



Technische Universität München

---

# Messaufbau zur Charakterisierung von Silizium-Avalanche-Photodioden für das CALIFA-Kalorimeter

---

**Bachelorarbeit**  
von

**Thomas Stettner**

24. August 2012



LEHRSTUHL E12 FÜR  
EXPERIMENTALPHYSIK



## Zusammenfassung

Am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt entsteht zurzeit die neue Beschleunigereinrichtung FAIR, an der zahlreiche Experimente mit exotischen Kernen durchgeführt werden sollen. Der  $R^3B$ -Experimentieraufbau im Hochenergiezweig ist eine der wesentlichen Einrichtungen, die zur Untersuchung der Struktur und Dynamik exotischer Kerne entscheidend neue Erkenntnisse liefern wird. Das  $R^3B$ -Reaktionstarget wird vollständig von dem  $4\pi$ -Kalorimeter CALIFA umschlossen, welches aus ca. 3000 CsI(Tl)-Szintillationskristallen besteht, deren Lichtauslese mit aufgeklebten Avalanche Photodioden (APD) vorgenommen wird.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein möglichst universell einsetzbarer Aufbau zum Test dieser APDs entwickelt und aufgebaut. Mit diesem können verschiedene APD-Typen mit unterschiedlichen Bauformen, aber auch normale Photodioden (PD) mit unterschiedlichen Lichtquellen und Lichtmengen untersucht und charakterisiert werden. Außerdem ist der Testaufbau so konzipiert, dass eine Serienmessung zahlreicher APDs schnell und einfach möglich ist. Als Lichtquelle dienen verschiedene LEDs, deren Abstrahlverhalten genauer untersucht wurde. Da APDs eine starke Temperaturabhängigkeit in der Verstärkung aufweisen, wird über eine variable Sperrspannung die Verstärkung in der APD reguliert. Die Korrelation der beiden Variablen kann ebenso systematisch für verschiedene Sensoren durch eine Temperaturvariation des gesamten Aufbaus untersucht werden. Die Vorverstärkersignale wurden in allen Messungen voll digital verarbeitet. Die Digitalisierungseinheit FEBEX wandelt das Vorverstärkersignal in eine digitale Form um. Die weitere Datenverarbeitung wird danach im Computer innerhalb der Analyse-Software Go4 vorgenommen.

Mit dem Messaufbau wurde eine Vielzahl von Messungen durchgeführt. Die Messungen haben zum Ziel, eine korrekte Funktionsfähigkeit des Aufbaus zu überprüfen und wichtige Erkenntnisse zur Funktionsweise von Avalanche Photodioden zu gewinnen. Die geplante Serienmessung kann termingerecht Ende 2012 bei Lieferung der ersten APD-Serien beginnen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.1	FAIR .....	1
1.2	CALIFA .....	2
<b>2</b>	<b>Large Area Avalanche Photodioden – LAAPD</b> .....	<b>3</b>
2.1	Aufbau und Funktionsweise .....	4
2.2	Einflussfaktoren auf interne Verstärkung .....	6
2.2.1	Dotierung .....	6
2.2.2	Sperrspannung .....	7
2.2.3	Temperatur .....	7
<b>3</b>	<b>Der Testaufbau</b> .....	<b>8</b>
3.1	Anforderungen .....	8
3.2	Realisierung .....	9
3.3	Lichtquellen .....	11
3.4	Auslese-Elektronik .....	14
3.4.1	Der ladungssensitive Vorverstärker .....	14
3.4.2	Digitale Datenauslese .....	16
3.5	Gesamtüberblick über den Messaufbau .....	18
<b>4</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b> .....	<b>19</b>
4.1	Ladungskalibration .....	19
4.2	Reproduzierbarkeit .....	20
4.2.1	Pulsbreite .....	20
4.2.2	Dämpfung .....	21
4.2.3	Messposition .....	22
4.3	Abstrahlcharakteristiken der LEDs .....	23
4.3.1	grüne, eckige LED .....	23
4.3.2	grüne, runde LED .....	24
4.3.3	rote, runde LED .....	25
4.4	Raumintensität .....	26
4.5	Pulsbreitenmodulation .....	28
4.6	Vergleich PIN-Diode und APD .....	29
4.6.1	Messung mit grüner LED .....	30
4.6.2	Messung mit roter LED .....	30
4.6.3	Interpretation .....	31
4.7	Gainmessung .....	33
4.7.1	mit verschiedenen LEDs .....	33
4.7.2	Temperaturverhalten .....	35
4.8	Lokale Homogenität .....	36

<b>5</b>	<b>Fazit &amp; Ausblick</b> .....	<b>37</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>39</b>
	A    Liste der APDs.....	39
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>41</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>43</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>45</b>
	<b>Danksagung</b> .....	<b>47</b>

## Abkürzungsverzeichnis

CALIFA	<b>CAL</b> orimeter for <b>In-Flight</b> emitted <b>gAM</b> mas and light charged particles
R <sup>3</sup> B	<b>R</b> eactions with <b>R</b> elativistic <b>R</b> adioactive <b>B</b> eams
FAIR	<b>F</b> acility for <b>A</b> ntiproton and <b>I</b> on <b>R</b> esearch
ADC	Analog to <b>D</b> igital <b>C</b> onverter
LAAPD	<b>L</b> arge <b>A</b> rea <b>A</b> valanche <b>P</b> hoto <b>D</b> iode
FEBEX	<b>F</b> ront <b>E</b> nd <b>B</b> oard with optical link <b>E</b> xtension
PEXOR	<b>P</b> CI- <b>E</b> Xpress <b>O</b> ptical <b>R</b> eceiver
MBS	<b>M</b> ulti <b>B</b> ranch <b>S</b> ystem
MWD	<b>M</b> oving <b>W</b> indow <b>D</b> econvolution
MAU	<b>M</b> oving <b>A</b> verage <b>U</b> nit
LED	<b>L</b> ight <b>E</b> mitting <b>D</b> iode
DAQ	<b>D</b> ata <b>A</b> c <b>Q</b> uisition



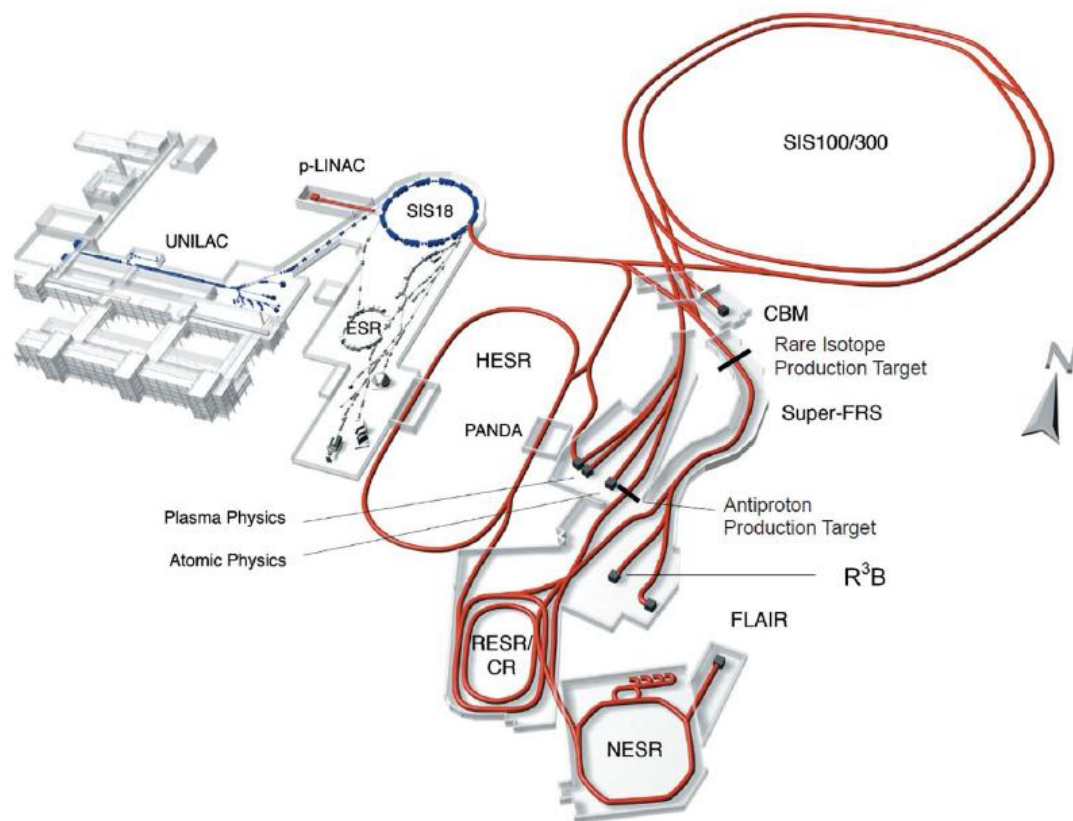


# 1 Einleitung und Motivation

Zur Untersuchung der Eigenschaften und Strukturen von Kernen weitab der Stabilität haben sich insbesondere Experimente mit hochenergetischen Sekundärstrahlen exotischer Kerne als sehr aussagekräftig erwiesen. Bereits existierende Beschleunigeranlagen können jedoch oftmals dem Anspruch an Energie und Strahlungsintensität nicht gerecht werden.

Die neue Beschleunigeranlage FAIR<sup>1</sup> am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH in Darmstadt soll diesen Ansprüchen gerecht werden und kann unter anderem Sekundärstrahlen exotischer Kerne mit Energien von bis zu 2 AGeV und Intensitäten, die mehrere Größenordnungen über denen bestehender Anlagen liegen, zur Verfügung stellen.

## 1.1 FAIR



**Abbildung 1:** Lageplan der bestehenden Beschleuniger UNILAC und SIS18 und dem Speicherring ESR (blau) und der neuen Beschleunigereinheit FAIR (rot) mit dem Doppelringbeschleuniger SIS 100/300. [FTR]

<sup>1</sup> Facility for Antiproton and Ion Research

Die im Bau befindliche Anlage FAIR (Abbildung 1) stellt eine Erweiterung der bisherigen Beschleunigeranlage der GSI dar. Die bereits vorhandenen Beschleuniger UNILAC und SIS 18 dienen als Vorbeschleuniger für den neuen Doppel-Synchrotron-Beschleuniger SIS 100/300. Der Doppelbeschleuniger besteht im Wesentlichen aus zwei Ringen mit magnetischen Steifigkeiten von 100 Tm und 300 Tm und hat einen Umfang von 1084 m. Die Erweiterung wird eine Erhöhung der Maximalenergie für Primärstrahlen um den Faktor 15 und eine Verbesserung der Intensität um den Faktor 100 zur Folge haben. Des Weiteren wurden neue innovative Strahlführungs- und Kühltechniken entwickelt, mit deren Hilfe eine hervorragende Strahlqualität erreicht werden kann.

