drogov [3] festgestellt wurde, haben Temperaturschwankungen eine nicht zu vernachlässigende Auswirkung auf das Verhalten des Cadmiumtellurid Detektors. Diese störenden Einflüsse bei der Vermessung der Wirkung von Infrarotstrahlung auf den Detektor sollten so weit wie möglich vermindert werden.

Hierfür wurde der Detektor zur Kühlung auf einen Kupferblock aufgebracht. Eine genau Beschreibung der Kühlung findet sich in Kapitel 3.1.1. Die gesamte Anordnung wurde in einer geschlossenen Styroporbox in einen Kühltank gestellt, um die periodische Kühlung des Kühltanks auszugleichen beziehungsweise zu dämmen. Die Zugänge für Kabel und Messinstrumente durch die Styroporwand wurden deshalb so klein wie möglich gehalten. Für die Messung der Temperatur wurden RedLab von Meilhaus Electronic und CASSY 2 verwendet, wobei CASSY 2 ebenfalls die Luftfeuchtigkeit in der Box messen kann.

Außerdem sollte die Luftfeuchtigkeit reguliert werden, um deren Einfluss auf die Genauigkeit des Detektors zu ermitteln. Hierfür wurde Silica Gel in die Styroporbox gegeben. Die Box entkoppelt die Luftfeuchtigkeit in der Nähe des Chips von der Luftfeuchtigkeit im Kühltank. Während aller Messungen schwankte die Luftfeuchtigkeit im Rahmen von 13% bis 17%.

Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 3.1 zu sehen.

3.1.1 Regelung der Temperatur

Für die Regulation der Temperatur wurde die Platine auf einen Aluminiumhalter geschraubt. Um eine bessere Wärmeleitung zu gewährleisten, wurde zwischen der Platine und dem Aluminium eine isolierende Wärmeleitfolie [8] befestigt. Zwischen Aluminium und Kupferblock, der als Kühlkörper dient, wurde eine Graphit Folie geklemmt, die den Kontakt der beiden Materialien verbessern sollte, ein Foto des Aufbaus ist in Abbildung 3.2 zu sehen.

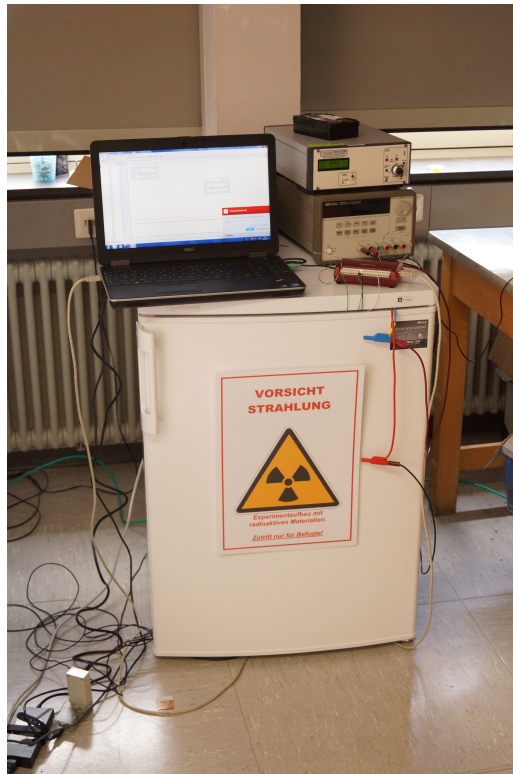


Abbildung 3.1: *Gesamter Versuchsaufbau*

Der gesamte Aufbau wurde zuerst in eine Styroporbox und diese dann in einen Kühlschrank gestellt. Hierdurch wurde erreicht, dass die Temperatur bei den einzelnen Messungen immer nur um ca. $0,5^{\circ}\text{C}$ schwankt.

3.1.2 Regulation der Luftfeuchtigkeit

Um die Luftfeuchtigkeit während der Messungen konstant zu halten, wurde in den Kühlschrank und in die Styroporbox blaues Silica Gel [9] gegeben, welches es ermöglichte, die Luftfeuchtigkeit während der Messungen einigermaßen konstant zu halten. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit wurde später im Experiment ebenfalls überprüft und erwies sich als relativ gering (siehe Kapitel 4.2.1). Er wäre durch statistische Schwankungen erklärbar. Die Menge an verwendetem Silica Gel betrug in etwa 5 kg. Der Aufbau mit Silica Gel in der Styroporbox ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

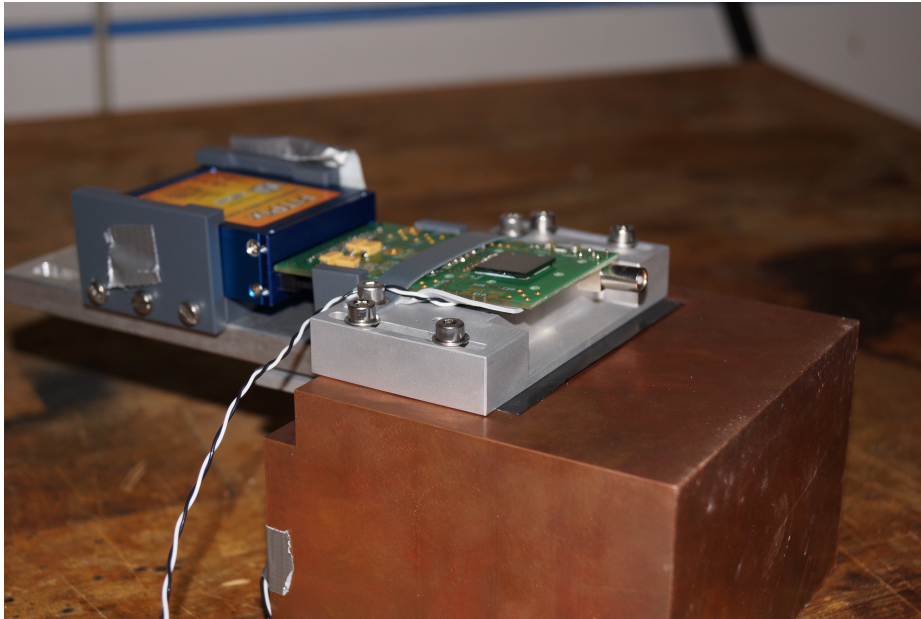


Abbildung 3.2: *Aufbau der Wärmeleitung*

3.1.3 Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Für die Messung der Temperatur wurden verschiedene Systeme verwendet. Die Lufttemperatur in der Styroporbox wurde mit CASSY 2 [10] gemessen. Dieses System wurde ebenfalls verwendet, um die Luftfeuchtigkeit in der Box zu messen. Außerdem wurde die Temperatur an der Rückseite des Sensors mit Hilfe eines Thermowiderstandes und mit Hilfe der Messstation RedLab von Meilhaus Electronic [11] gemessen. Ein zweiter Sensor wurde in den Kupferblock eingebracht, um dessen Temperatur ebenfalls überwachen zu können. Die Temperatur und Luftfeuchtigkeit blieb während der gesamten Messung relativ konstant. Der Einfluss der Temperatur wurde in der Diplomarbeit von Anastasia Bakst [4] bereits vermessen. Auf den Einfluss der Luftfeuchtigkeit wird in Kapitel 4.2.1 weiter eingegangen. In Tabelle 3.1 ist eine Übersicht über die gemessenen Werte von Temperatur und Luftfeuchtigkeit, die während der gesamten Messungen im Rahmen der angegebenen Werte lagen.



Abbildung 3.3: *Aufbau mit Silica Gel*

	Temperatur in °C	Luftfeuchtigkeit in %
Chip	20,8 – 22,2	
Kupferblock	14,0 – 15	
Styroporbox	9,8 – 11,2	12-18

Tabelle 3.1: *Übersicht über Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte während der Messungen*

3.1.4 Verwendete LED's

Für den Versuchsaufbau wurden die gleichen LED's wie in der Diplomarbeit von Anastasia Backst [4] verwendet. Eine Auflistung der wichtigsten technischen Details der LED's findet sich in Tabelle 3.2. Die Wellenlängen der LED's wurden zusätzlich mit einem Messgerät überprüft, die Werte finden sich ebenfalls in Tabelle 3.2. Da das Messgerät nur bis etwa 1000 nm verwendet werden kann, sind die LED's mit 880 nm und 950 nm nicht mehr wirklich messbar, da der Intensitätspeak relativ breit ist. Die anderen beiden Messungen sind in Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 dargestellt.

Bezeichnung	TSHG 8200	OPE 5685	SFH 485	TSUS 5202
λ_a^1	830 nm	850 nm	880 nm	950 nm
U_{\min}^2	1,30 V	1,25 V	1,20 V	1,00 V
U_{\max}^3	1,80 V	2,00 V	3,00 V	1,70 V
Bandbreite ⁴	40 nm	45 nm	80 nm	50 nm
λ_g^5	828,5 nm	841,0 nm	nicht messbar	nicht messbar

Tabelle 3.2: Wichtigste Werte der verwendeten LED's

¹ Angegebene Wellenlänge

² Minimale Betriebsspannung

³ Maximale Betriebsspannung

⁴ Spektrale Bandbreite

⁵ Gemessene Wellenlänge

3.1.5 Positionierung der LED's und der Strahlungsquelle

Für den Aufbau wurde eine ^{241}Am Strahlenquelle verwendet, die eine Aktivität von 420 kBq besaß. Die Strahlenquelle ist wie in Abbildung 3.6 ersichtlich ist, in eine Halterung eingebracht, die hinter dem Chip in das Kupfer geätzt wurde.

Da die LED's während einer Messreihe über verschiedene Bias Spannungen nicht verstellt werden sollten, wurden sie mit Hilfe von starkem Klebeband wie in Abbildung 3.7 ersichtlich ist, befestigt. Hierdurch wurde gewährleistet, dass die Ergebnisse bei verschiedenen Bias Spannungen vergleichbar sind. Die verwendete LED wurde mit jeweils gleichen Spannungen betrieben und besaß somit immer die gleichen Intensitäten. Da eine kleine Abweichung der Positionierung schon eine große Abweichung in der Strahlungsintensität zur Folge haben kann, werden bei den späteren Messungen gesondert Richtwerte zur Intensität gegeben. Diese können jedoch von den tatsächlichen Werten abweichen. Die LED's waren in einem Abstand von 4,75 cm zur Oberfläche des Sensors angebracht. Der Abstand wurde vom Kopf der LED bis zum Sensor gemessen, wie Abbildung 3.8 zu entnehmen ist. Bei der 950 nm LED wurde der Abstand auf 1,75 cm verringert, um die höchstmögliche Intensität zu erreichen, ohne den Sensor aus Versehen zu berühren.

Da die Bestimmung der Strahlungsintensitäten bei der eigentlichen Messung nicht möglich war, werden bei der Auswertung die jeweils an den LED's anliegenden Spannungen angegeben. Um die Spannungen in Intensitäten umrechnen zu können, sind die Intensitäten und die jeweiligen Spannungen in Tabelle 3.3 bis Tabelle

3 Experiment

3.6 angegeben. Hierbei wurde zunächst das Messgerät mit dem Auge justiert, wie es bei den eigentlichen Messungen der Fall war. Außerdem werden die jeweiligen maximalen Intensitäten angegeben. Somit kann der ungefähre Fehler als Differenz zwischen dem Maximalen und dem mit dem Auge bestimmten Wert betrachtet werden. Ein Foto des Messaufbaus findet sich in Abbildung 3.9.