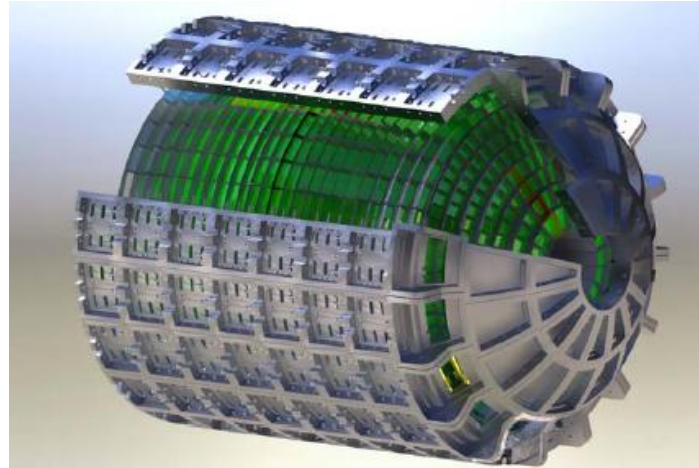
Im Anschluss an den SIS 100/300 befinden sich einige Speicherringe sowie eine Vielzahl an Experimentiereinrichtungen, wie beispielsweise das R<sup>3</sup>B-Experiment im Hochenergiezweig des Super Fragment Separators (Super-FRS). Hier wird die Struktur exotischer Kerne weitab der Stabilität in Reaktionen radioaktiver Sekundärstrahlen untersucht. Dabei ist die Besonderheit von R<sup>3</sup>B, dass alle Reaktionsprodukte und damit die vollständige Kinematik der Reaktion rekonstruiert werden kann. [FTR]

## 1.2 CALIFA

Bestandteil des R<sup>3</sup>B-Experimentes ist CALIFA<sup>2</sup> (Abbildung 2). CALIFA ist ein  $4\pi$ -Kalorimeter und umschließt die gesamte Targetregion des R<sup>3</sup>B-Experiments. Das Besondere an diesem Kalorimeter ist seine hohe Segmentierung und der große dynamische Energiebereich. Das Ziel ist es sowohl niederenergetische  $\gamma$ -Quanten mit Energien von einigen 10 keV als auch geladene Teilchen mit Energien bis zu 300 MeV zu detektieren. Zu beachten ist, dass bei den hohen Projektilenergien von bis zu 700 AMeV der relativistische Doppler-Effekt, der sich negativ auf die Energieauflösung auswirkt, nicht mehr vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund besteht das CALIFA aus ca. 3000 einzelnen Szintillatorkristallen, da durch die hohe Segmentierung die Emissionswinkel von Teilchen und  $\gamma$ s aus dem Target besser rekonstruiert werden können und somit eine präzise Doppler-Korrektur ermöglicht wird. [DPG]

---

<sup>2</sup> CALorimeter for In-Flight emitted gAmmas and light charged particles



**Abbildung 2:** CALIFA-Kalorimeter mit Haltestruktur [DPG]

Die Auslese des Szintillationslichts ist entweder über Photomultiplier oder LAAPDs<sup>3</sup> möglich. Da jedoch in der Nähe des R<sup>3</sup>B-Targets ein starkes, nur schwer abschirmbares Magnetfeld herrscht, welches die Funktionalität von Photomultipliern stark beeinträchtigen würde, fällt die Wahl auf Avalanche-Photodioden, welche im Rahmen dieser Bachelorarbeit nun genauer untersucht werden sollen.

## 2 Large Area Avalanche Photodioden – LAAPD

In einer Photodiode werden durch einfallende Photonen Elektron-Loch-Paare erzeugt, die anschließend in der Raumladungszone getrennt werden. Die Effizienz des Trennvorgangs kann durch Anlegen einer externen Spannung erhöht werden, da durch die Spannung die Verarmungszone vergrößert wird. Man erhält einen Photostrom, der proportional zur Anzahl der einfallenden Photonen ist.

Eine Avalanche Photodiode (APD) basiert auf diesem Prinzip, nutzt jedoch zusätzlich den Lawineneffekt, der zu einer Verstärkung des Photostromsignals führt. Durch das hohe elektrische Feld am pn-Übergang nehmen die Elektronen so viel Energie auf, dass sie durch Stöße weitere Ladungsträger generieren können. Je nach angelegter Spannung erreichen APDs Verstärkungen von typischerweise  $g = 10 - 200$ .

Für CALIFA sind LAAPDs vom japanischen Hersteller Hamamatsu vorgesehen, jedoch arbeitet die Firma Laser Components<sup>4</sup> in Kooperation mit dem Lehrstuhl E12 an einer neuen Version, bei der erstmals eine Fläche von  $10 \times 20 \text{ mm}^2$  von einer einzigen Diode abgedeckt wird. Die aktuellste Variante wurde im Rahmen dieser Bachelorarbeit ebenfalls vermessen, der Großteil der Messungen konzentrierte sich jedoch auf die APD *S8664-1010* von Hamamatsu.

---

<sup>3</sup> Large Area Avalanche PhotoDiode

<sup>4</sup> Laser Components GmbH, 82140 Olching, Deutschland

## 2.1 Aufbau und Funktionsweise

Avalanche Photodiodes sind aus mehreren dünnen, stark unterschiedlich dotierten Silizium-Schichten aufgebaut. Sie lassen sich in zwei Kategorien unterteilen:

- *Reverse Type*: p-dotierter Frontkontakt mit *Avalanche-Zone* sehr nahe am Eintrittsfenster (Abbildung 3)
- *Reach Through*: p-dotierter Frontkontakt, die Driftzone befindet sich hier zwischen Konversionszone und Avalanche-Zone (Abbildung 4)

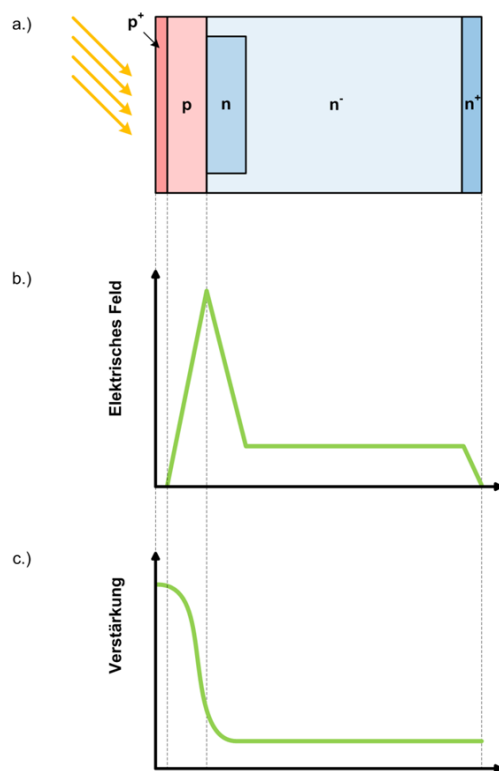


Abbildung 3: *Reverse-Type* LAAPD  
nach [KSK]

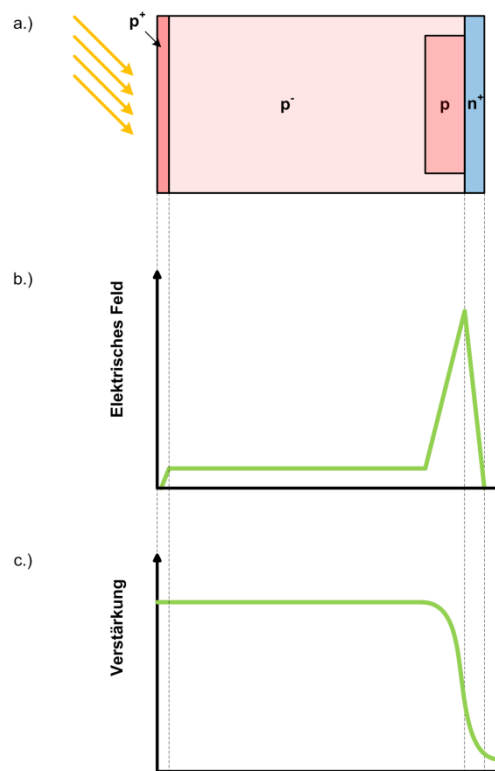
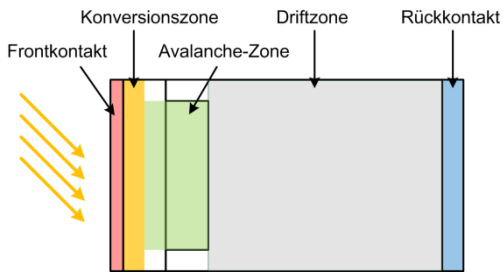
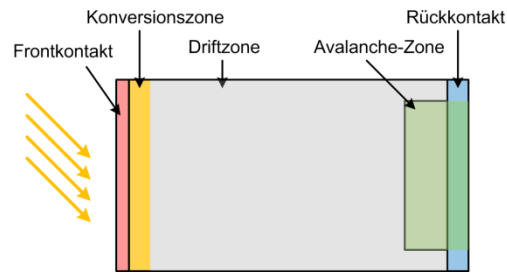


Abbildung 4: *Reach-Through* LAAPD  
nach [KSK]

Die APD *S8664-1010* von Hamamatsu ist vom strukturellen Aufbau eine Reverse-Type LAAPD (Abbildung 3). Um eine möglichst niederohmige Verbindung zur Spannungsversorgung des Vorverstärkers herzustellen, wurde der *Frontkontakt* sehr stark p-dotiert ( $p^+$ ). Die Dicke der  $p^+$ -Schicht beträgt typischerweise einige 100 nm. Es ist einerseits wünschenswert die Schichtdicke möglichst dünn zu machen um zu gewährleisten, dass die einfallenden Photonen möglichst ungehindert passieren können, andererseits soll der Kontaktwiderstand möglichst gering sein. Dies erfordert demnach eine gewisse Mindesttiefe der Schicht.



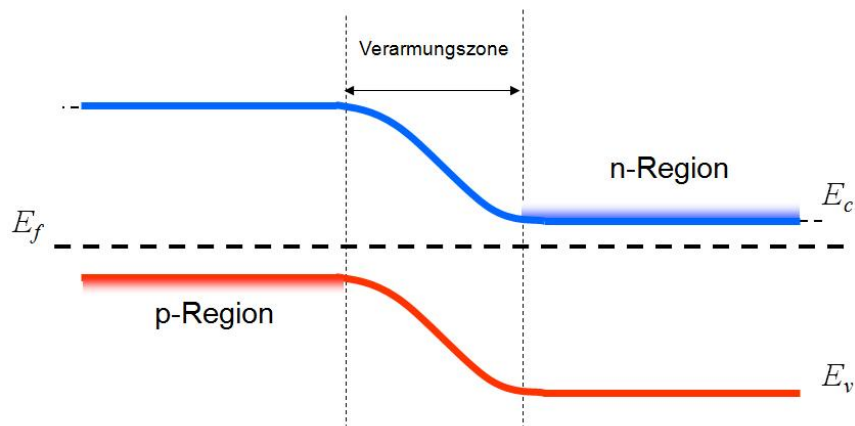
**Abbildung 5:** Zonen einer *Reverse-Type* APD  
Die Ladungsträgerdiffusion führt zur Ausbildung der Verarmungszone, es bleibt jedoch eine Minimalleitfähigkeit [BEN]



**Abbildung 6:** Zonen einer *Reach-Through* APD  
Die Verarmungszone wird unmittelbar am Rückkontakt gebildet [BEN]

Zu Beginn der folgenden p-Schicht liegt die sog. *Konversionszone* (Abbildung 5). In ihr werden die Elektron-Loch-Paare durch einfallende Photonen erzeugt. Mit zunehmender Breite der Zone steigt zwar auch die Nachweiseffizienz, jedoch entstehen auch mehr thermisch angeregte Ladungsträger. Es gilt einen Kompromiss zu finden zwischen guter Nachweiseffizienz und Signal-zu-Rausch-Verhältnis.

Die *Avalanche-Zone* wird durch den pn-Übergang gebildet. An der Grenzfläche des pn-Übergangs entsteht eine Verarmungszone, da Ladungsträger in den jeweils anderen Bereich diffundieren und anschließend rekombinieren. Die Diffusion führt zu einer Angleichung der Fermi-niveaus und somit zu einer Verbiegung des Valenz- und Leitungsbandes (Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Bandstruktur des pn-Übergangs, in der Mitte entsteht die Verarmungszone [FIN]

Eine in Sperrrichtung angeschlossene Spannung vergrößert die Verarmungszone idealerweise bis zum Frontkontakt. Sind nun in der Konversionszone durch einfallende Photonen Elektronen-Loch-Paare entstanden, werden diese durch das Gefälle in der Verarmungszone getrennt und in den jeweils anders dotierten Bereich beschleunigt. Dabei können die Ladungsträger durch Stöße noch mehr Ladungsträgerpaare erzeugen. Dieser *Lawineneffekt* führt zu einer Verstärkung des Ladungssignals, die direkt proportional zur Zahl der absorbierten Photonen ist.

Auf den pn-Übergang folgt die *Driftzone*, welche nur schwach n-dotiert ist. Durch diese Zone driften die Elektronen zum *Rückkontakt*. Auch hier ist ein niedriger Übergangswiderstand zum Metallkontakt der Kathode erwünscht, weshalb der Rückkontakt sehr stark n-dotiert ist.

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der *S8664-1010* um eine Reverse-Type APD. Der größte Vorteil gegenüber einer Reach-Through APD liegt im besonders kleinen Leckstrom, von nur wenigen nA, auch bei hohen Verstärkungen. Um den Unterschied verstehen zu können, muss man den Einfluss thermisch erzeugter Ladungsträger betrachten. Bei einer Reach-Through APD liegt die Verstärkungszone hinter der Driftzone (Abbildung 4b, c) was bedeutet, dass alle negativen Ladungsträger, ob thermisch erzeugt oder durch Photonenabsorption, gleichermaßen verstärkt werden. Im Gegensatz dazu findet in einer Reverse-Type APD die Verstärkung bereits vor der Driftzone statt (Abbildung 3b, c). Es werden also nur die thermisch angeregten negativen Ladungsträger verstärkt, die in der Konversionszone entstanden sind. Da diese aber nur einige  $\mu\text{m}$  breit ist, ist die Anzahl verhältnismäßig gering. In der Driftzone zufällig erzeugte Elektronen können demnach keinen Lawineneffekt ausbilden. Löcher, die zur Anode fließen, werden zwar beschleunigt, jedoch ist deren Beitrag zur Verstärkung verschwindend gering. Die Mobilität der Löcher ist aufgrund der höheren effektiven Masse deutlich geringer als die der Elektronen. [BEN; KSK]

## 2.2 Einflussfaktoren auf interne Verstärkung

Für die zuverlässige Auswertung wissenschaftlicher Experimente ist eine korrekte Bewertung von Einflüssen auf den Versuchsaufbau sehr wichtig. Bei LAAPDs ist die Stabilität der internen Verstärkung von besonderem Interesse. Hier spielt als innerer Einfluss das Dotierungsprofil sowie als äußere die Sperrspannung und Temperatur eine wesentliche Rolle.

### 2.2.1 Dotierung

Wie in Abbildung 3b, c zu sehen ist, findet die Verstärkung in den Bereichen statt, die eine hohe Dotierung aufweisen. Dies stellt eine besondere Herausforderung bei der Herstellung von APDs dar, da der E-Feldgradient, der durch den pn-Übergang gebildet wird, sehr stark von der Dotierung abhängt. Weicht nun die Dotierung innerhalb einer Fertigungsserie nur minimal ab, so ändert dies den Feldgradient und somit die Verstärkung. Man kann demnach nicht von einem gleichen Verstärkungsfaktor innerhalb einer Fertigungsserie ausgehen, sondern muss jede APD zunächst kalibrieren. Außerdem ist entscheidend, dass die Dotierung über die gesamte aktive Fläche möglichst konstant ist um keine weiteren Faktoren zur statistischen Signalverbreiterung einzuführen.

### 2.2.2 Sperrspannung

Die Ursache für die Abhängigkeit der internen Verstärkung von der angelegten Sperrspannung ist in Abbildung 7 zu sehen: Je höher die Sperrspannung ist, desto breiter ist die Avalanche-Zone und somit die Verstärkungslänge. Dadurch können mehr Verstärkungszyklen durchlaufen werden. Die Verstärkung nimmt mit steigender Spannung zu. Mathematisch lässt sich dieses Verhalten wie folgt ausdrücken:

$$\frac{dM}{dU} > 0 \quad (1)$$

Hierbei ist M die interne Verstärkung und U die angelegte Sperrspannung. Messungen im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden auf dieses Verhalten genauer eingehen.

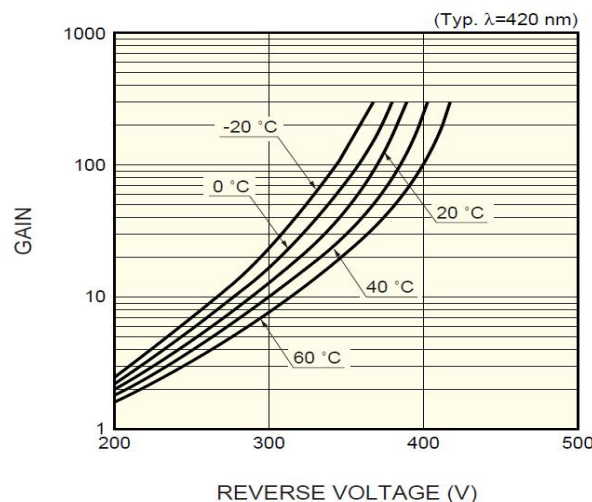
### 2.2.3 Temperatur

Der Einfluss der Temperatur auf die interne Verstärkung einer LAAPD lässt sich am einfachsten durch die Phononenkopplung beschreiben. Während der Drift der Elektronen durch die Driftzone, kommt es zu Wechselwirkungen mit Phononen im Halbleitermaterial. Mit steigender Temperatur nimmt die Anzahl der Phononen zu. Man erwartet demnach eine Verringerung der Verstärkung, da die mittlere freie Weglänge in der Verstärkungszone abnimmt:

$$\frac{dM}{dT} < 0 \quad (2)$$

Wobei M der Verstärkung und T der Temperatur entspricht.

Der japanische Hersteller Hamamatsu hat im Datenblatt zur *S8664-1010* (Abbildung 8) den gemessenen Verlauf beider Abhängigkeiten dargestellt. Ein sehr ähnliches Verhalten wurde in den Messreihen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden (siehe Abschnitt 4.7.2), bestätigt.



**Abbildung 8:** Verstärkung der S8664-1010 APD in Abhängigkeit von Spannung und Temperatur [HAM]

## 3 Der Testaufbau

In diesem Kapitel wird der experimentelle Testaufbau genauer vorgestellt. Zunächst werden die Anforderungen an den Aufbau erläutert. Die darauf folgenden Abschnitte befassen sich mit der mechanischen und elektrischen Umsetzung.

### 3.1 Anforderungen

Um ein breites Spektrum an verschiedenen Messungen abdecken zu können, soll der Testaufbau möglichst universell realisiert werden. Die Reproduzierbarkeit jeder einzelnen Messung ist für wissenschaftliches Analysieren eine notwendige Voraussetzung. Des Weiteren muss eine unabhängige Variation zahlreicher Parameter, wie beispielsweise Spannung, Temperatur oder Lichtmenge, gewährleistet sein. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnt wurde, ist die Verstärkung einer APD stark dotierungsabhängig. Da in CALIFA immer 32 APDs in sog. Gain- bzw. Temperaturgruppen verbaut und gemeinsam ausgelesen werden, ist es erstrebenswert dort APDs mit möglichst gleicher Gainkurve und Effizienz zu verwenden. Hinzu kommt, dass jede einzelne APD vor dem Einbau in CALIFA vermessen werden muss, da die APDs auf die Kristalle aufgeklebt werden und somit nicht mehr kristallunabhängig vermessen werden können. Dies erfordert eine schnelle und unkomplizierte Möglichkeit der Serienmessung, wobei hohe Stückzahlen in kurzer Zeit charakterisiert werden können. Zu den bereits genannten Anforderungen kommen noch folgende hinzu:

- **Eliminierung von äußeren Einflüssen:** Um Messungen möglichst unabhängig von äußeren Einflüssen wie elektrische oder magnetische Felder, Temperaturschwankungen sowie Umgebungslicht durchführen zu können, müssen Detektor, Lichtquelle und Temperatursensor hermetisch von der Umgebung abgeschlossen sein. Außerdem muss die Lichtquelle und deren Zuleitungen elektrisch vollständig abgeschirmt werden, um ein Signalübersprechen zu verhindern.
- **Verschiedene Quellen:** Das für die Messungen notwendige Licht soll von verschiedenen Quellen zur Verfügung gestellt werden können.
- **Geringer Reflexionsgrad:** Das Licht muss möglichst direkt und nicht über schwer kalkulierbare und zeitlich veränderliche Reflexionen an den Innenseiten des Messgehäuses auf die APDs treffen.
- **Verschiedene APDs:** Es wird gefordert, Messungen mit APDs verschiedener Hersteller sowie Größe durchführen zu können.
- **Variable Abstände:** Um die Lichtmenge, die auf die APD fällt bei sonst konstanten Parametern variieren zu können, soll der Abstand der APD zur Lichtquelle variabel sein.



- **Temperaturmessung:** Wie bereits in Kapitel 2.2.3 erwähnt wurde, ist die Verstärkung von APDs stark temperaturabhängig. Deshalb muss eine Temperaturmessung im Inneren des Messgehäuses möglich sein.
- **Heizen:** Die Messungen können durch Aufheizen und Abkühlen des Messgehäuses bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt werden.
- **Simultanes Messen:** Das gleichzeitige Auslesen von bis zu 8 Kanälen unterstützt zum einen die Forderung der Serienmessung, zum anderen lassen sich sehr schnell Abstrahlcharakteristiken und Abstandsmessungen durchführen.
- **Digitale Datenausgabe:** Der verwendete ladungssensitive Vorverstärker gibt ein analoges Signal aus (siehe Kapitel 3.4.1). Dieses wird digitalisiert und dann mit geeigneter Software analysiert. Ein Vorzug der Digitalisierung liegt darin, dass die Rohdaten der Messungen dauerhaft abgespeichert werden können. Dies ermöglicht bei Bedarf später eine erneute Untersuchung, mit ggf. angepassten Parametern.

## 3.2 Realisierung

Eine der wesentlichen Forderungen war die Abschottung von äußeren Einflüssen. Dies wird durch ein hermetisch abgeschlossenes massives Aluminiumgehäuse erreicht (siehe Abbildung 9). Durch die eingefasste Dichtung im Deckel kann sichergestellt werden, dass kein Licht von außen in das Gehäuse eindringt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass der Anschluss der LED mit geschirmten Zuleitungen erfolgt, sowie die gesamte Lichtquelle durch eine Metalldose abgeschirmt ist. In ihr lassen sich verschiedene LEDs als Lichtquelle verwenden, es ist jedoch auch möglich, die Dose durch eine radioaktive Quelle mit anschließendem Szintillationskristall zu verwenden. Um Reflexionen im Inneren des Gehäuses zu vermeiden, wurde die gesamte Box sowie die Lichtquellendose mit matter schwarzer Farbe bestrichen. Außerdem wurde die Grundträgerplatine mit einer ebenfalls matten schwarzen Folie überzogen. Ein weiterer, wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit einer schnellen und effizienten Serienmessung hoher Stückzahlen. Aus diesem Grund werden die APDs einfach mittels Steckkontakte auf ihre Trägerplatinen gesteckt. Die Trägerplatinen werden wiederum mit 3-Pin-Steckern an den gewünschten Ort auf die Grundplatine gesteckt. Für jeden APD-Typ gibt es eine eigens entwickelte Trägerplatine. Somit können APDs verschiedener Größen und Hersteller getestet werden.