U in V ¹	1,30	1,35	1,40	1,45	1,50	1,55
I _A in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ²	1,15	4,31	11,23	20,94	32,51	45,35
I _m in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ³	1,15	4,31	11,26	21,15	32,94	46,19

Tabelle 3.3: Intensitäten für die 830 nm LED

U in V ¹	1,20	1,25	1,275	1,30	1,35	1,40	1,425	1,45	1,50
I _A in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ²	0,31	1,16	2,00	3,16	6,52	10,84	13,26	15,89	21,36
I _m in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ³	0,32	1,26	2,21	3,58	7,16	11,79	15,05	18,10	24,41

Tabelle 3.4: Intensitäten für die 850 nm LED

U in V ¹	1,21	1,25	1,30	1,35	1,40	1,44	1,46	1,50	1,54
I _A in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ²	1,05	2,00	3,68	5,68	8,00	10,00	11,05	13,26	15,47
I _m in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ³	1,16	2,21	4,00	6,31	8,94	11,26	12,42	14,84	17,36
U in V ¹	1,58	1,62	1,66	1,70	1,79				
I _A in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ²	17,78	20,20	22,62	25,15	30,83				
I _m in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ³	19,90	22,52	25,25	28,10	34,51				

Tabelle 3.5: Intensitäten für die 880 nm LED

U in V ¹	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70
I _A in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ²	0,74	6,21	18,73	36,20	57,13	79,97	104,17	129,430
I _m in $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2}$ ³	0,95	6,94	20,83	40,20	63,14	88,39	115,33	142,37

Tabelle 3.6: Intensitäten für die 950 nm LED

¹ LED Spannung

² Intensität bei Aufbau mit Augenmaß

³ Maximale Intensität mit Messgerät

3.1.6 Kalibrierung des verwendeten Detektors

Die verwendete Computersoftware für den Timepix war Pixelman [12]. Mit ihr wurden die Messungen und die Kalibrierung des Detektors ausgeführt. Als Redout diente ein FITPix Modul [13] das über den USB Anschluss mit dem Messrechner verbunden war. Diese Kalibrierung dient der Anpassung der Pixel und dem Filtern von rauschenden Pixeln. Hierfür wird die sogenannte „Treshold Equalization“ ausgeführt. Diese fährt die THL Werte selbstständig durch und sucht nach rauschenden Pixeln. Außerdem werden die Schwellen der Pixel aneinander angepasst. Die Werte der Equalization sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Abweichung von „Dist.“ und „Optimal Dist.“ von 1,14 ist nicht optimal, da das Auswertungsprogramm aber jeden Pixel einzeln betrachtet und diese gemessenen Werte nicht miteinander vergleicht, ist diese Anpassung nicht so wichtig, da sie nur die Pixelelektronik aneinander angleicht um die gleichen Energieschwellen in der Matrix zu bekommen. Es soll dafür gesorgt, dass jeder Pixel bei dem selben Energiewert anfängt ein Signal zu geben. Dies wird im Allgemeinen fast nicht erreicht, weswegen die Auflösung bei der Auswertung der Singlepixel besser wird, da hier das Energiespektrum eines Pixels genommen wird. Optimal wären Werte im 0,1 Bereich. Wieso diese trotz der relativ langen Treshold Equalization nicht optimal waren konnte nicht erklärt werden.

Der für dieses Experiment wichtigere Teil der Equalization sorgt für die Entfernung kaputter Pixel. Die erstellte Maske nimmt Pixel heraus, deren Aktivität laut Einstellungen drei Standardabweichungen höher oder niedriger ist als die des Durchschnittes. Hierdurch ist gewährleistet, dass sämtliche kaputten Pixel gefiltert werden, wobei statische Schwankungen nicht gefiltert werden. Auf diese Weise wird ein Großteil der Rauschpixel gefiltert, jedoch bleiben auch einige erhalten. Die so entstandene Maske ist in Abbildung 3.11 zu sehen. Die schwarzen Pixel sind hierbei die, die herausgenommen wurden. Insgesamt wurden 580 Pixel entfernt, da sie entweder inaktiv oder nur rauschend waren.

Nach der Treshold Equalization müssen noch einige Werte des Chips per Hand eingestellt werden. Die genauen Werte, die während der Messungen nie verändert wurden, können Tabelle 3.7 entnommen werden. Außerdem ist in Tabelle 3.7 ebenfalls der Name des verwendeten Chips (E03-W0083) angegeben.

3 Experiment

Clock	Ikrum	Disc	Preamp	BuffAnalogA	BuffAnalogB	Hist	THL
24 MHz	5	100	240	127	127	0	423
THLCoarse	Vcas	FBK	GND	THS	BiasLVDS	RefLVDS	Ext DAC
7	130	128	80	60	128	128	0