Die Grundträgerplatine (Abbildung 10) besteht aus vier konzentrisch angeordneten Halbkreisen. Dadurch ist es möglich, die Intensität in Abhängigkeit vom Abstand der APD zur Lichtquelle zu messen. Im Platinenlayout sind die Leiterbahnen zu sehen und man erkennt, dass im ersten Ring 8 Kanäle und in den Ringen 2 bis 4 jeweils 4 Kanäle unabhängig voneinander ausgelesen werden können. Dadurch ist ein simultanes Messen

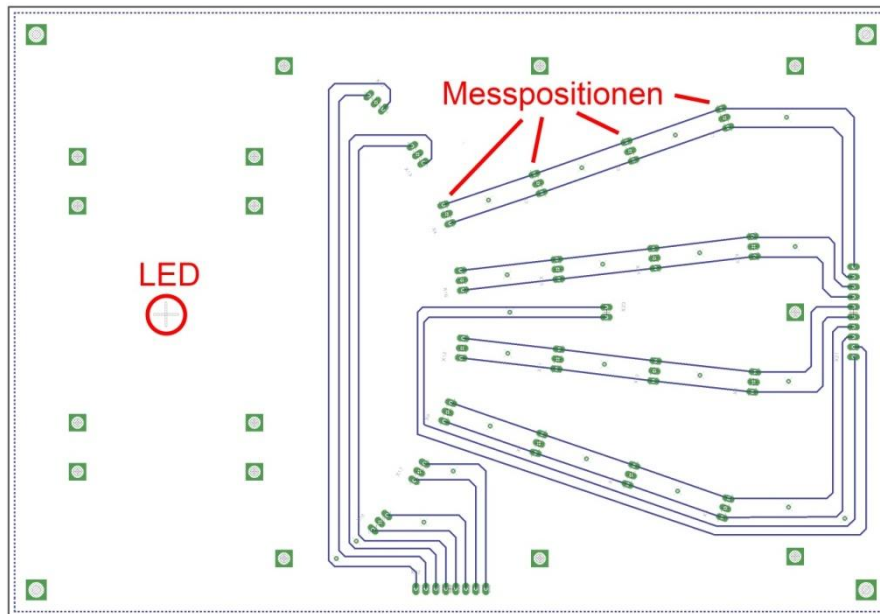
von bis zu 8 APDs möglich. Des Weiteren ist auf der Platine ein Temperatursensor<sup>5</sup> angebracht, mit dem jederzeit die Temperatur im Inneren des Messgehäuses bestimmt werden kann. Um Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen durchführen zu können, kann die gesamte Messeinheit mit einer Heizplatte auf die gewünschte Temperatur aufgewärmt werden. Die Umsetzung der digitalen Datenanalyse wird in Kapitel 3.4.2 genauer besprochen.



**Abbildung 9:** Das Messgehäuse aus massivem Aluminium mit Abschirmdose für die LED

---

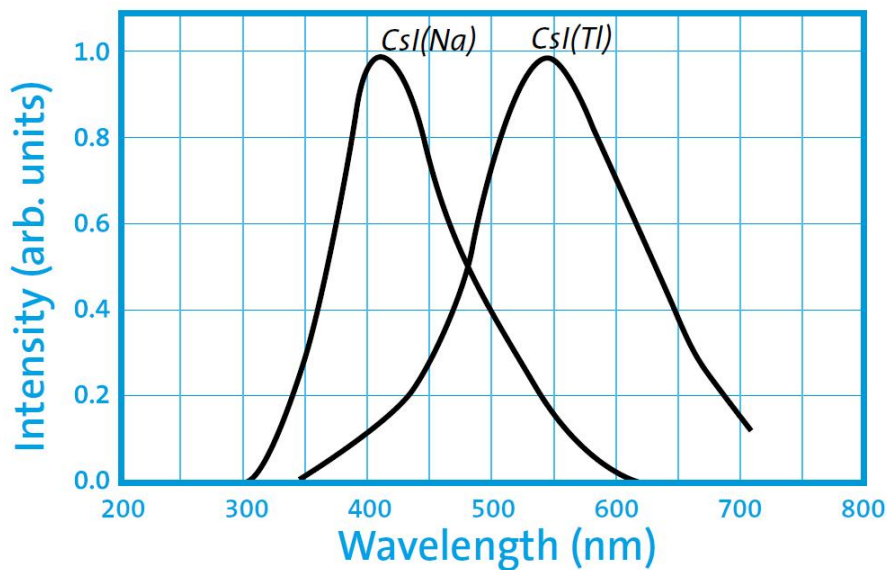
<sup>5</sup> NTC Thermistor, Epcos B57861-S502-F40 [MPRB]



**Abbildung 10:** Layout der Grundträgerplatte. Die Messpositionen sind konzentrisch im Abstand von 75 mm, 100 mm, 125 mm und 150 mm zur LED angeordnet.

### 3.3 Lichtquellen




Die Wahl des Szintillationsmaterials für das CALIFA-Kalorimeter fiel besonders aufgrund der guten Lichtausbeute und Energieauflösung und einem akzeptablen Preis auf CsI(Tl). Dieser Kristall zeigt eine breite Lichtemission im sichtbaren Bereich zwischen 400 und 700 nm mit einem ausgeprägten Maximum im grünen Wellenlängenspektrum um 550 nm (Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Emissionsspektrum eines CsI-Kristalls mit Natrium- bzw. Thallium-Dotierung [SGPC]

Eine Möglichkeit, das Szintillationslicht zu simulieren stellt die Verwendung einer LED dar. LEDs eignen sich aufgrund ihrer geringen Wärmeabgabe und ihrer relativ homogenen und schmalbandigen Lichtabgabe hervorragend für diesen Zweck.

Bei den Messungen werden drei verschiedene LEDs verwendet:

Form und Farbe der LED	Maximum der Abstrahlintensität	
rechteckig, grün	575 nm	
rund, grün	565 nm	
rund, rot	630 nm	

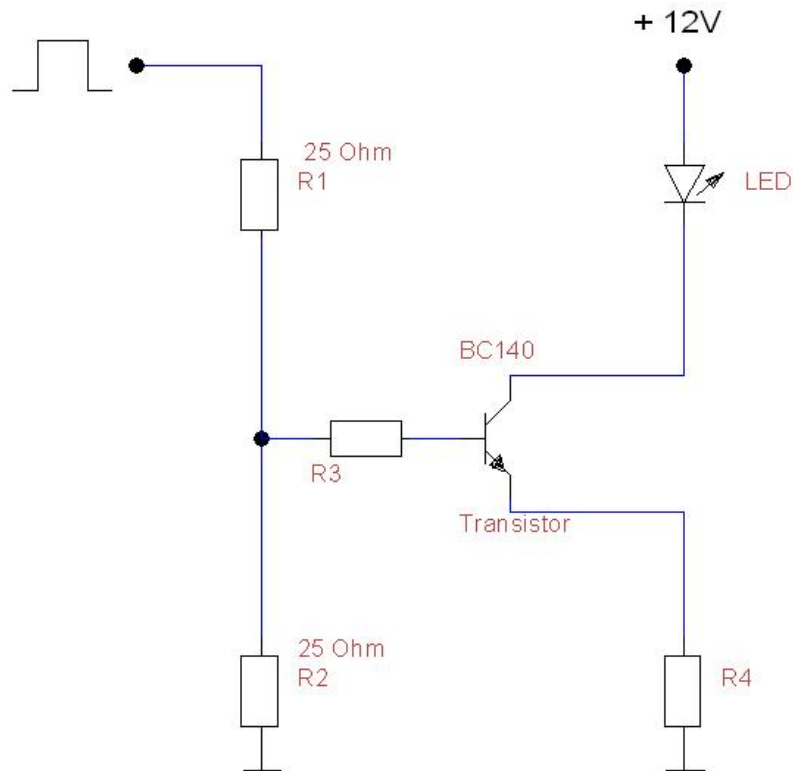
**Tabelle 1:** Verwendete LED-Typen

Alle drei verwendeten LEDs haben einen maximalen Durchlassstrom von 20 mA. Um die einzelnen Lichtimpulse aus dem Kristall zu simulieren, wird die LED mit einem *Pulsgenerator* angesteuert. Als Pulser wird ein Dual Gate Generator<sup>6</sup> verwendet. Mit ihm lassen sich Impulsdauern ab etwa 100 ns bei nahezu beliebigen Pausendauern einstellen. Der Puls wird als TTL-Signal ausgegeben.

Um eine über den Puls möglichst konstante Lichtemission der LED zu gewährleisten, wird sie mit einer Konstantstromschaltung betrieben, die auch im Rahmen dieser Bachelorarbeit aufgebaut wurde (Abbildung 12).

Die Notwendigkeit dieser Schaltung liegt an der Funktionsweise der LEDs. Leuchtdioden sind im Wesentlichen Halbleiterdioden, also ein einfacher pn-Übergang. Wird daran eine Spannung in Flussrichtung angelegt, so wandern die Elektronen zunächst zur Rekombinationsschicht am pn-Übergang. Sie bevölkern auf der n-dotierten Seite das Leitungsband, um nach Überschreiten der Grenzfläche auf das energetisch günstigere Valenzband (p-dotiert) zu wechseln. Sie rekombinieren dort mit den zahlreich vorhandenen Löchern unter Lichtemission. Damit ist die Zahl der emittierten Photonen zunächst proportional zum Strom durch die LED.

<sup>6</sup> Modell 222 von der Firma LeCroy



**Abbildung 12:** Konstantstromschaltung für die LED

Das Herzstück der Schaltung ist ein NPN Transistor BC-140. Der Spannungsteiler am Eingang besteht aus den zwei  $25\ \Omega$  Widerständen R1 und R2, um eine Terminierung von  $50\ \Omega$  für das Eingangssignal zu erreichen und Reflexionen zu vermeiden. Das Signal des Pulsgenerators wird nun an den Spannungsteilereingang gelegt. Ist gerade eine Impulspause im Signal, so sperrt der Transistor, es kann kein Strom im Kollektor-Emitterzweig und damit durch die LED fließen. Kommt ein Puls, so schaltet der Transistor durch, die LED leuchtet. Die Höhe des Stroms, der dabei durch die LED fließt, kann über den Emitterwiderstand R4 reguliert werden. Der Widerstand R3 reduziert die Rückkopplung der Emitterspannung auf das Eingangssignal.

Im ersten Moment benötigt die LED kurzzeitig mehr Spannung, da zunächst die Rekombinationsschicht mit Elektronen überflutet werden muss. Durch mehr Strom fällt danach aber auch mehr Spannung am Emitterwiderstand ab, wodurch das Emitterpotential angehoben wird. Die Basis-Emitterspannung sinkt, der Transistor reduziert den Emitterstrom und es stellt sich ein durch den Emitterwiderstand regelbarer Konstantstrom für die Dauer des Impulses ein.

Um die Helligkeit der LED schnell und effektiv zu regeln, wird das TTL-Pulssignal mit einem schaltbaren Dämpfungsglied abgeschwächt. Das Dämpfungsglied wird zwischen Pulser und Spannungsteiler geschaltet und bewirkt bei eingestellter Dämpfung, dass der resultierende LED-Strom verringert wird. Der Kollektorstrom ist somit eine Funktion der Basis-Emitterspannung.

### 3.4 Auslese-Elektronik

Um die Ladungsmenge aus dem Signal der APDs extrahieren zu können, muss das Stromsignal weiterverarbeitet werden. Die Datenauslese umfasst dabei die Signalwandlung im Vorverstärker, Digitalisierung und anschließende Signalverarbeitung. Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln genauer erörtert.