Tabelle 3.7: *Einstellungen für das E03-W0083 Board*

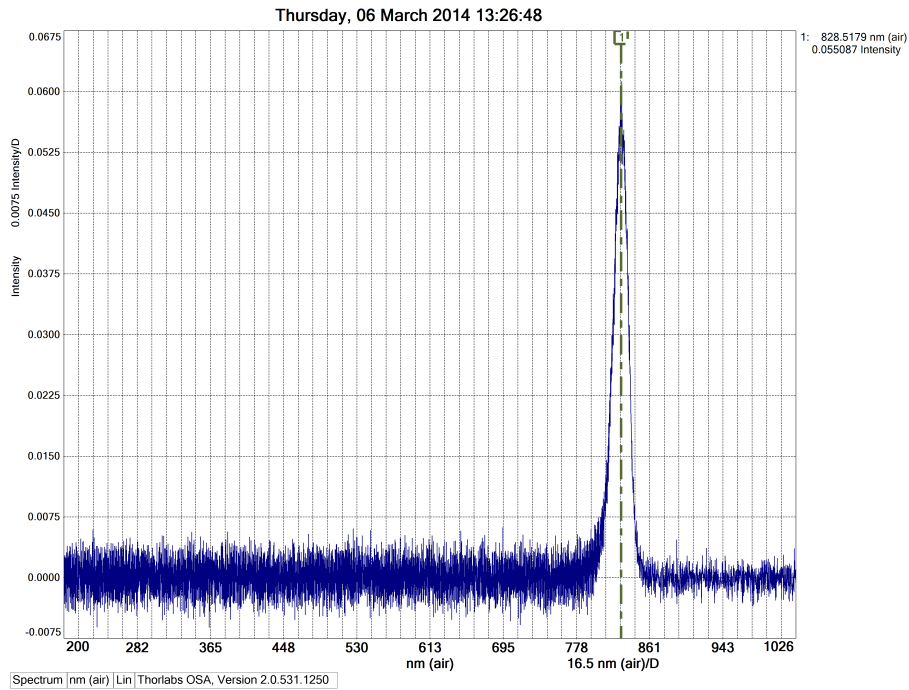


Abbildung 3.4: *Bestimmung der Wellenlänge der 830 nm LED*

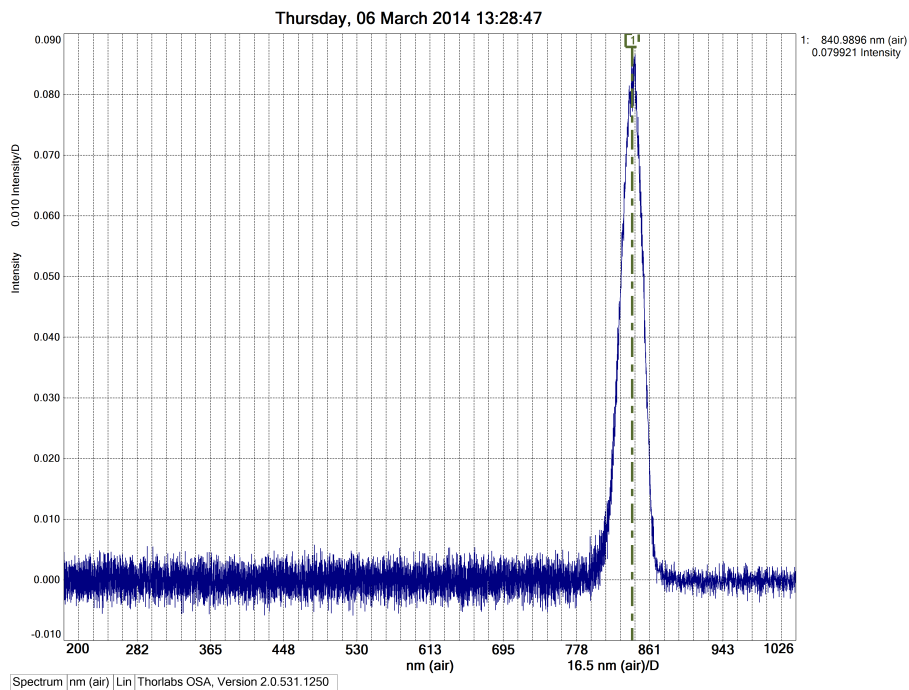


Abbildung 3.5: *Bestimmung der Wellenlänge der 850 nm LED*

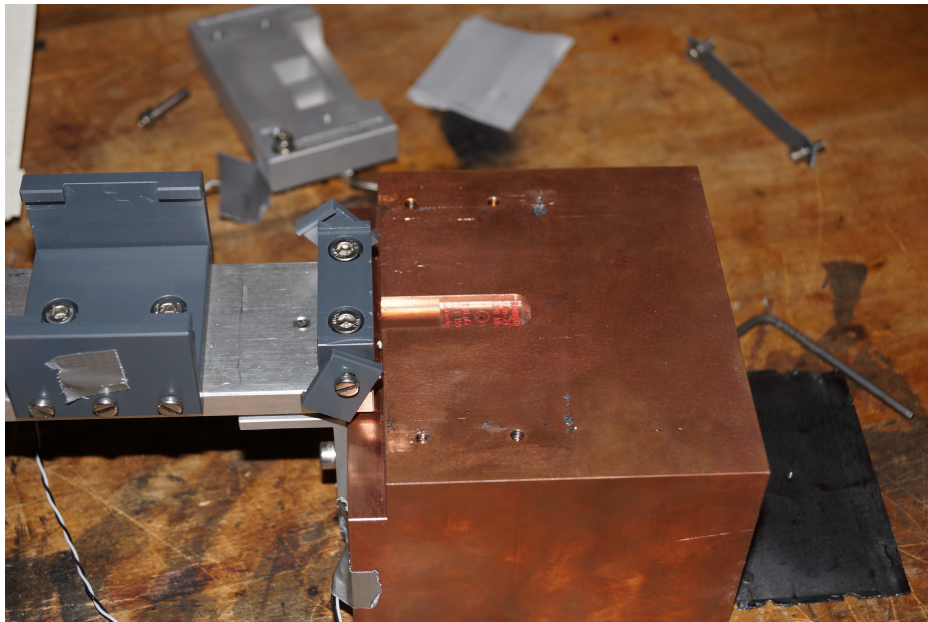


Abbildung 3.6: *Position der Strahlungsquelle*

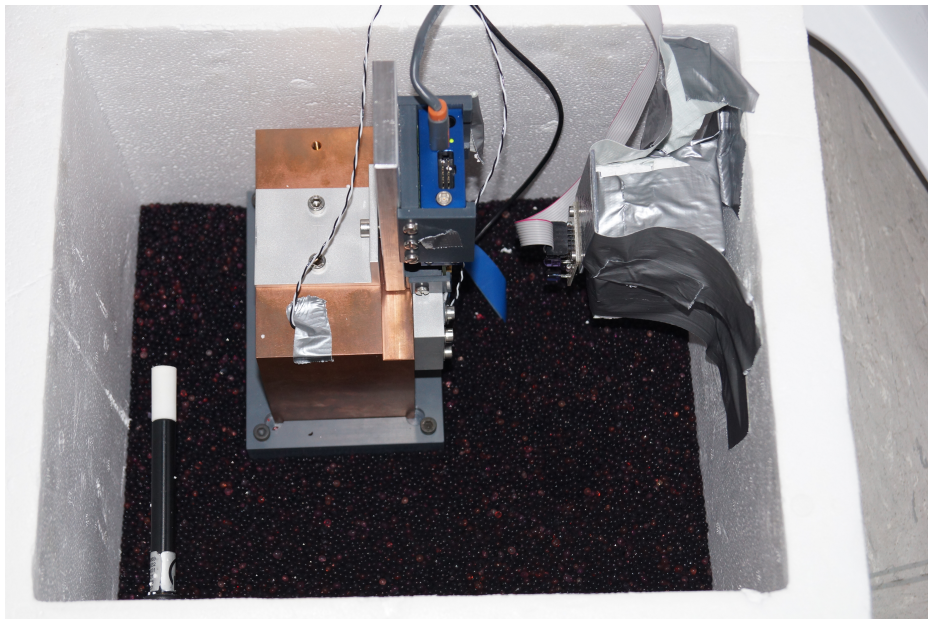


Abbildung 3.7: *Befestigung der LED's*

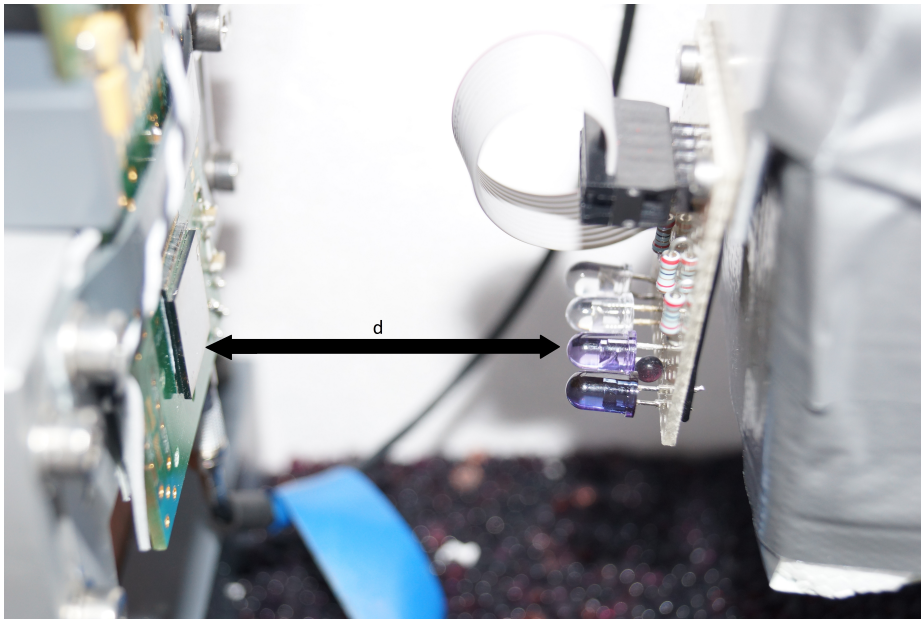


Abbildung 3.8: *Abstand der LED's*

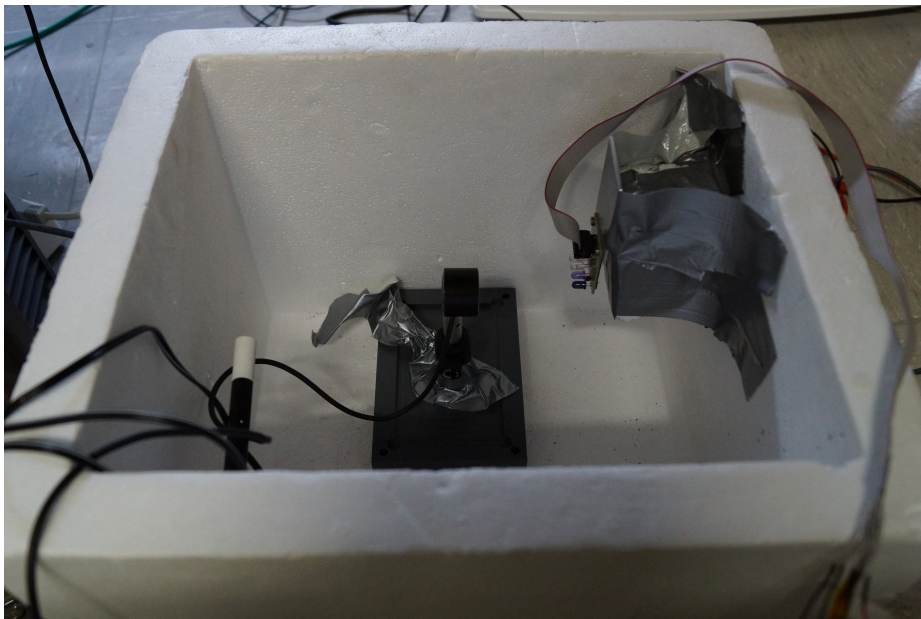


Abbildung 3.9: *Messung der LED Intensitäten*

3 Experiment

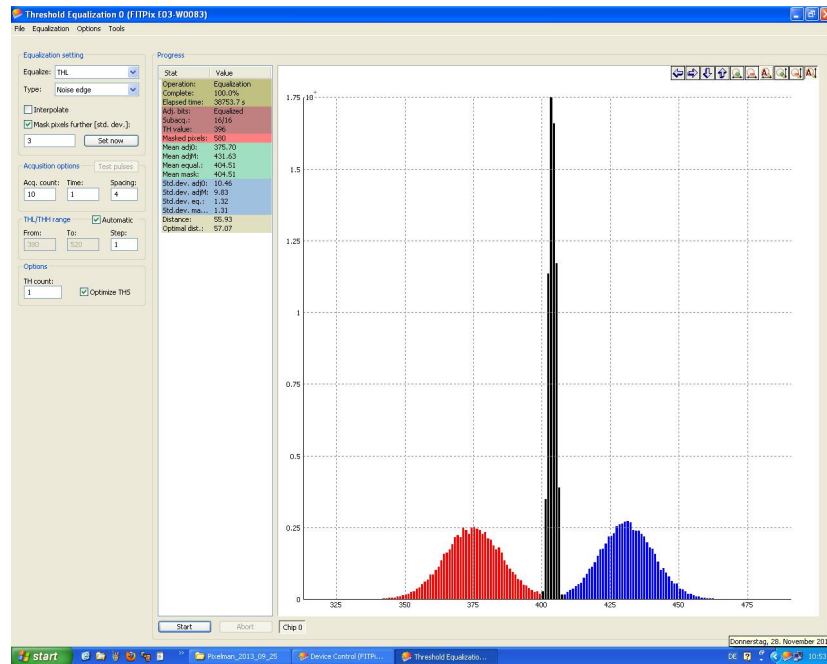


Abbildung 3.10: *THL Equalization Werte*

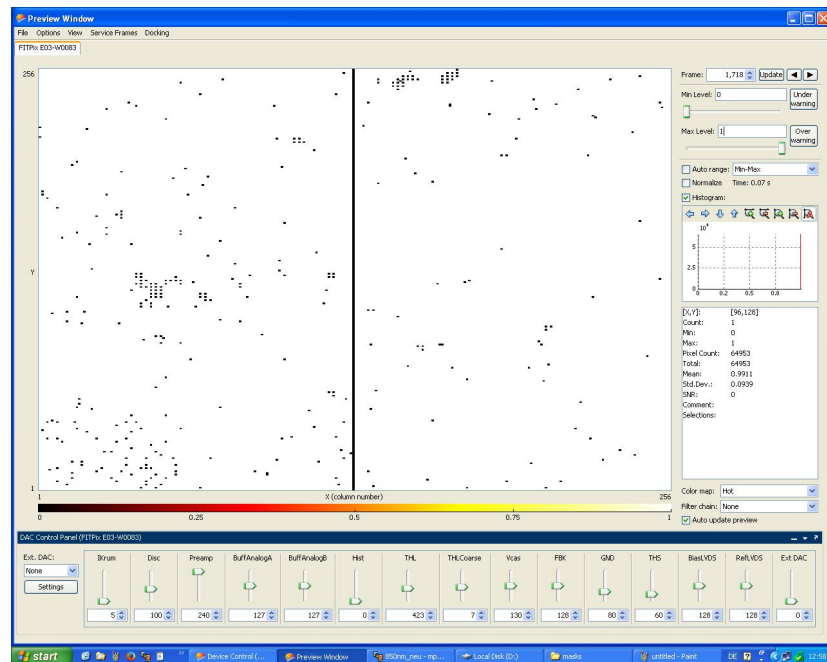


Abbildung 3.11: *Maske des Chips*

3.2 Versuchsdurchführung

Der Kühltisch und die Styroporbox wurden nur geöffnet, um die LED's neu zu positionieren, wenn die Messreihe einer LED bei allen Bias Spannungen abgeschlossen war. Somit konnte gewährleistet werden, dass die äußeren Einflüsse von Temperatur und Luftfeuchtigkeit so gering wie möglich gehalten wurden. Während den jeweiligen Messungen wurde die Temperatur des Kupferblocks, des Chips, der Styroporbox, sowie die Luftfeuchtigkeit in der Styroporbox gemessen. Generell wurden alle Messungen mit 36000 Frames und einer Framezeit von 0,07 s aufgenommen, um eine ausreichende Statistik der Messung zu gewährleisten. Da der Chip am Anfang der Messungen meist noch kalt war, wurde er etwa 10 Minuten betrieben, bevor die erste Messung gestartet wurde. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Temperatur des Chips bei Beginn der ersten Messung bereits stabil war und er nur leichten Schwankungen, die unvermeidbar waren, unterlag.

4 Auswertung

Bei der Auswertung soll zunächst auf die Funktionsweise des verwendeten Auswerteprogramms eingegangen werden. Bei jeder LED wurden die verschiedenen BIAS Spannungen miteinander verglichen. Außerdem wurden für die verschiedenen Bias Spannung die Werte aller LED's miteinander verglichen. Die Energieauflösungen sind als relative Energieauflösung full width at half maximum (FWHM) angegeben.

4.1 Methode

Das zugrunde liegende Programm zur Auswertung besteht aus zwei Teilprogrammen. Sie wurden von Thomas Gleixner und Ako Jamil programmiert, da eine Eigenständige Entwicklung der Programme den Rahmen der Zulassungsarbeit gesprengt hätte. Die Daten wurden ebenfalls von Thomas Gleixner über den HPC des RRZE der Universität Erlangen-Nürnberg ausgewertet, da er bereits mit der Verwendung der Programme vertraut war. Die Auswertung selbst hätte ebenfalls zu viel Zeit in Anspruch genommen, wenn sie vollständig von mir durchgeführt worden wäre. Im ersten Schritt werden die Daten der Messung direkt verarbeitet. Hierzu liest das Programm die einzelnen Pixel aus und erstellt zu diesen ein Histogramm mit den Energiewerten, die während der Messung aufgezeichnet wurden. Es werden alle Daten ausgelesen aber nur Singlepixel verwendet, also Pixel bei denen kein Nachbarpixel aktiv war. Das Energiespektrum wäre andernfalls durch die charge sharing Effekte verfälscht. Die Pixel, die in mehr als 1% der Frames vertreten sind, werden hierbei als rauschende Pixel aussortiert. Aus den so gewonnenen Daten wird nun Pixel für Pixel eine Gaußkurve gefittet, so erhält man von jedem zählenden Pixel den gefitteten Wert der Energieauflösung. Diese Werte werden als Histogramm ausgegeben und mit dem zweiten Programm ebenfalls mit Hilfe einer Gauß Funktion gefittet. Somit erhält man einen Fitwert für die Auflösung des gesamten Chips bei einer bestimmten Bias und LED Spannung. Der Fitfehler kann als Fehler der Messung betrachtet werden und wird mit Hilfe von Fehlerbalken in den späteren Grafiken dargestellt. Die so erhaltenen Werte für die Auflösung lassen

sich nun für verschiedene Bias und LED Spannungen und für die verschiedenen Wellenlängen der LED's vergleichen.

4.2 Ergebnisse

Bei der gesamten Messung blieb die Luftfeuchtigkeit relativ konstant. Die maximalen Schwankungen bei einzelnen Messreihen betrugen etwa 2% – 4%. Ein Beispiel für eine Luftfeuchtigkeitsmessung ist in Abbildung 4.1 zu sehen. Es ist eine Periode von etwa 45 Minuten erkennbar, wie Abbildung 4.2 zeigt. Bei den einzelnen Messungen sind die jeweiligen Schwankungen in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Temperaturen blieben während der gesamten Messungen ebenfalls relativ konstant. Ein Beispiel für eine Temperaturschwankung ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Die periodischen Schwankungen mit einer Periode von etwa 45 Minuten, die in Abbildung 4.4 erkennbar ist, hielten sich generell im Rahmen von 2 °C. Die genauen Werte für Temperaturen und Luftfeuchtigkeit werden nochmal übersichtlich bei den jeweiligen Messungen angegeben. Die beiden Beispiele sind über einen Zeitraum von 120 Stunden gemessen worden, in denen der Chip im Dauerbetrieb war.

4.2.1 Einfluss der Luftfeuchtigkeit

Die in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 zu sehenden Schwankungen der Luftfeuchtigkeit scheinen keinen großen Einfluss auf die Energieauflösung des Sensors zu haben. Wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist, ist die maximale Schwankung der relativen Energieauflösung kleiner als 0,001 inklusive der Fehlerbalken. Diese Schwankung liegt weit unter den Verbesserungen, die bei der Bestrahlung mit Infrarotlicht erzielt wurden. Die Abnahme der Auflösung bei den letzten Messungen lässt sich in Abbildung 4.1 durch eine Zunahme der Luftfeuchtigkeit gegen Ende der Messungen begründen. Dieser Effekt würde eine Schwankung von 0,0002 im Vergleich zum Beginn der Messungen zeigen. Somit kann der Einfluss der Luftfeuchtigkeit als vernachlässigbar betrachtet werden.

Lambda	Luftfeuchtigkeit	Chip	Kupferblock	Umgebung
830 nm	15,6%-16,2%	22,2 °C-23,0 °C	15,8 °C-16,1 °C	10,6 °C-13,6 °C
850 nm	15,6%-17,8%	20,5 °C-21,5 °C	14,1 °C-15,1 °C	10,6 °C-13,6 °C
880 nm	11,3%-15,6%	21,5 °C-22,5 °C	15,8 °C-16,2 °C	10,6 °C-13,6 °C
950 nm	17,5%-18,3%	20,3 °C-21,4 °C	14,6 °C-15,5 °C	10,6 °C-13,6 °C

Tabelle 4.1: *Daten für alle Messungen*

4.2.2 Einfluss der Temperatur

Die Schwankungen der Temperatur, die in Abbildung 4.3 und Abbildung 4.4 zu sehen sind, scheinen die Genauigkeit der Messung nur gering zu beeinflussen. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist, kann die Abnahme der Genauigkeit gegen Ende nicht durch Temperaturschwankungen erklärt werden. Die Schwankungen während der Messung liegen in einem Bereich von 0,005. Dieser Effekt könnte an der Schwankung der Temperatur liegen. Ob die Schwankungen der Energieauflösung von der Temperatur- oder Luftfeuchtigkeitsschwankung kommen, kann nicht näher erklärt werden. Jedoch ist generell zu erkennen, dass die Einflüsse von Luftfeuchtigkeit und Temperatur so gering waren, dass die erzielten Verbesserungen mit LED signifikant sind. Es ist außerdem fraglich, ob es wirklich äußere Einflüsse oder statische Schwankungen sind, die bei der Messung in Abbildung 4.5 zu sehen sind. Es scheint sich eher um dominierende statistische Schwankungen zu handeln, da alle Schwankungen im Bereich der Fehlerbalken liegen.

4.2.3 Vergleich der Wirkung verschiedener Bias Spannungen bei gleicher Wellenlänge

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Messungen bezüglich verschiedener Bias Spannungen verglichen. Die Spannung wurde hierbei auf 300 V, 400 V und 500 V eingestellt. Die Ergebnisse sind nach Wellenlänge der jeweils verwendeten LED's gegliedert. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die LED's während der gesamten Messung einer LED nicht bewegt und die Box nicht geöffnet.

830 nm LED

Die aufgetretenen Schwankungen der Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit, bei der Messung der 830 nm LED, sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Die Messung in Abbildung 4.6 lässt eine deutliche Verbesserung der Energieauflösung erkennen. Die Auflösung ist mit LED generell besser als ohne, wobei sich zeigt, dass zum Beispiel die Auflösung bei 500 V ohne LED besser ist als bei 300 V mit LED. Die optimalen Spannungen und Energieauflösungen der einzelnen Bias Spannungen sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

Hier zeigt sich, dass das beste Ergebnis bei einer Bias Spannung von 500 V erreicht wurde. Außerdem ist zu erkennen, dass die optimale Intensität der LED mit zunehmender Spannung kleiner wird.

In Abbildung 4.7 ist die Anzahl aktiver Pixel bei jeweiliger LED Spannung ange tragen. Man erkennt, dass es bei höheren Intensitäten zu einem größeren Ausfall an Pixeln kommt, was durch den erhöhten Leckstrom zu erklären ist. Es zeigt sich außerdem, dass bei höherer Bias Spannung die Pixel schon bei geringen Intensitäten ausfallen, was konsistent mit der Verschiebung der optimalen Intensität der LED ist.

850 nm LED

Die aufgetretenen Schwankungen der Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit bei der Messung der 850 nm LED sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Wie zu erwarten war, zeigt die 850 nm LED in Abbildung 4.8 ein ähnliches Verhalten die 830 nm LED. Die Werte der besten Energieauflösung sind Tabelle 4.4 zu entnehmen. Allerdings scheint sich bei 850 nm die Auflösung zunächst zu verschlechtern und bei höheren Intensitäten zu verbessern. Wieso dieser Effekt auftritt, ist jedoch unklar.

Die Abnahme aktiver Pixel ist wie bei der 830 nm LED klar in Abbildung 4.9 zu erkennen. Die Ergebnisse decken sich ebenfalls mit den Erwartungen und Werten der 830 nm LED.

Die Werte bei 1,275 V und 1,425 V wurden erst nach Abschluss der eigentlichen Messreihen aufgenommen. Die Box wurde zwar zwischen den Messungen nicht geöffnet, dennoch scheint es eine systematische Verschiebung der Werte zu geben. Woher diese Verschiebung kommt kann nicht geklärt werden, da sie bei allen Bias Spannungen auftritt. Die Anzahl aktiver Pixel war wesentlich höher, als bei dem

eigentlichen Messdurchlauf. Es lässt sich also auf ein eventuelles Problem des Chips bei der Messung schließen.

880 nm LED

Die aufgetretenen Schwankungen der Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit bei der Messung der 880 nm LED sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Wie zu erwarten, zeigt die 880 nm LED in Abbildung 4.10 ein ähnliches Verhalten wie die 830 nm LED. Die Werte der besten Energieauflösung sind Tabelle 4.5 zu entnehmen.

Die Abnahme aktiver Pixel bei der 880 nm LED ist klar in Abbildung 4.11 zu erkennen. Das hier entstehende Bild deckt sich ebenfalls mit den Erwartungen und Werten der 830 nm LED.

950 nm LED

Die aufgetretenen Schwankungen der Temperaturen und der Luftfeuchtigkeit bei der Messung der 950 nm LED sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

Wie in Abbildung 4.12 zu erkennen ist, zeigt die 950 nm LED keine signifikanten Effekte bezüglich der Energieauflösung. Die Anzahl der Aktiven Pixel in Abbildung 4.13 scheint ebenfalls nur statistischen Schwankungen zu unterliegen. Folglich scheint die 950 nm LED keine Auswirkungen auf die Energieauflösung zu haben. Bei 500 V sieht man eine leichte Verbesserung der relativen Energieauflösung. Diese Effekte können durch die Bestrahlung mit Infrarotlicht hervorgerufen werden, sie sind jedoch sehr gering.

Werte für Optimale Energieauflösungen

Im Folgenden sind die besten Energieauflösungen der jeweiligen Spannungen und LED's tabellarisch dargestellt. Da bei der 950 nm LED keine Signifikanz feststellbar war, existiert keine Tabelle für 950 nm.

U ¹	300 V	400 V	500 V
$\Delta E/E$ in % ²	$8,48 \pm 0,01$	$8,13 \pm 0,01$ %	$7,95 \pm 0,01$

Tabelle 4.2: Übersicht der Auflösungen ohne LED

U ¹	300 V	400 V	500 V
$\Delta E/E$ in % ²	$7,97 \pm 0,01$	$7,77 \pm 0,01$	$7,66 \pm 0,01$
LED ³	1,5 V	1,45 V	1,45 V

Tabelle 4.3: Übersicht der besten Auflösungen für 830 nm

U ¹	300 V	400 V	500 V
$\Delta E/E$ in % ²	$8,06 \pm 0,02$	$7,70 \pm 0,02$	$7,58 \pm 0,02$
LED ³	1,5 V	1,45 V	1,35 V

Tabelle 4.4: Übersicht der besten Auflösungen für 850 nm

U ¹	300 V	400 V	500 V
$\Delta E/E$ in % ²	$7,84 \pm 0,01$	$7,68 \pm 0,01$ %	$7,44 \pm 0,01$
LED ³	1,7 V	1,62 V	1,54 V

Tabelle 4.5: Übersicht der besten Auflösungen für 880 nm

¹ Bias Spannung

² Relative Energieauflösung FWHM

³ LED Spannung

4.2.4 Vergleich der LED's bei gleicher Bias Spannung

Im folgenden Abschnitt sollen die Energieauflösungen, die mit der Bestrahlung erreicht wurden, bei gleicher Bias Spannung verglichen werden. Die jeweiligen Rahmenbedingungen der einzelnen Messungen können Kapitel 4.2.3 entnommen werden.

300 V Bias Spannung

Wie in Abbildung 4.14 zu sehen ist, hat die 880 nm LED die besten Auswirkungen auf die Energieauflösung. Die 830 nm LED scheint leicht besser zu sein als die 850 nm LED. Der einzelne bessere Messwert könnte ein Ausreißer sein. Die 850 nm LED liefert teilweise sogar schlechtere Werte als die Messung ohne LED. Die 950 nm LED scheint keine signifikanten Einflüsse zu haben.

Wie in Abbildung 4.15 zu sehen ist, nimmt die Anzahl aktiver Pixel bei den LED's der Wellenlängen 830 nm und 850 nm am meisten ab. Bei der 880 nm LED ist ein vergleichsweise kleiner Abfall zu erkennen. Bei 850 nm scheinen generell weniger Pixel aktiv zu sein.

Hier ergibt sich die optimale Wellenlänge zu 880 nm, da sie die größte Anzahl aktiver Pixel bei der besten Auflösung liefert.

400 V Bias Spannung

Bei dieser Messung scheint in Abbildung 4.16 die 830 nm LED genauso gute Ergebnisse wie die 880 nm LED zu liefern. Wobei die 850 nm LED am Anfang wieder eine schlechtere Auflösung als die Messung ohne LED zu haben scheint. Bei 950 nm ist wieder keine signifikante Verbesserung zu sehen.

In Abbildung 4.17 zeigt sich ein ähnliches Verhalten bezüglich aktiver Pixel wie bei der Messung mit 300 V Bias Spannung.

Generell kann man also sagen, dass die 880 nm LED sowohl die beste Energieauflösung liefert, als auch die beste Zahl aktiver Pixel. Die Zahl aktiver Pixel bezieht sich hierbei auf die Optimale Intensität der LED.