#### 3.4.1 Der ladungssensitive Vorverstärker

Vorverstärker werden immer dann benötigt, wenn das eigentliche Detektorsignal für die direkte Weiterverarbeitung zu schwach ist. Eine gute Verstärkung erzielt man dann, wenn dem Signal möglichst wenig zusätzliches Rauschen hinzugefügt wird. APDs haben bedingt durch ihre Fläche und die relativ dünne Verarmungszone eine Kapazität von einigen hundert pF. Außerdem soll in der kalorimetrischen Anwendung die Ladungsmenge, die proportional zur einfallenden Lichtmenge ist, gemessen werden. Für die Verstärkung dieses Signals bietet sich daher ein ladungssensitiver Vorverstärker an. Technisch realisiert wird ein Vorverstärker im Wesentlichen durch einen Transistorverstärker mit Kondensator C3 zur Integration der Ladung, sowie einem ohmschen Widerstand R3 für die Entladung des Kondensators (Abbildung 13). Der Kondensator C2 dient zur AC-Einkopplung des Signals auf den Verstärker und der Widerstand R2 verhindert, dass die zeitabhängigen Komponenten des Signals an die Spannungsversorgung abgeleitet werden.

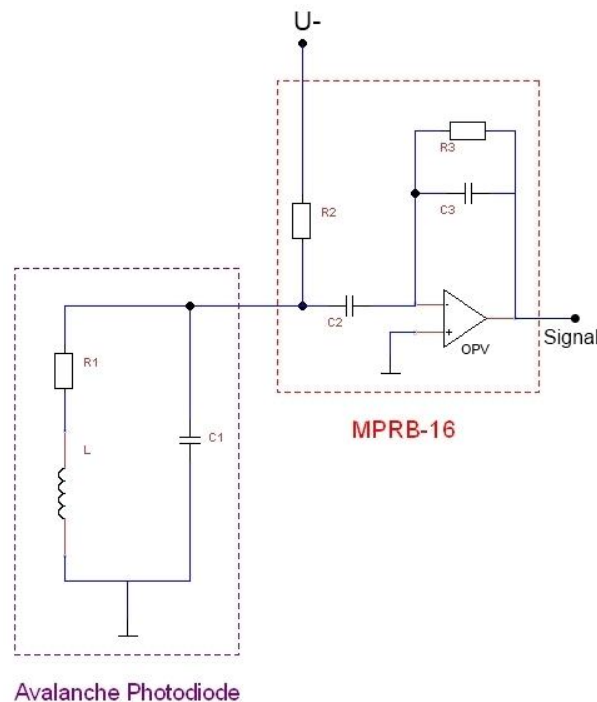
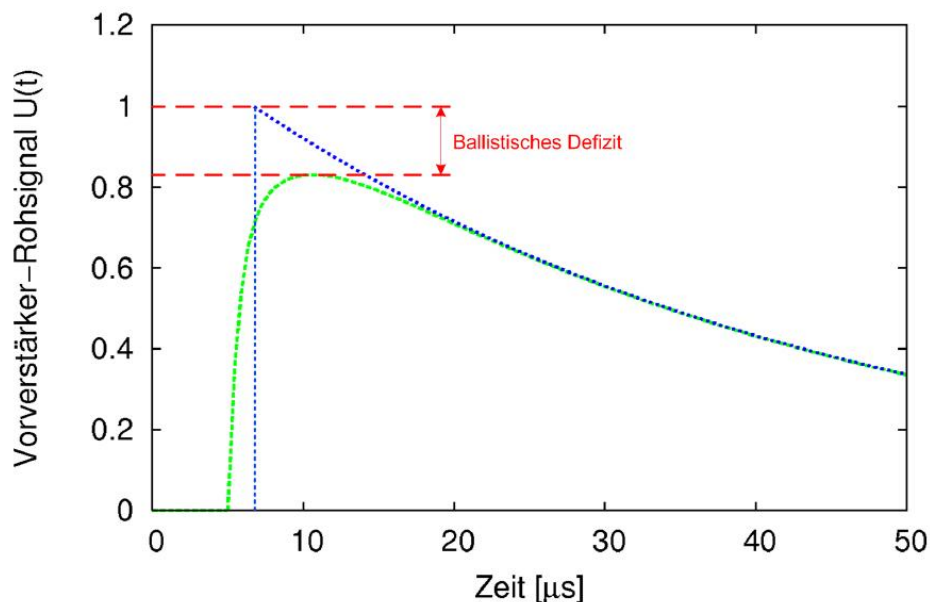


Abbildung 13: Ladungssensitiver Vorverstärker mit angeschlossener APD

Der Photostrom lädt den Kondensator auf, welcher sich über den Rückkopplungswiderstand wieder entlädt. Die Entladezeit ist über die sog. *Abklingzeit*  $\tau = R \cdot C$  bestimmt. Mathematisch betrachtet handelt es sich hierbei um eine *Faltung* der zeitabhängigen Stromfunktion mit einer Exponentialfunktion. Diese Methode bringt jedoch ein Problem mit sich: Für hohe Zählraten führt die exponentielle Entladung des Kondensators zu sog. *Pileup-Effekten*. Darunter versteht man eine Überlagerung der Exponentialfunktionen des nachfolgenden Ereignisses mit dem vorherigen, was insgesamt zu einer Signal-erhöhung und somit zu einer Ratenbegrenzung führt.

Eine weitere Verschlechterung der Energieauflösung stellt das sog. *Ballistische Defizit* dar. Da der Ladevorgang des Kondensators zeitlich nicht instantan erfolgt, findet während des Aufladens gleichzeitig bereits der Entladevorgang über den Parallelwiderstand statt. Dies hat zur Folge, dass nie die volle Pulshöhe ermittelt werden kann. Mit zunehmender Ladungssammelzeit und Absoluthöhe des Signals wächst demnach das Ballistische Defizit.

Abbildung 14 zeigt qualitativ die Vorverstärkersignale eines idealen (blau) und realen CsI(Tl)-Detektors (grün). Integriert man die Kurven, so erhält man die Ladung des jeweiligen Events. Die Fläche ist unabhängig von der Ladungssammelzeit und somit in beiden Fällen gleich groß. [BEN]



**Abbildung 14:** Die Differenz zwischen den Peakhöhen einer realen Vorverstärkerfunktion (grün) und der idealen Funktion (blau), mit gleicher Energiedeposition, ist das *Ballistische Defizit*. [BEN]

Die gerade beschriebenen Aufgaben übernimmt im Versuchsaufbau der MPRB-16, der Firma Mesytec (Abbildung 15), der speziell für das CALIFA-Projekt entwickelt wurde.



Beim MPRB-16 handelt es sich um einen 16-Kanal Vorverstärker mit einstellbarer, temperaturstabilisierter Spannungsversorgung bis zu 600 V. Die hier verwendete Version 2 hat einen dynamischen Bereich von 3 pC bzw. 30 pC.



Abbildung 15: Vorverstärker MPRB-16 von Mesytec

### 3.4.2 Digitale Datenauslese

Im Anschluss an den ladungssensitiven Vorverstärker befindet sich die Digitalisierungseinheit FEBEX<sup>7</sup>. Auf ihr befinden sich zwei ADC<sup>8</sup>-Bausteine mit je 8 Eingangskanälen, 14 Bit Auflösung und 50 MHz Samplingrate, die das integrierte Ladungssignal direkt aus dem Vorverstärker digitalisieren. Um die Daten an einen Standard-PC zu übertragen, wird eine PEXOR<sup>9</sup>-Karte verwendet. Hierbei handelt es sich um eine speziell entwickelte PCI-Express-Karte, die als Schnittstelle zwischen Front-End-Karten und Standard-PCs fungiert. Die Datenerfassung übernimmt das Multi Branch System (MBS) der GSI. Jedes Mal, wenn der Pulser einen Lichtpuls generiert, wird dieser auch an das DAQ<sup>10</sup>-System als sogenannter Trigger weitergegeben. Dadurch wird in einem einstellbaren Zeitfenster der Signalverlauf ähnlich wie bei einem Oszilloskop digitalisiert und gespeichert (siehe Abbildung 16, oben links). Die weitere Datenverarbeitung findet danach im Computer innerhalb der Analyse-Software *Go4* statt.

*Go4* arbeitet bei der Pulsformanalyse der übermittelten Vorverstärker-Rohdaten mit einer Vielzahl an Algorithmen, zwei davon werden im Folgenden kurz beschrieben:

<sup>7</sup> Front End Board with optical link EXTension

<sup>8</sup> Analog Digital Converter

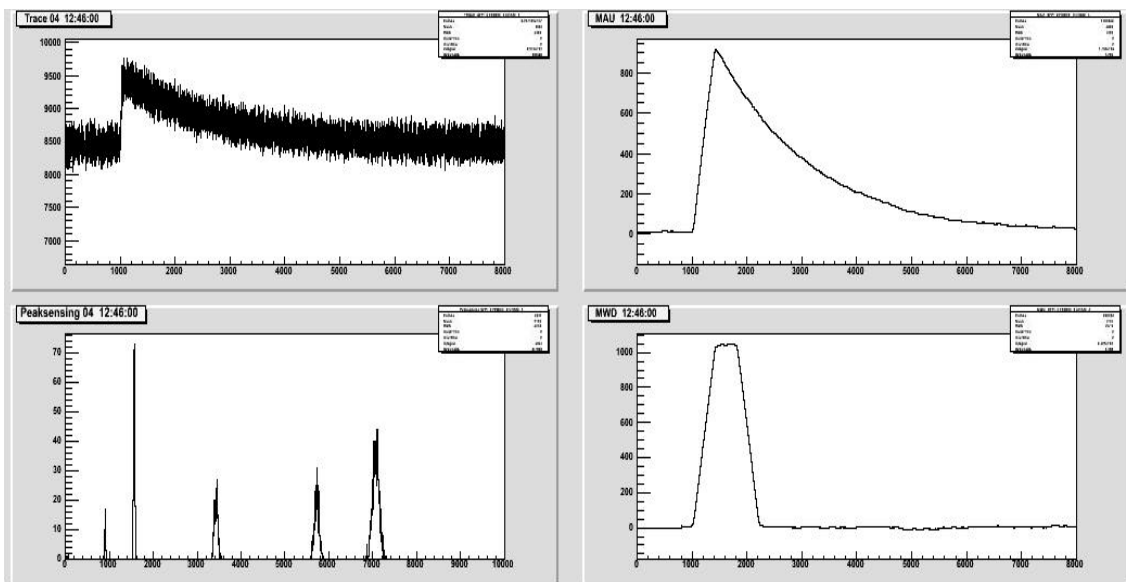
<sup>9</sup> PCI-EXpress Optical Receiver

<sup>10</sup> Data AcQuisition



- **Moving Average Unit - MAU:** Bei der einfachen Mittelwertbildung wird die Annahme gemacht, dass das Rauschen Poisson verteilt ist. Durch die Bildung eines fließenden Mittelwerts kann insbesondere der hochfrequente Rauschanteil deutlich reduziert werden und somit das Signal-zu-Rauschverhältnis verbessert werden.
- **Moving Window Deconvolution – MWD:** Ziel dieses Algorithmus ist die Rekonstruktion der ursprünglichen integrierten Ladungsfunktion aus dem Vorverstärkersignal. Dabei wird mit Hilfe der MWD der langsame, exponentielle Abfall des Vorverstärker-Signals herausgefaltet. Da bei der MWD Summen über Signalwerte gebildet werden, verschlechtert sich das Signal-zu-Rauschverhältnis. [BEN]