500 V Bias Spannung

Wie in Abbildung 4.18 zu sehen ist, ergibt sich bezüglich der Energieauflösung ein ähnliches Bild wie für 400 V Bias Spannung.

4 Auswertung

In Abbildung 4.19 zeigt sich ein ähnliches Verhalten bezüglich aktiver Pixel, wie bei den Messungen mit 300 V und 400 V Bias Spannung.

Somit ergibt sich hier ebenfalls die 880 nm LED als die Beste bezüglich Auflösung und aktiver Pixel.

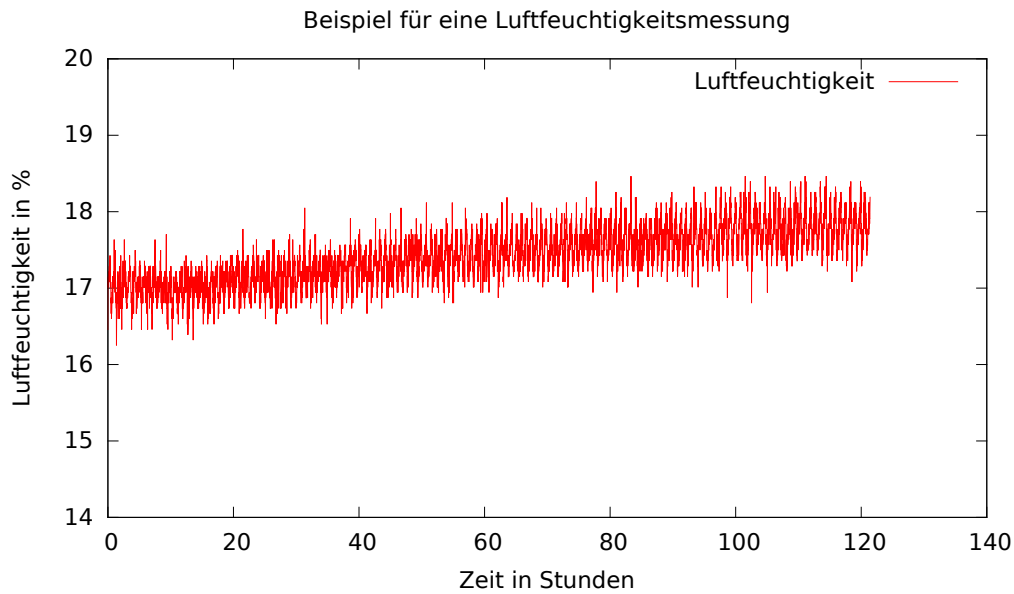


Abbildung 4.1: *Beispiel für eine Luftfeuchtmessung*

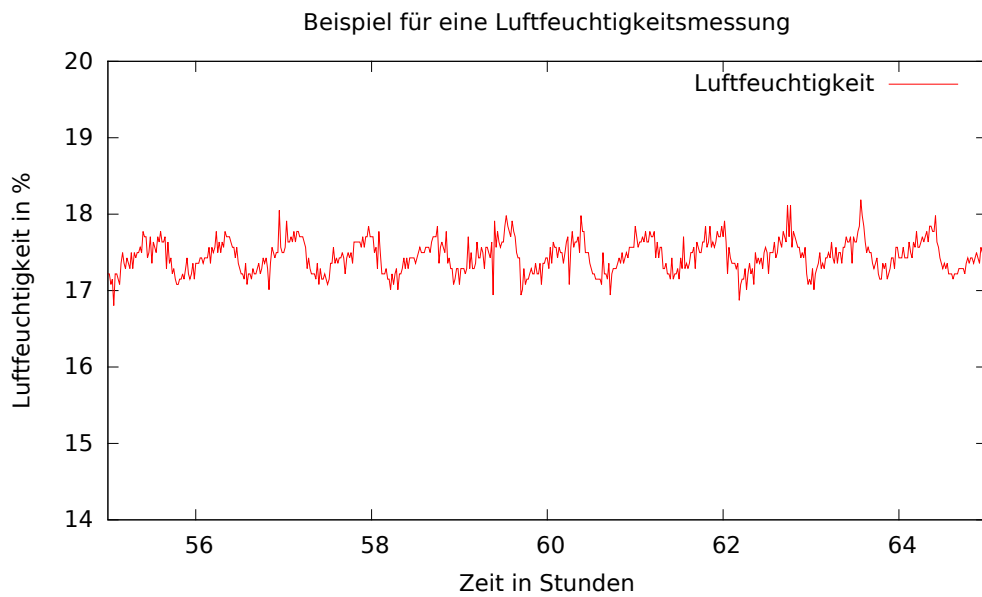


Abbildung 4.2: *Luftfeuchtmessung im Bereich von 10 Stunden*

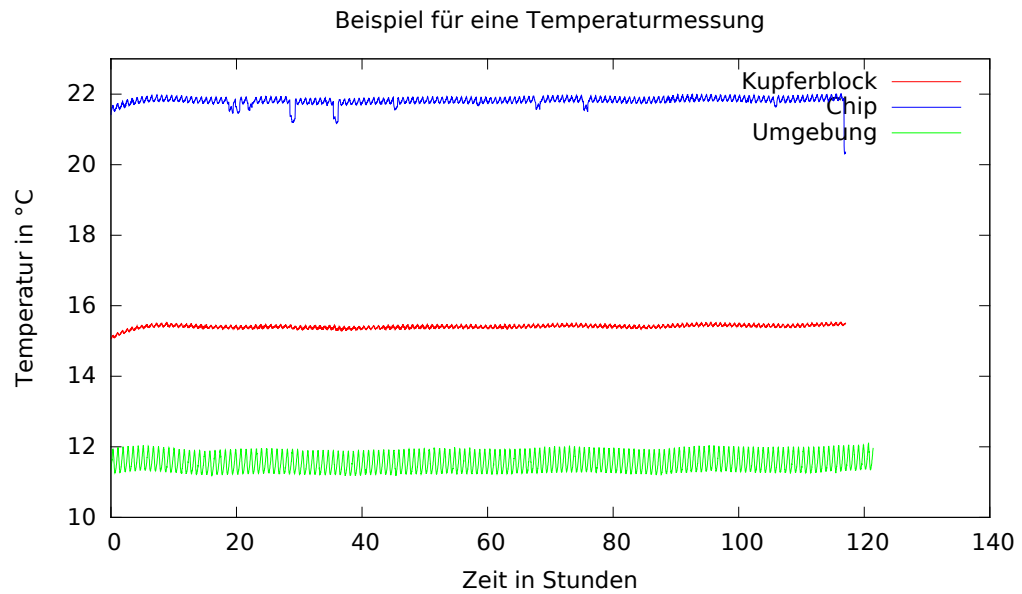


Abbildung 4.3: *Beispiel für eine Temperaturmessung*

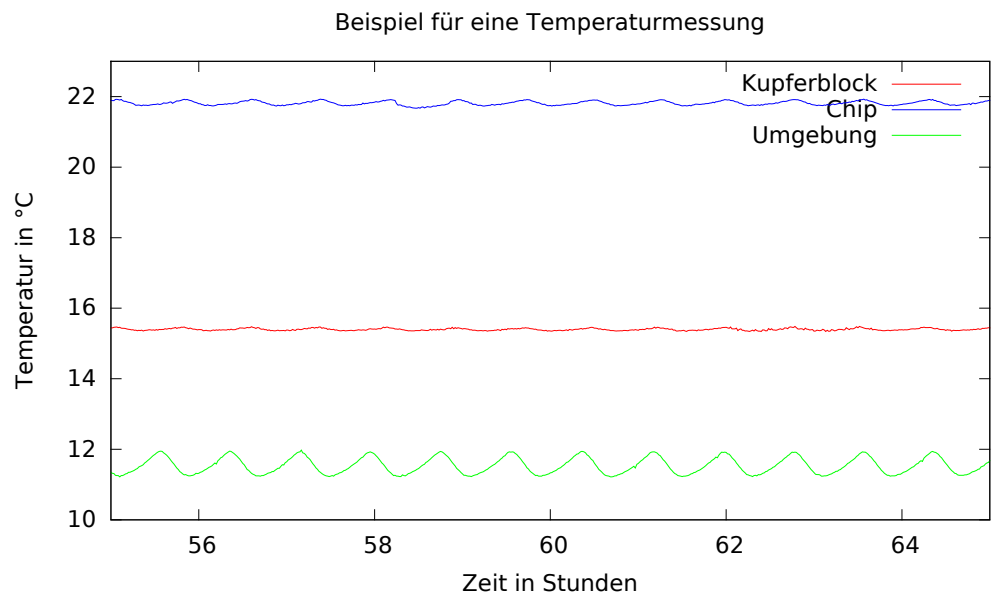


Abbildung 4.4: *Temperaturmessung im Bereich von 10 Stunden*

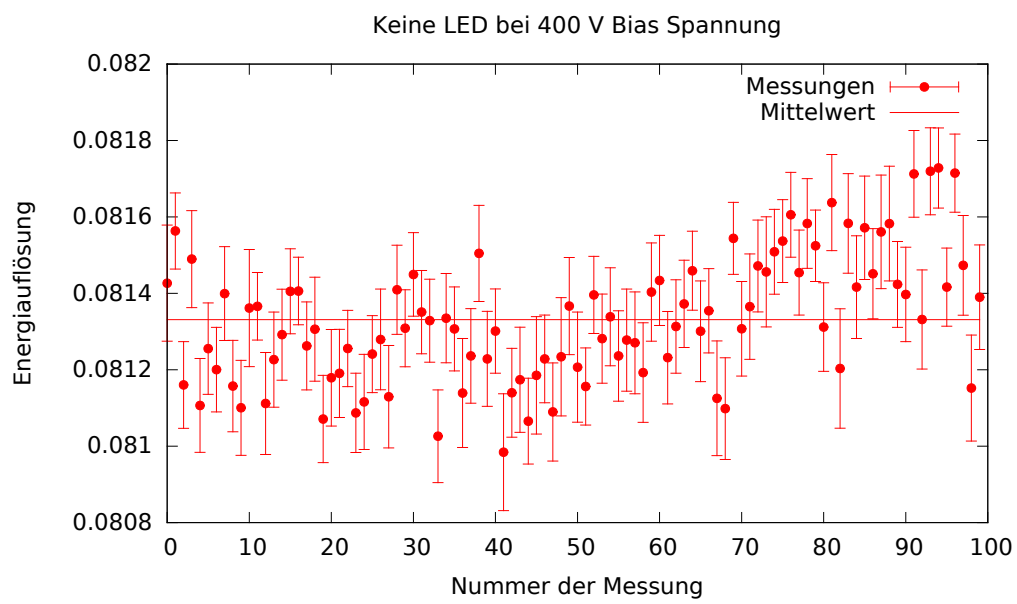


Abbildung 4.5: Messung bei 400 V Bias Spannung ohne LED

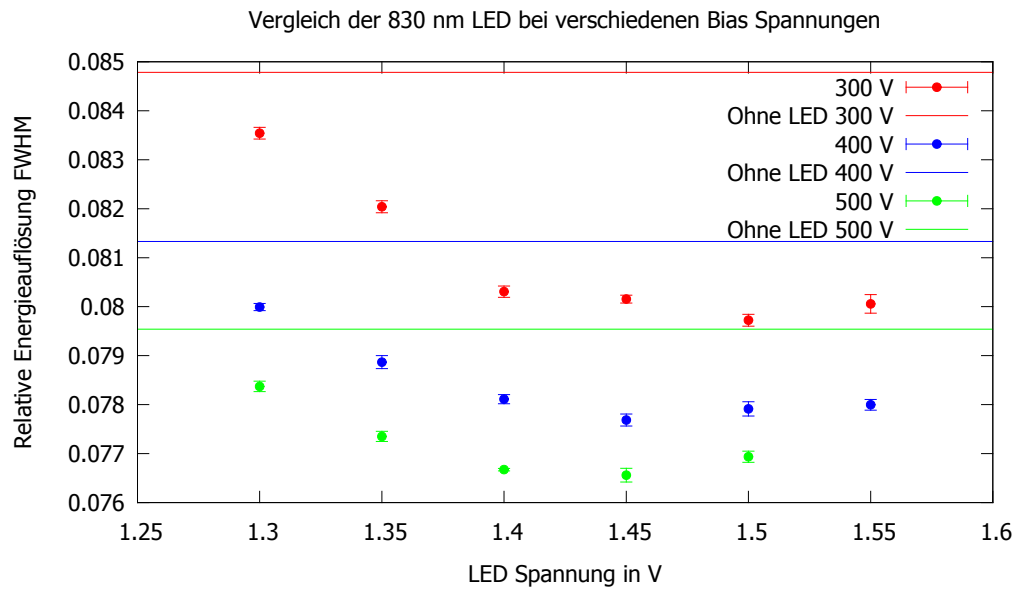


Abbildung 4.6: Energieauflösung der 830 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