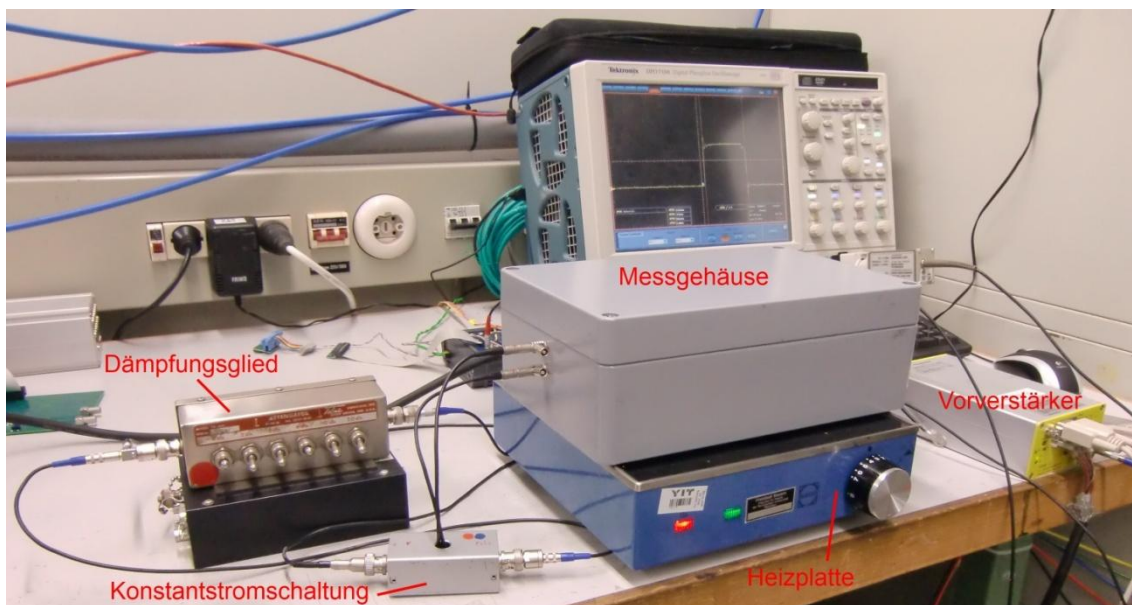
Abbildung 16 zeigt wesentliche Spektren mit dem Analysetool Go4. In der Abbildung oben links ist das Vorverstärker-Rohsignal (*Trace*) dargestellt. Rechts daneben das bereits gemittelte Signal (*MAU*). Das Bild unten links zeigt an, bei welchen Kanälen Intensitätspeaks ermittelt wurden (sog. *Peaksensing*). Diese Peaks können anschließend zur weiteren Analyse mit einer Gauß-Funktion gefittet werden. Unten rechts ist das *MWD*-Signal dargestellt. Hierfür müssen die Parameter so eingestellt werden, dass der waagrechte Anteil des Signals möglichst geradlinig verläuft.



**Abbildung 16:** Messung im Go4: Bild oben links zeigt das Vorverstärker-Rohsignal (*Trace*), rechts daneben das gemittelte Signal (*MAU*), unten links zeigt die Kanäle an, bei denen ein Intensitätsmaximum vorliegt (*Peaksensing*) und unten rechts ist das *MWD*-Signal dargestellt.

### 3.5 Gesamtüberblick über den Messaufbau

Abbildung 17 zeigt den vollständigen Messaufbau. Um Messungen bei verschiedenen Temperaturen durchführen zu können, wird die komplette Experimentierbox mit Hilfe einer Heizplatte erwärmt. Mit dem Oszilloskop kann die gewünschte Pulsbreite am Pulser eingestellt und während der Messung kontrolliert werden. Die Amplitude des Pulses lässt sich über das Dämpfungsglied, mit einer Dämpfung von bis zu 42 dB, variieren. Als Verbindungsleitungen zwischen den einzelnen Elementen werden geschirmte LEMO-Leitungen verwendet.



**Abbildung 17:** Messaufbau mit Dämpfungsglied, Konstantstromschaltung, Heizplatte, Vorverstärker und Messgehäuse

## 4 Messungen und Ergebnisse

Mit dem zuvor beschriebenen Messaufbau werden nun zahlreiche Messungen durchgeführt. Die Hauptziele dieser Messungen sind zum einen ein genaueres Verständnis über die Funktionsweise von APDs zu erlangen und zum anderen einen möglichst automatisierten Testablauf, für die Vorselektion der APDs zum Einbau in CALIFA, zu erstellen. Bei der digitalen Auswertung der Messungen wurde stets das in Kapitel 3.4.2 beschriebene Peaksensingverfahren auf das mit der MWD-Methode rekonstruierte Signal angewendet. Zum Erstellen der Graphen wird das Analysetool Origin<sup>11</sup> verwendet.

### 4.1 Ladungskalibration

Zu Beginn der Messungen soll zunächst ermittelt werden, welche Ladungsmenge zu den ADC-Kanälen proportional ist. Dafür wird ein sog. Charge Terminator verwendet. In ihm befindet sich ein 10,7 pF großer Kondensator, sowie eine 50  $\Omega$ -Terminierung am Eingang zur Vermeidung von Reflexionen. Man gibt nun ein gepulstes Signal auf den Charge Terminator und bestimmt gleichzeitig die Amplitude des Pulses mit Hilfe des Oszilloskops.

Mit Hilfe der Formel  $Q = C \cdot U$  lässt sich die Ladungsmenge berechnen, die auf den Eingang des Vorverstärkers (Kanal 4) gegeben wird. Nun wird der zugehörige Kanal am ADC ausgelesen. Durch das Einstellen unterschiedlicher Dämpfungen im Bereich von 27 dB – 42 dB lässt sich die Amplitude des Pulses variieren. Trägt man die Ladung gegen die Kanalnummer auf, so zeigt sich ein linearer Zusammenhang (Abbildung 18).

Wendet man nun einen linearen Fit an, so erhält man als Wert der Steigung:

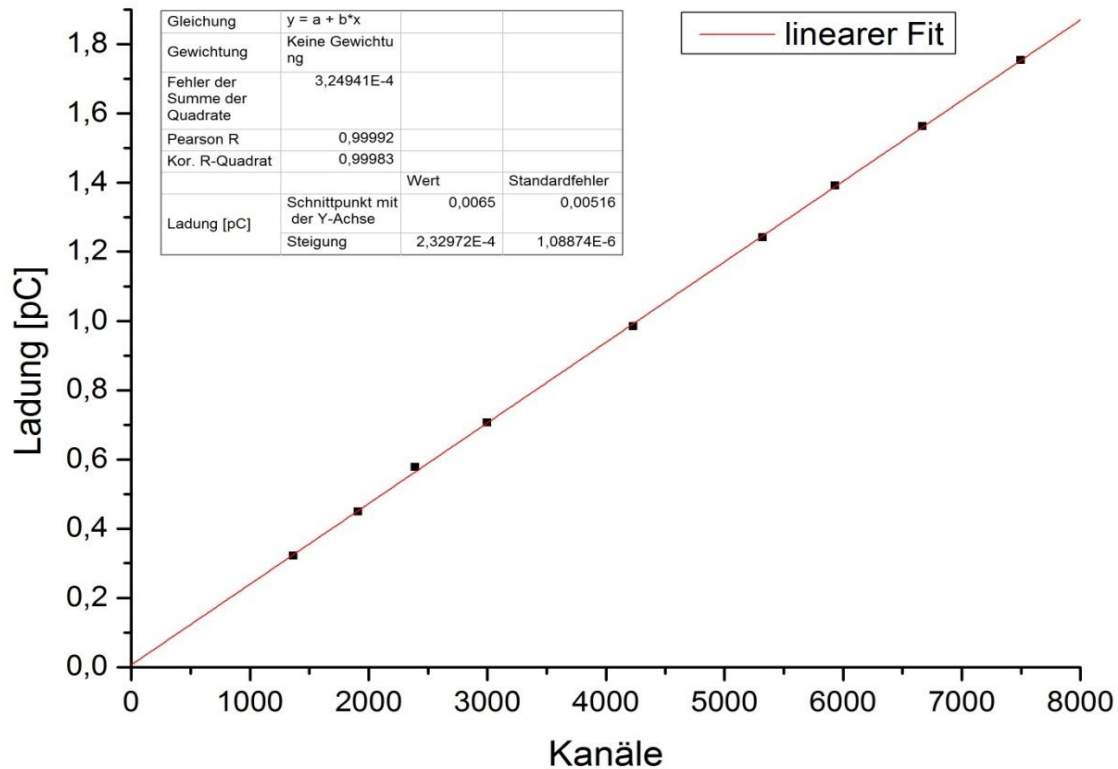
$$(0,000233 \pm 0,000001) \frac{pC}{Kanäle}$$

Der Schnittpunkt der Geraden mit der y-Achse liegt bei 0,0065 pC und ist somit nicht mehr innerhalb des Fehlers von 0,00516. Die Ursachen dafür liegen vor allem in der begrenzten Ablesegenauigkeit der Eingangsspannung mit dem Oszilloskop. Hinzu kommt, dass es sich bei den Kanalnummern um nicht absolut exakte Werte handelt, da die Peaks mit einer Gaussfunktion gefittet werden. Beim Übertragen der Werte in Origin wurden die Werte auf 4 Nachkommastellen genau gerundet, was zusätzlich einen geringen Fehler verursacht.

Mit Hilfe des ermittelten Steigungswertes lassen sich nun alle Messwerte, die mit dem vierten Kanal des Messaufbaus aufgenommen werden, in die tatsächliche Ladungsmenge umrechnen.

---

<sup>11</sup> Origin 8.51 von OriginLab



**Abbildung 18:** Ladung am Eingang des Vorverstärkers gegen den zugehörigen ADC-Kanal. Die rote Kurve stellt einen linearen Fit dar. Die Steigung bestimmt den Umrechnungsfaktor zwischen Ladung und Kanalnummer.

## 4.2 Reproduzierbarkeit

Um eine verlässliche Folgerung aus einer Messung ziehen zu können, muss sichergestellt sein, dass man das Ergebnis jederzeit wieder messen kann. Bei den durchgeführten Messungen betrifft das die Reproduzierbarkeit der eingestellten Pulsbreite, der Dämpfung und der Messposition. Für die Messungen wurde die APD TH1s verwendet (siehe Anhang A Tabelle 2).

### 4.2.1 Pulsbreite

Um zu überprüfen, ob sich die gleiche Pulsbreite erneut einstellen lässt, wird zunächst eine Pulsbreite von  $1 \mu\text{s}$  eingestellt und der zugehörige Amplitudenwert gemessen. Anschließend wird die Pulsbreite wieder grob verstellt und erneut mit Hilfe des Oszilloskops auf  $1 \mu\text{s}$  eingestellt. Dieser Vorgang wurde insgesamt sechs Mal durchgeführt. Die Häufigkeit der gemessenen Werte trägt man nun gegen die ladungskalibrierte Amplitude auf (Abbildung 19).

Mit Hilfe der Varianz lässt sich dann die Abweichung der Pulsbreiteneinstellung berechnen:

$$\frac{\sigma}{\text{Mittelwert}} = 0,2 \%$$

Durch den geringen Wert der Abweichung kann man sagen, dass die Einstellung der Pulsbreite reproduzierbar ist.