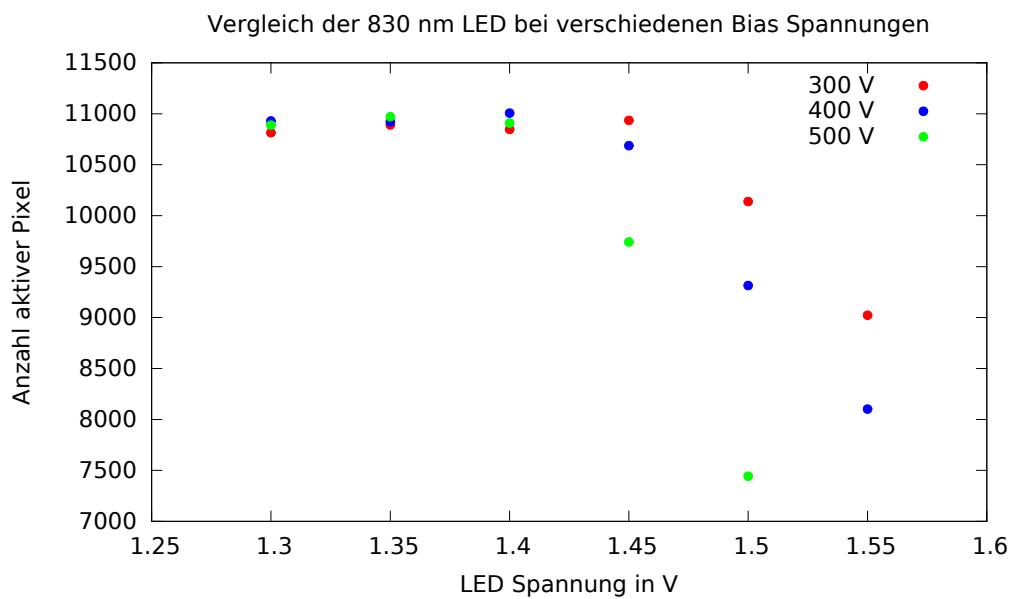


Abbildung 4.7: Aktive Pixel der 830 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

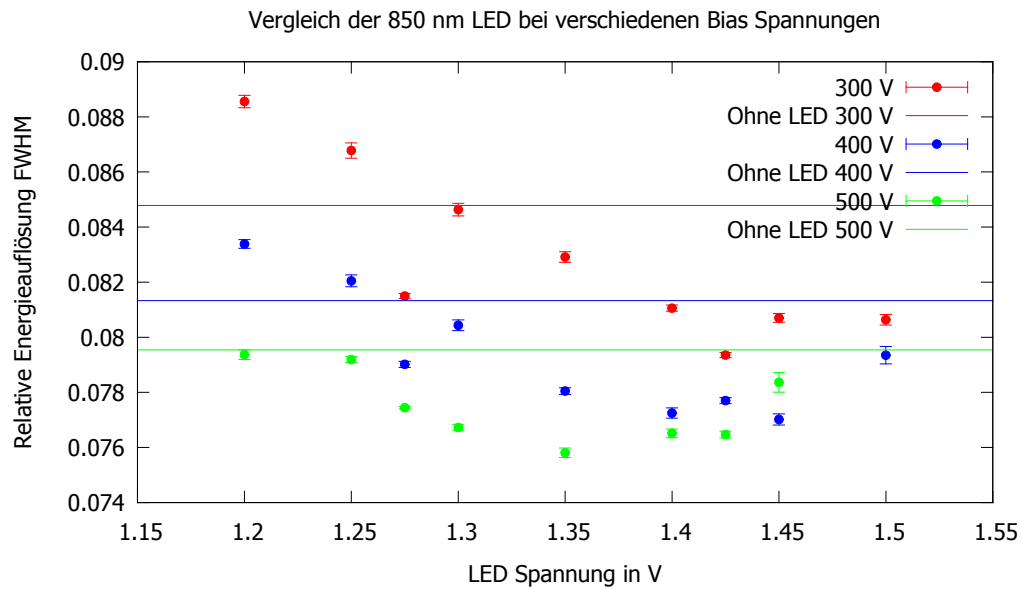


Abbildung 4.8: Energieauflösung der 850 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

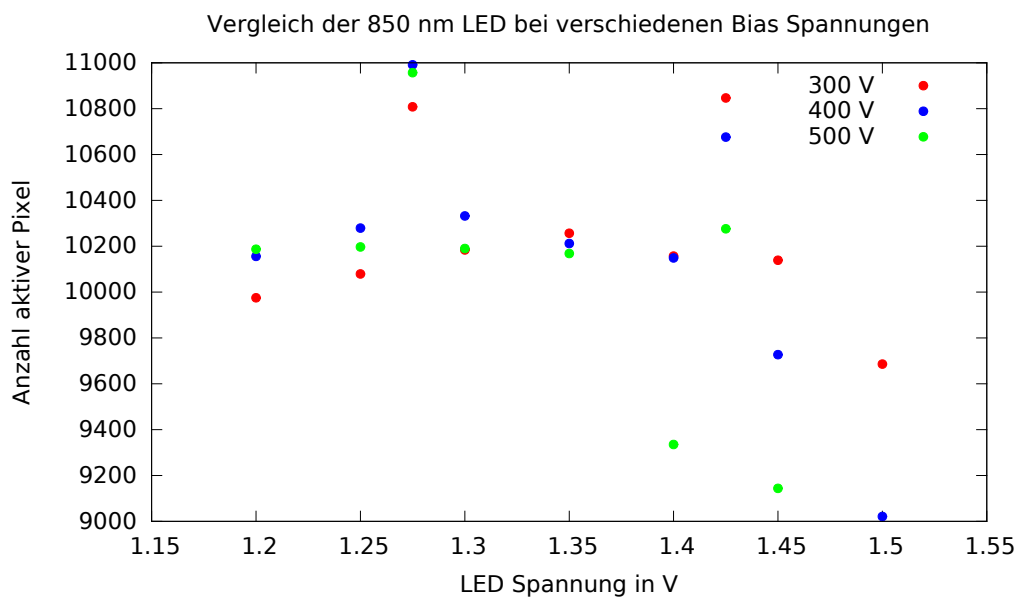


Abbildung 4.9: Aktive Pixel der 850 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

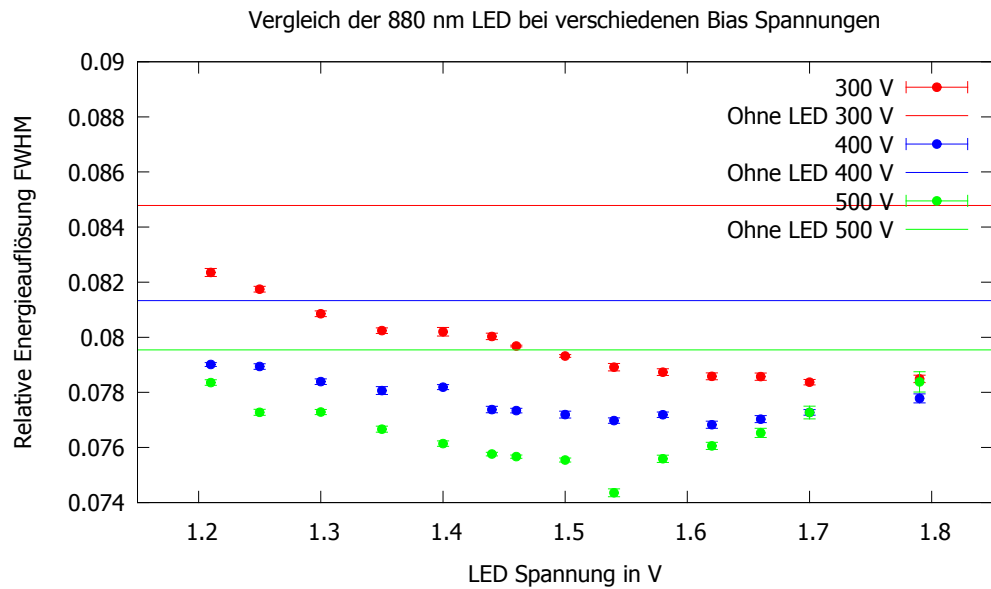


Abbildung 4.10: Energieauflösung der 880 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

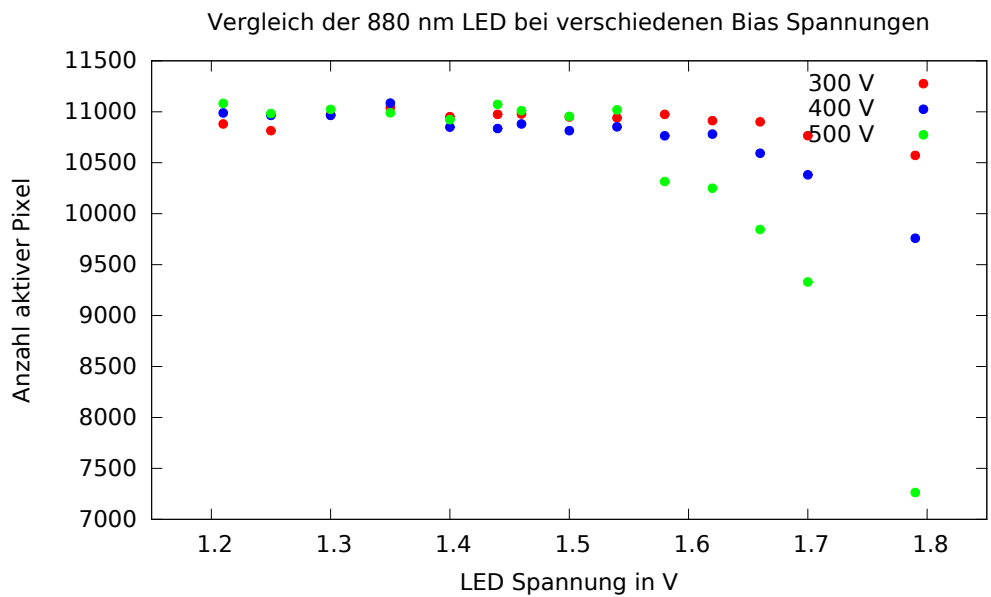


Abbildung 4.11: Aktive Pixel der 880 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

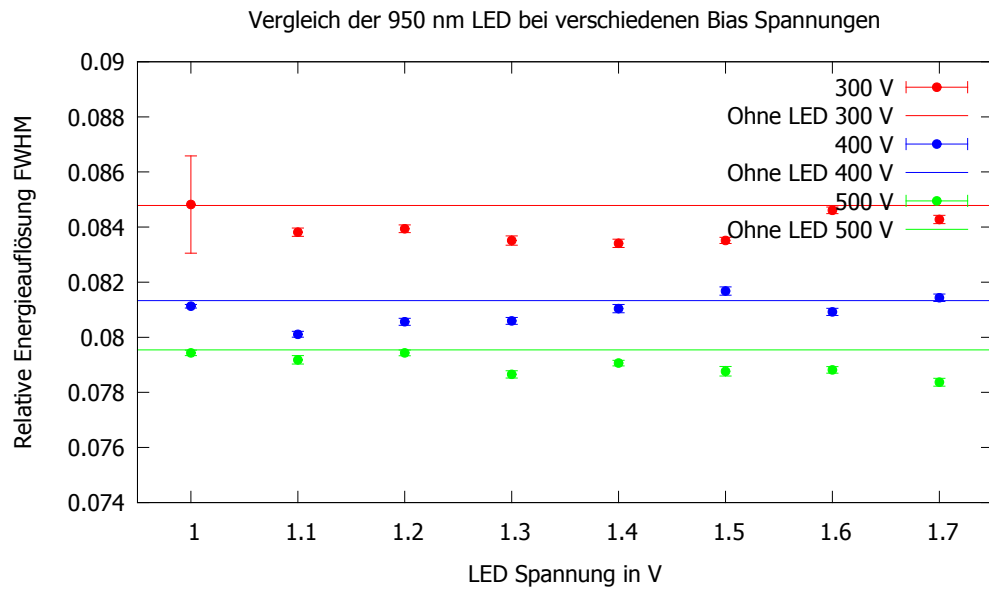


Abbildung 4.12: Energieauflösung der 950 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