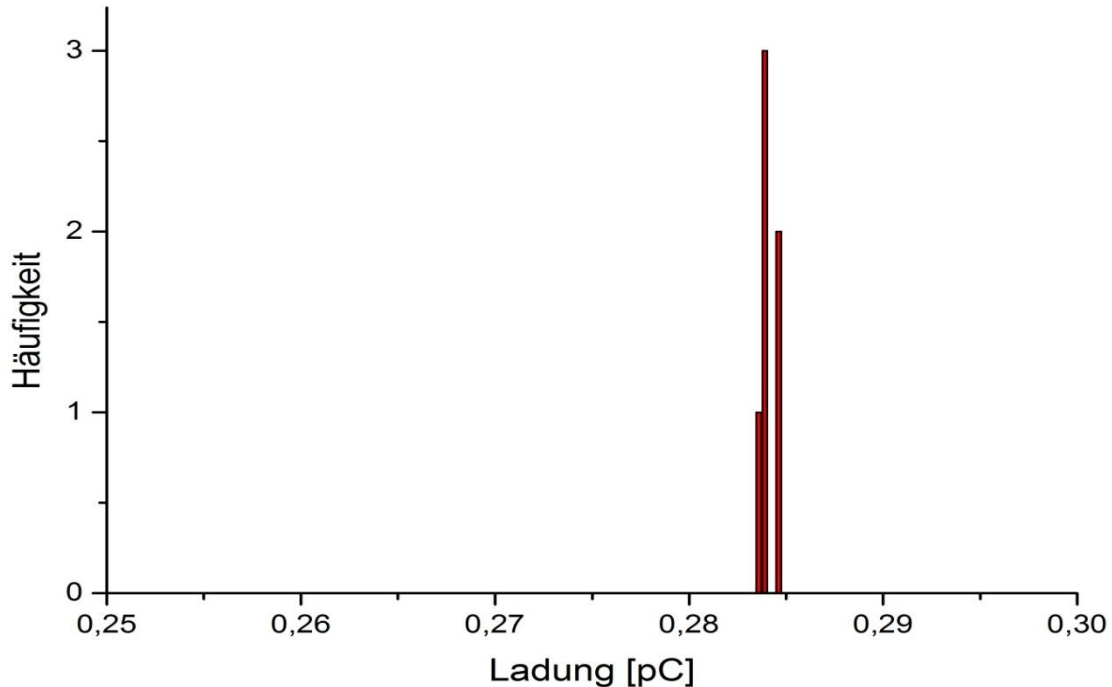


Abbildung 19: Reproduzierbarkeit der Pulsbreite

#### 4.2.2 Dämpfung

Eine Möglichkeit, die Intensität des Lichts zu variieren, ist die Amplitude des Pulssignals zu verändern. In dieser Messung wird überprüft, ob dies reproduzierbar ist. Dabei wird das Eingangssignal durch das Dämpfungsglied stufenweise (0 dB – 8 dB) abgeschwächt. Diese Messung wurde insgesamt vier Mal durchgeführt (Abbildung 20). Der Fehler jeder Dämpfungsstufe kann wieder über den Quotienten aus Varianz und Mittelwert berechnet werden. Mittelt man anschließend über alle Werte, so erhält man den Gesamtfehler:

$$\frac{\sigma}{\text{Mittelwert}} = 7,5 \%$$

Die Abweichung erscheint relativ hoch. Die Hauptursache hierfür dürfte vor allem darin liegen, dass die Messung ohne Gain bei  $U_{Bias} = 80 \text{ V}$  durchgeführt wurde und somit im unteren Bereich des ADCs. Eine kleine Abweichung führt somit zu einem großen prozentualen Fehler.

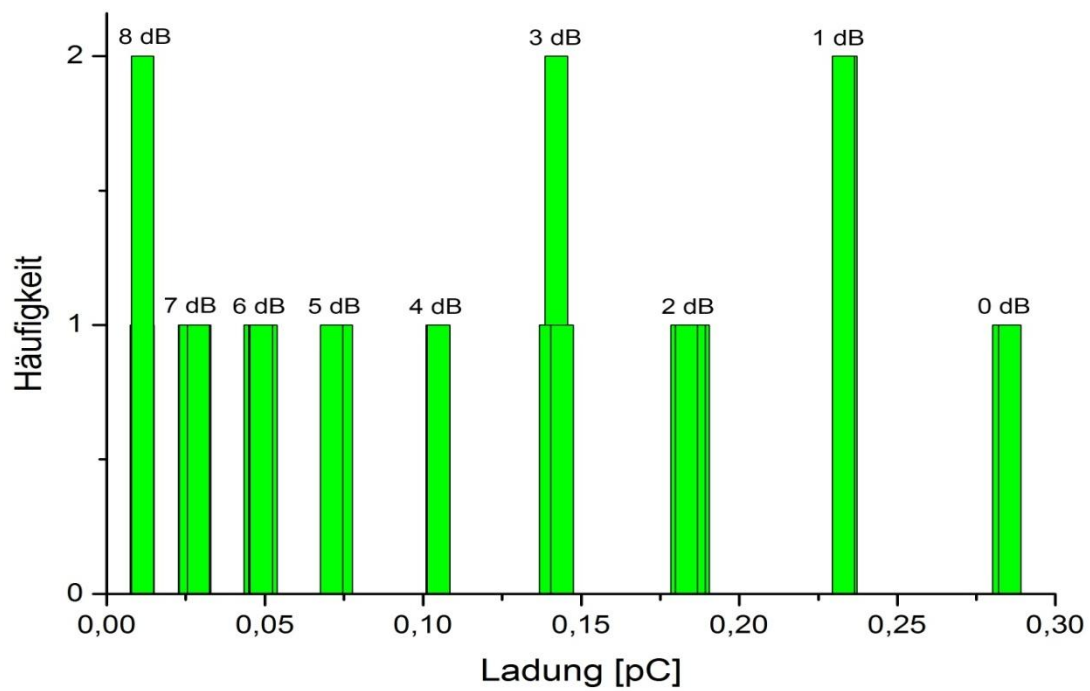


Abbildung 20: Reproduzierbarkeit der Amplitude

### 4.2.3 Messposition

Ein weiterer wichtiger Parameter, der bei Variation möglichst gleiche Werte liefern muss, ist die Messposition. Um auf Reproduzierbarkeit zu überprüfen, wurde die Messposition insgesamt acht Mal vermessen, wobei jedesmal dieselbe APD abgesteckt und wieder an die gleiche Messposition zurückgesteckt wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 21 zu sehen.

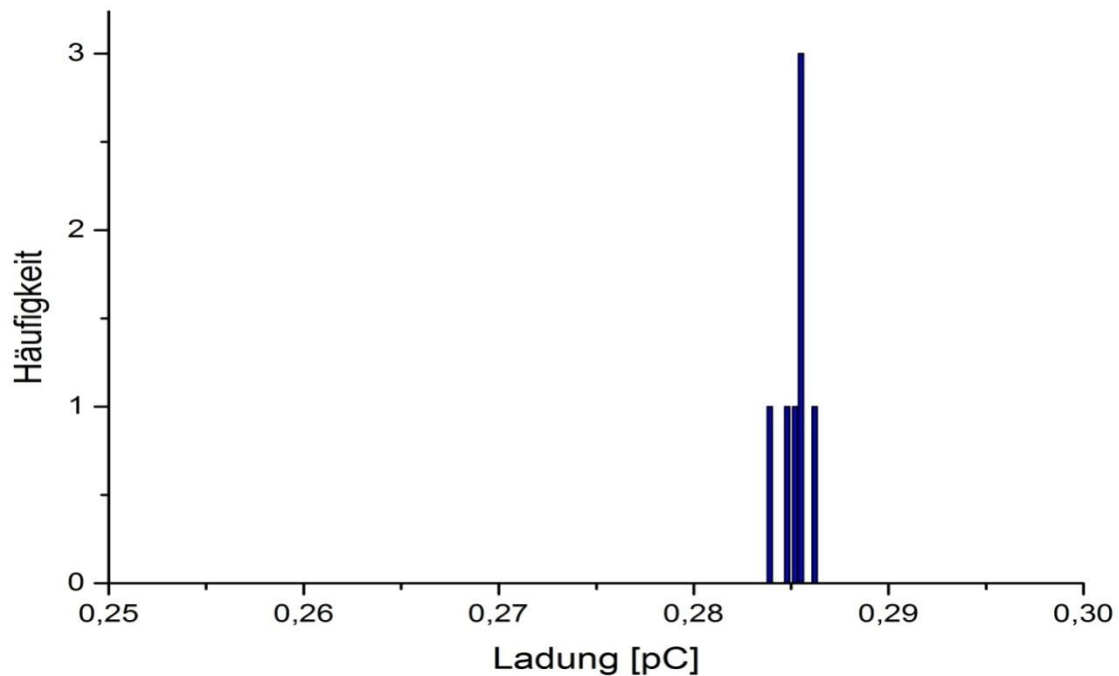


Abbildung 21: Reproduzierbarkeit der Messposition

Stellt man nun wieder die Berechnung des Fehlers an, so erhält man

$$\frac{\sigma}{\text{Mittelwert}} = 0,6 \%$$

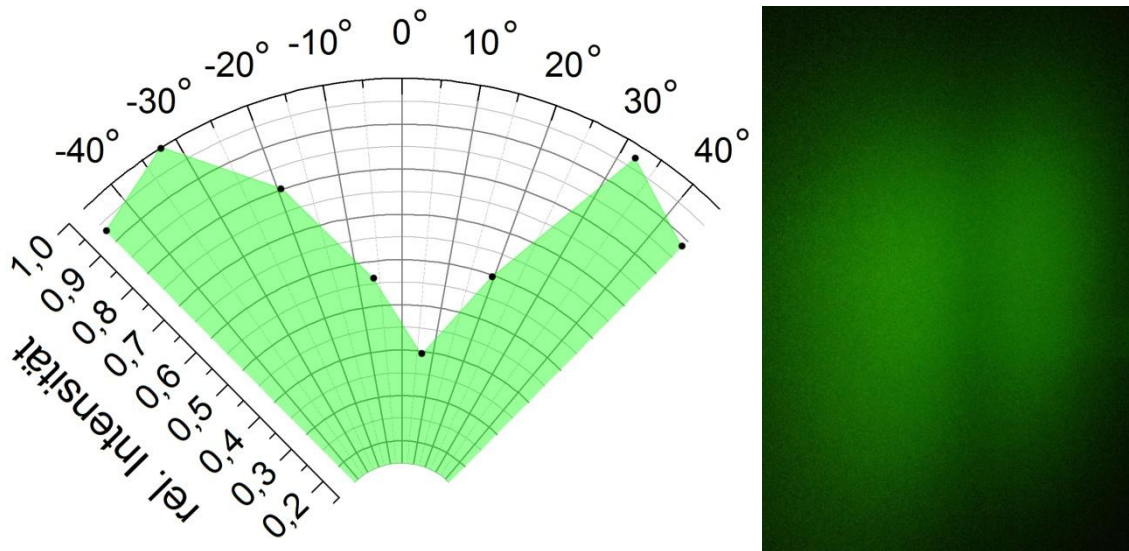
Es zeigt sich also, dass die Messposition reproduzierbar ist.

### 4.3 Abstrahlcharakteristiken der LEDs

In diesem Kapitel sollen die drei verwendeten LEDs genauer untersucht werden. Um die Abstrahlcharakteristik messen zu können, wird die APD TH1s auf allen acht Positionen des ersten Rings jeweils mit einer Spannung von 30 V vermessen.

#### 4.3.1 grüne, eckige LED

Diese LED ist die einzige mit einem quaderförmigen Gehäuse. Die Geometrie wirkt sich jedoch stark auf das Abstrahlverhalten einer LED aus, wie Abbildung 22 zeigt.