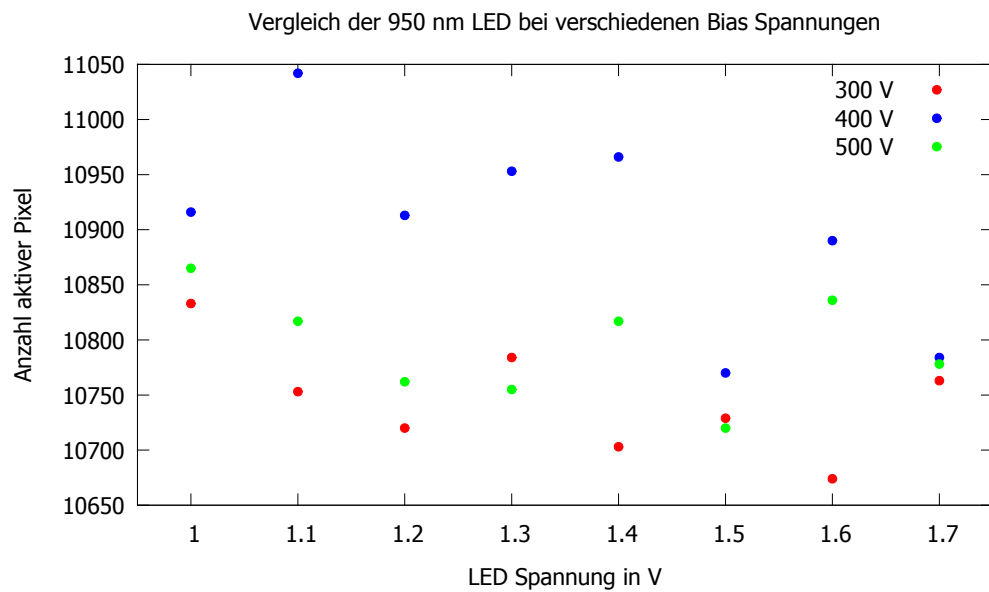


Abbildung 4.13: Aktive Pixel der 950 nm LED bei verschiedenen Bias Spannungen

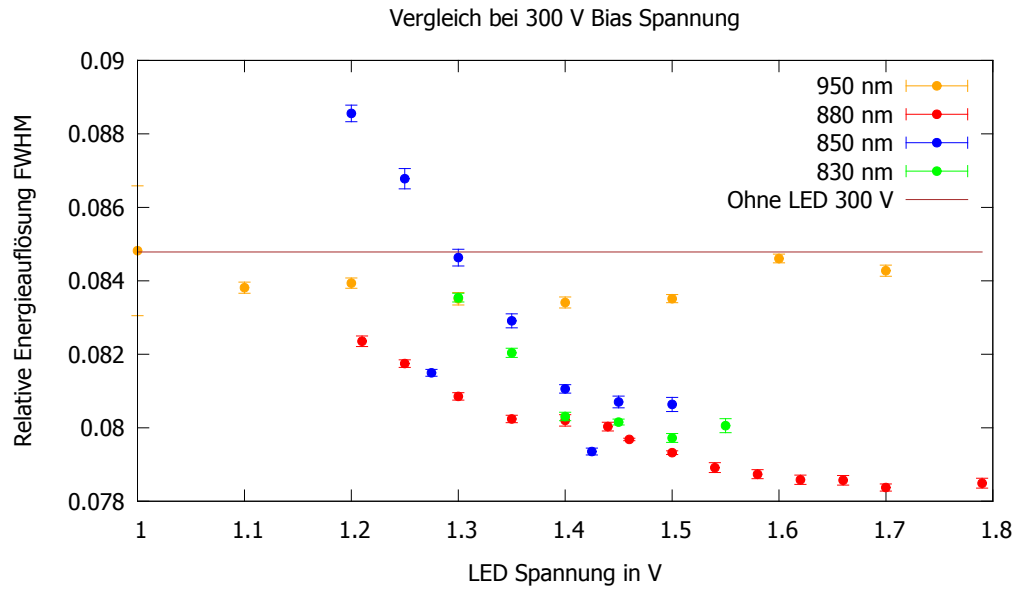


Abbildung 4.14: Energieauflösung aller LED's bei 300 V Bias Spannung

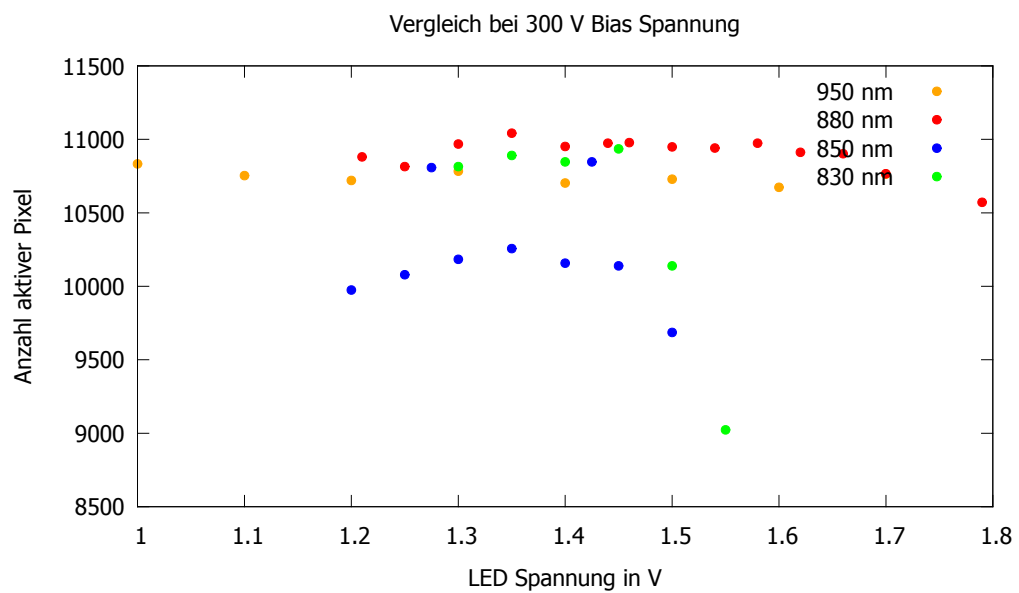


Abbildung 4.15: Aktive Pixel aller LED's bei 300 V Bias Spannung

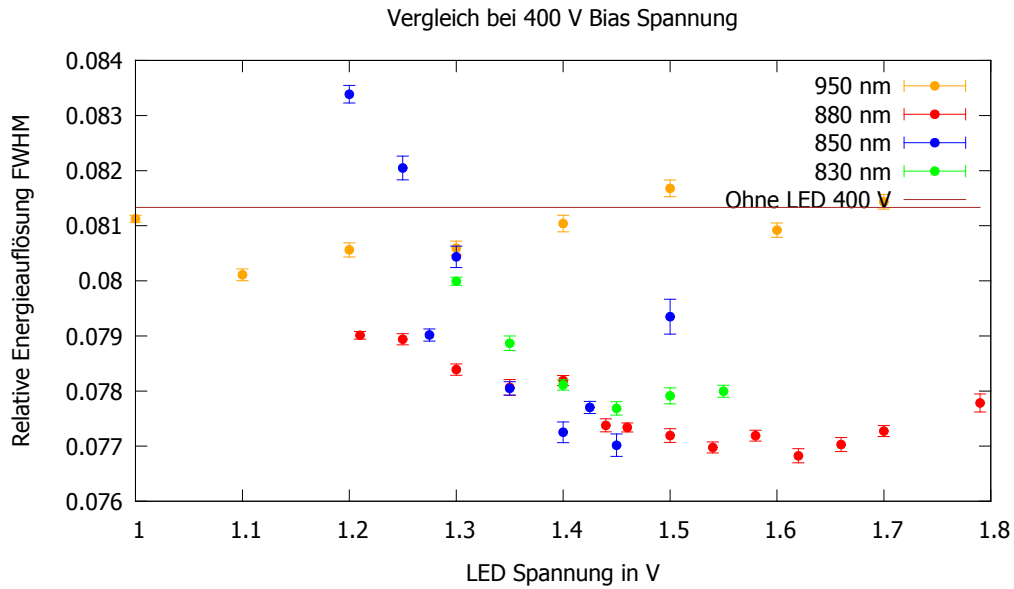


Abbildung 4.16: Energieauflösung aller LED's bei 400 V Bias Spannung

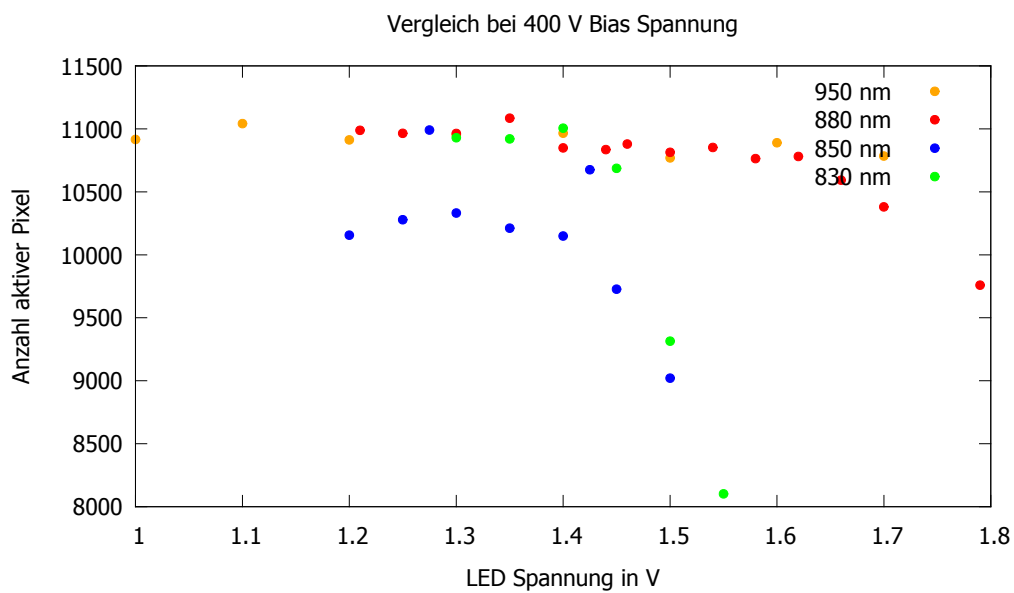


Abbildung 4.17: Aktive Pixel aller LED's bei 400 V Bias Spannung

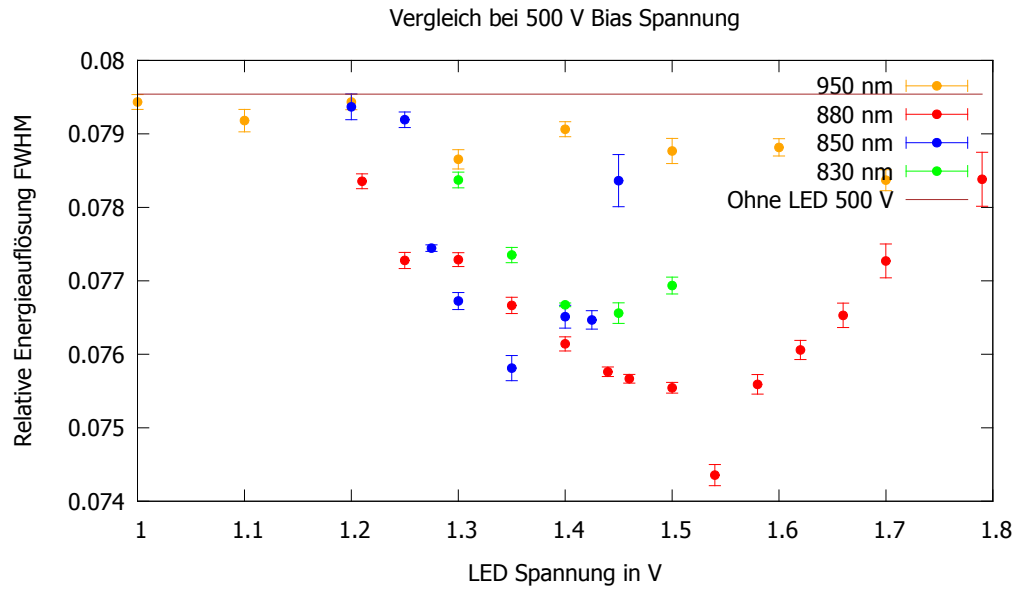


Abbildung 4.18: Energieauflösung aller LED's bei 500 V Bias Spannung

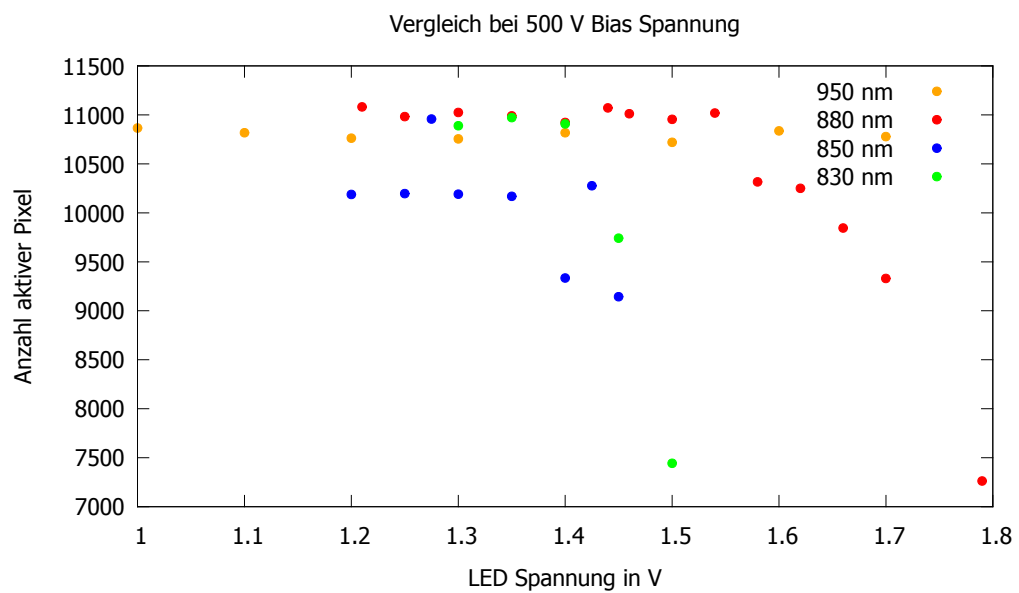


Abbildung 4.19: Aktive Pixel aller LED's bei 500 V Bias Spannung

5 Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich bei den Messungen, dass eine höhere Bias Spannung generell mit einer besseren Energieauflösung zusammenhängt. Dieser Effekt lässt sich durch das verringerte charge sharing und eine höhere Driftgeschwindigkeit der induzierten Ladungsträger erklären. Die Anzahl aktiver Pixel nimmt mit höherer Bias Spannung zu, was sich durch den höheren Leckstrom erklären lässt [6]. Durch den hohen Leckstrom bei hohen Bias Spannungen kommt es zu einem Ausfall von Pixeln bei geringerer Intensität der LED's. Die Energieauflösung wird folglich bei geringeren LED Intensitäten maximal, bevor immer mehr Pixel aufgrund des höheren Leckstroms in ein Rauschen verfallen. Der erhöhte Leckstrom ist hierbei wahrscheinlich ebenfalls der Grund der Abnahme der Energieauflösung.

Der Effekt von Infrarotstrahlung auf den CdTe Sensor des Timepix Detektors lässt sich somit klar nachweisen. Er liegt signifikant über den zu erwartenden Werten von statistischen Schwankungen und die besten Wellenlängen scheinen im Bereich von 850 nm bis 880 nm zu liegen, wobei sich meistens die 880 nm als beste LED zeigt. Die Infrarotstrahlung scheint die Beweglichkeit der Ladungsträger positiv zu beeinflussen, was sich in einem Anstieg des Leckstromes und dem damit verbundenen Ausfall von Pixeln bei höheren Intensitäten bemerkbar macht.

Die erzielten Verbesserungen lagen in einem Bereich von teilweise über 5%. Es ist also zu überlegen, ob man die Wirkung von Infrarotstrahlung in Zukunft ausnutzen möchte, oder ob der Aufwand für die Bestrahlung des Sensors größer als der dadurch erzeugte Gewinn ist. Die Kosten für die Verbesserung der Energieauflösung halten sich vergleichsweise gering, gemessen an den Kosten des Detektors.

Literaturverzeichnis

- [1] PLATKEVIC, Michal ; BOCAROV, Viktor ; JAKUBEK, Jan ; POSPISIL, Stanislav ; TICHY, Vladimir ; VYKYDAL, Zdenek: Signal processor controlled USB2.0 interface for Medipix2 detector. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 591 (2008), Nr. 1, 245 - 247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2008.03.065>. – DOI 10.1016/j.nima.2008.03.065. – ISSN 0168–9002. – Radiation Imaging Detectors 2007 Proceedings of the 9th International Workshop on Radiation Imaging Detectors
- [2] GUNI, Ewald: *Untersuchung von CdTe als Sensormaterial für die spektroskopische Röntgenbildgebung*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2012
- [3] DOROGOV, P. ; IVANOV, V. ; LOUTCHANSKI, A. ; GRIGORJEVA, L. ; MILLERS, D.: Improving the performance of CdZnTe detectors using infrared stimulation. (2011), Oct, S. 4557–4561. <http://dx.doi.org/10.1109/NSSMIC.2011.6154734>. – DOI 10.1109/NSSMIC.2011.6154734. – ISSN 1082–3654
- [4] BAKST, Anastasia: *Optimierung der Energieauflösung eines Timepix-Detektors mit CdTe-Sensor durch Bestrahlung mit Infrarot-Licht*, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2013
- [5] LLOPART, X. ; BALLABRIGA, R. ; CAMPBELL, M. ; TLUSTOS, L. ; WONG, W.: Erratum to “Timepix, a 65 k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements” [Nucl. Instr. and Meth. A. 581 (2007) 485–494]. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 585 (2008), Nr. 1–2, 106 - 108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2007.11.003>. – DOI 10.1016/j.nima.2007.11.003. – ISSN 0168–9002
- [6] FILIPENKO, Mykhaylo ; GLEIXNER, Thomas ; ANTON, Gisela ; DURST, Jürgen ; MICHEL, Thilo: Characterization of the energy resolution and the tracking capabilities of a hybrid pixel detector with CdTe-sensor layer for a possible use in a neutrinoless double beta decay experiment. In: *The European Physical Journal C* 73 (2013), Nr. 4, 1-10. <http://dx.doi.org/10.1140/>

- epjc/s10052-013-2374-1. – DOI 10.1140/epjc/s10052-013-2374-1. – ISSN 1434-6044
- [7] FINK, Johannes: *Untersuchungen zur Ladungsträgersammlung in verschiedenen Halbleitermaterialien mittels der Transient Current Technique*, Universität Bonn, Diplomarbeit, 2004
- [8] <http://www.kerafol.com/thermalmanagement/keratherm/softthermfolien.html>, Abruf: 18. Februar. 2014
- [9] http://www.carlroth.com/website/de-de/pdf/DE_Trocknungsmittel_Pr.pdf, Abruf: 19. Februar. 2014
- [10] <http://www.ld-didactic.de/index.php?id=cassy-s&L=2%25252Fphk%25252Fsale.asp%25253FL%25253D2>, Abruf: 04. März. 2014
- [11] [http://www.meilhaus.de/index.php?id=26&user_produkte\[PR\]=88&L=0&cHash=0f2a64aec5](http://www.meilhaus.de/index.php?id=26&user_produkte[PR]=88&L=0&cHash=0f2a64aec5), Abruf: 04. März. 2014
- [12] TURECEK, D ; HOLY, T ; JAKUBEK, J ; POSPISIL, S ; VYKYDAL, Z: Pixelman: a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors. In: *Journal of Instrumentation* 6 (2011), Nr. 01, C01046. <http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=01/a=C01046>
- [13] KRAUS, V ; HOLIK, M ; JAKUBEK, J ; KROUPA, M ; SOUKUP, P ; VYKYDAL, Z: FITPix — fast interface for Timepix pixel detectors. In: *Journal of Instrumentation* 6 (2011), Nr. 01, C01079. <http://stacks.iop.org/1748-0221/6/i=01/a=C01079>

Danksagung

Zum Abschluss dieser Arbeit möchte ich mich bei einigen Leuten bedanken, ohne deren Hilfe die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Mein herzliches Dankeschön an:

- Frau Prof. Dr. Gisela Anton für die Überlassung des Arbeitsthemas und die Unterstützung vor allem in der Planungsphase des Experimentes.
- Thomas Gleixner für die Auswertung der Daten, für die Zurverfügungstellung seines Auswertungsprogrammes und für die vielen Stunden, in denen ich ihn mit Fragen und Anregungen genervt habe oder er meine Arbeit Korrektur gelesen hat.
- Mykhaylo Filipenko für die Erstellung der Skizzen für die Bauteile.
- Ako Jamil für das Umprogrammieren des Auswertungsprogrammes.
- Karin Kritzler für die Hilfe bei der Beschaffung und Trocknung des Silica Gels.
- Meinen Zimmerkollegen für die angenehme Atmosphäre.
- Der Mechanischen Werkstatt für die hervorragende Arbeit bei der Anfertigung der Teile.
- Meiner Freundin Julia Backer für die Unterstützung während der Arbeit.
- Meiner gesamten Familie für ihre Unterstützung sowohl in der Zeit in der diese Arbeit entstanden ist als auch generell im Studium.

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen benützt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, wurden von mir unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt ebenso für Zeichnungen, Kartenskizzen und bildliche Darstellungen.

Erlangen, den 28.03.2014

Markus Pfaffinger