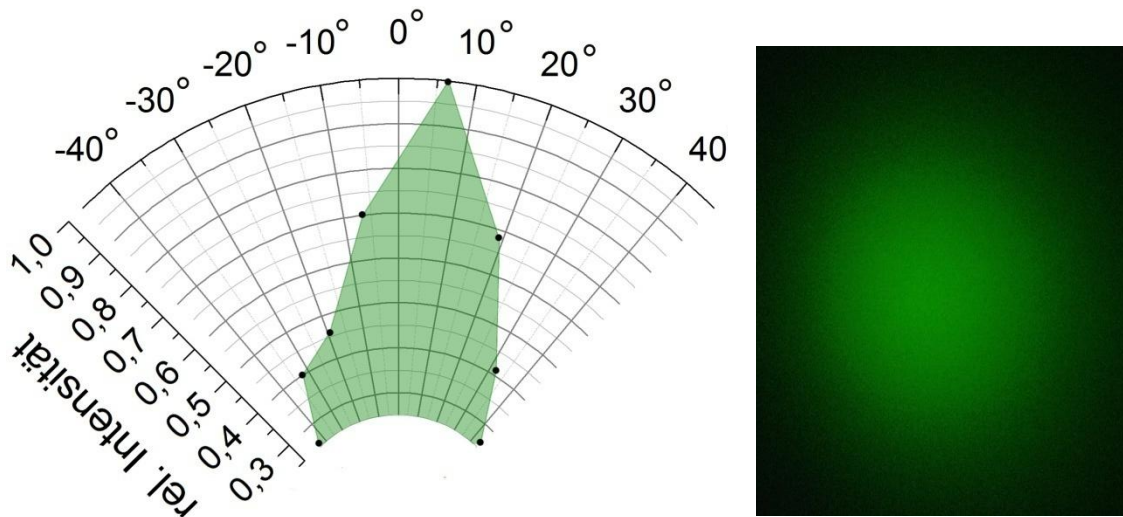
**Abbildung 22:** Gemessene Abstrahlcharakteristik der grünen, eckigen LED. Die relative Intensität ist gegen den Winkel aufgetragen, wobei die acht Messpunkte schwarz dargestellt sind. Das tatsächliche Abstrahlverhalten zeigt das Foto rechts. Deutlich zu erkennen ist die verringerte Intensität in der Mitte.

An den geraden Seitenflächen des Gehäuses findet Totalreflexion statt, was dazu führt, dass an den Seiten mehr Licht emittiert wird als in der Mitte.

#### 4.3.2 grüne, runde LED

Das Gehäuse dieser LED ist in guter Näherung glockenförmig und im vorderen Bereich rund. Aus diesem Grund erwartet man ein annähernd isotropes Abstrahlverhalten, da es zu den Seiten hin keine Vorzugsrichtung gibt, sondern an den Innenflächen der LED auftretende Reflexionen gleichmäßig in den Raum verteilt werden.

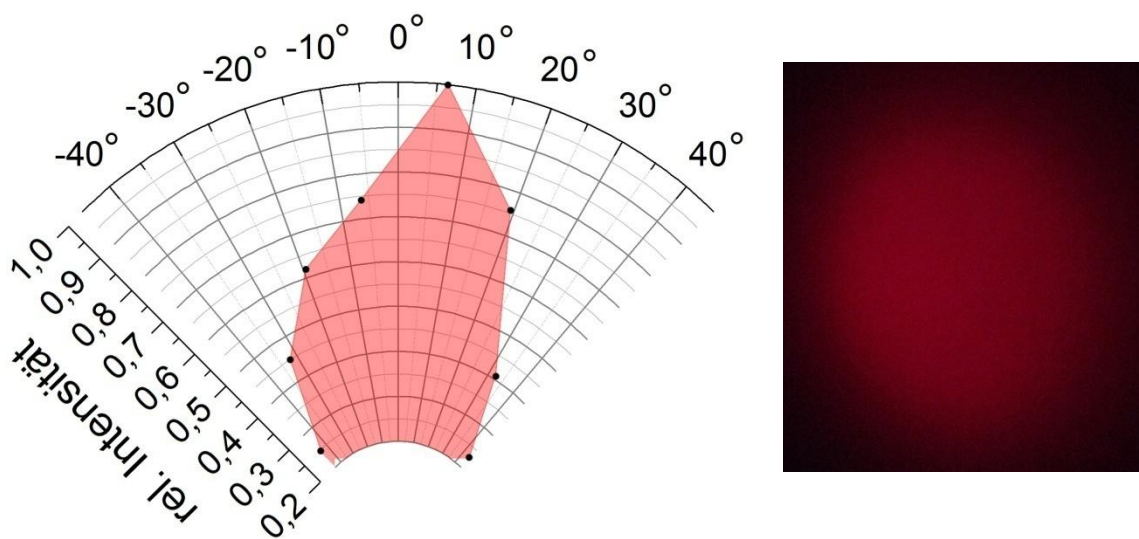




**Abbildung 23:** Gemessenes Abstrahlverhalten der grünen, runden LED. Die relative Intensität ist gegen den Winkel aufgetragen, wobei die acht Messpunkte schwarz dargestellt sind. Das tatsächliche Abstrahlverhalten zeigt das Foto rechts. Das isotrope Abstrahlverhalten ist deutlich erkennbar.

#### 4.3.3 rote, runde LED

Die rote LED hat die gleiche Form und Abmessung, wie die grüne, runde. Die erwartete isotrope Abstrahlcharakteristik mit Maximum annähernd bei  $0^\circ$  ist in Abbildung 24 gut zu sehen.



**Abbildung 24:** Gemessenes Abstrahlverhalten der roten, runden LED. Die relative Intensität ist gegen den Winkel aufgetragen, wobei die acht Messpunkte schwarz dargestellt sind. Das tatsächliche Abstrahlverhalten zeigt das Foto rechts. Das isotrope Abstrahlverhalten ist deutlich erkennbar.

## 4.4 Raumintensität

Die Intensität einer punktförmigen Lichtquelle nimmt proportional mit  $\frac{1}{r^2}$  ab. Dieses Verhalten soll nun mit einer Messung über die vier Abstände 75 mm, 100 mm, 125 mm und 150 mm überprüft werden. Dabei wird die APD TH1s in jedem Abstandsring auf den Kanälen 3-6 vermessen. Als Lichtquelle dient die eckige, grüne LED. Das anisotrope Abstrahlverhalten dieser LED aus Kapitel 4.3.1 ist auch hier ersichtlich (Abbildung 25).

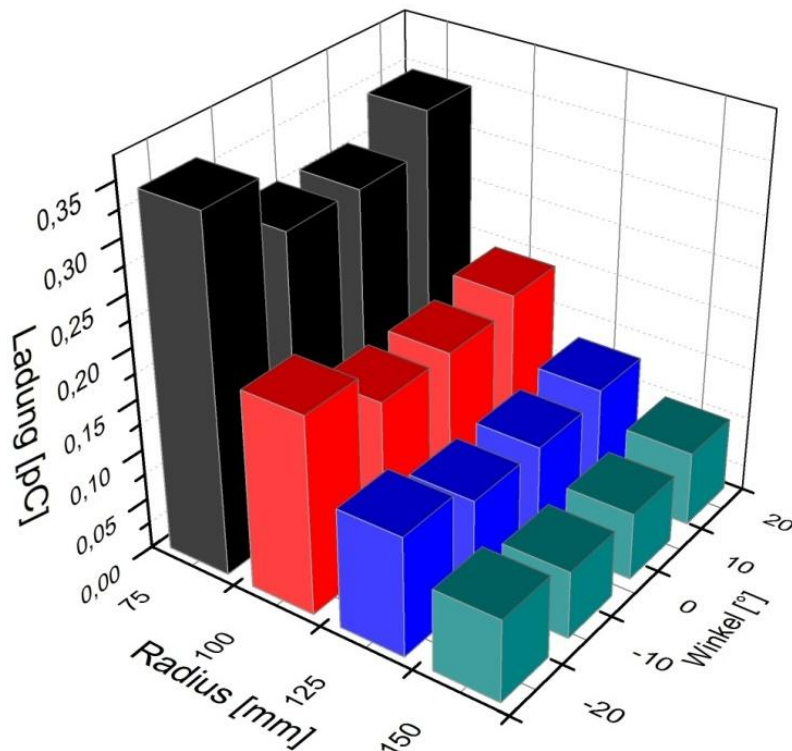
Um die gemessenen Werte vergleichen zu können werden nun die zu erwartenden theoretischen Werte, ausgehend von den Intensitätswerten des ersten Rings, berechnet. Die Abweichung der gemessenen Werte von den theoretischen Werten beträgt durchschnittlich 4,2 %. Der Grund dafür liegt darin, dass bei der LED der Nullpunkt der Lichtabstrahlung am vorderen Ende des Gehäuserandes festgelegt wurde. In der Praxis lässt sich dieser Punkt jedoch nicht so leicht definieren.

Dieser Punkt lässt sich jedoch mit Hilfe der Formel (3) berechnen:

$$I(\Delta r_i) = I_0 \cdot \frac{1}{(r_0 + \Delta r_i)^2} \quad (3)$$

Je größer dabei der Abstand zum Ursprung ist, desto aussagekräftiger ist der ermittelte Wert, da der prozentuale Fehler in diesem Fall geringer ist. Im Mittel beträgt der Wert für die Abweichung vom festgelegten Nullpunkt -5,2 mm.

Der negative Wert ist durchaus plausibel, da sich der frei definierte Nullpunkt ja an der Stirnfläche der LED befindet.



**Abbildung 25:** Lichtabstrahlung der eckigen grünen LED, gemessen in vier Abständen

Korrigiert man nun die Abstandswerte der Ringe um diesen Wert und berechnet die Abweichung der gemessenen Werte von den Theoriewerten, so ergibt sich ein deutlich geringerer mittlerer Fehler von 0,5 %.

Dieses Ergebnis bestätigt die quadratische Abhängigkeit der Intensität vom Abstand. In Abbildung 26 wurde die Intensität am vierten Kanal gegen  $\frac{1}{r^2}$  aufgetragen. Es ist ein linearer Zusammenhang erkennbar.

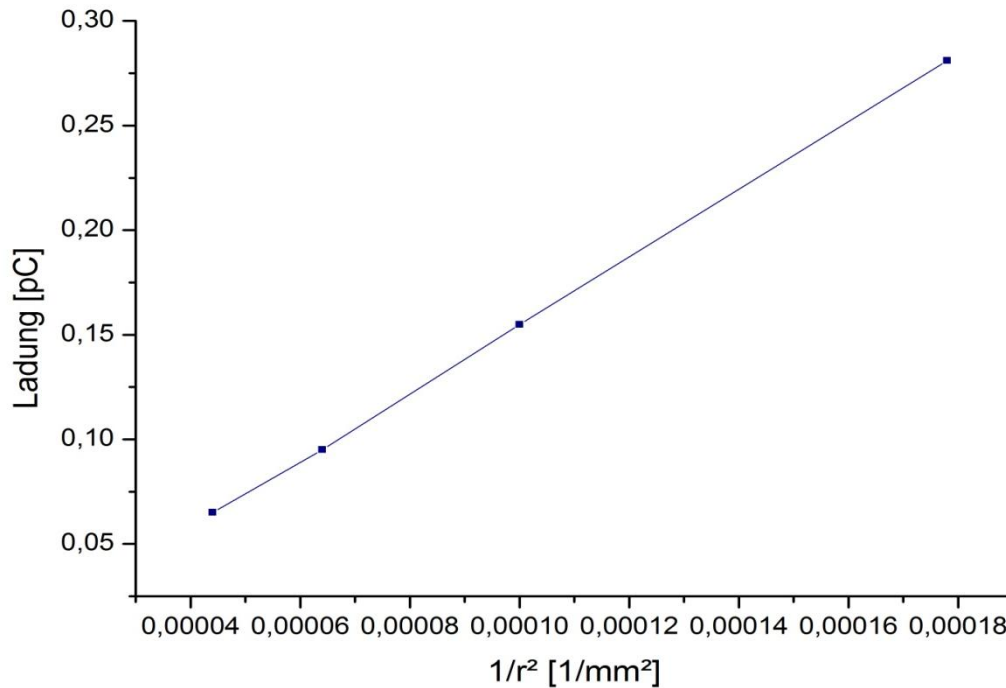
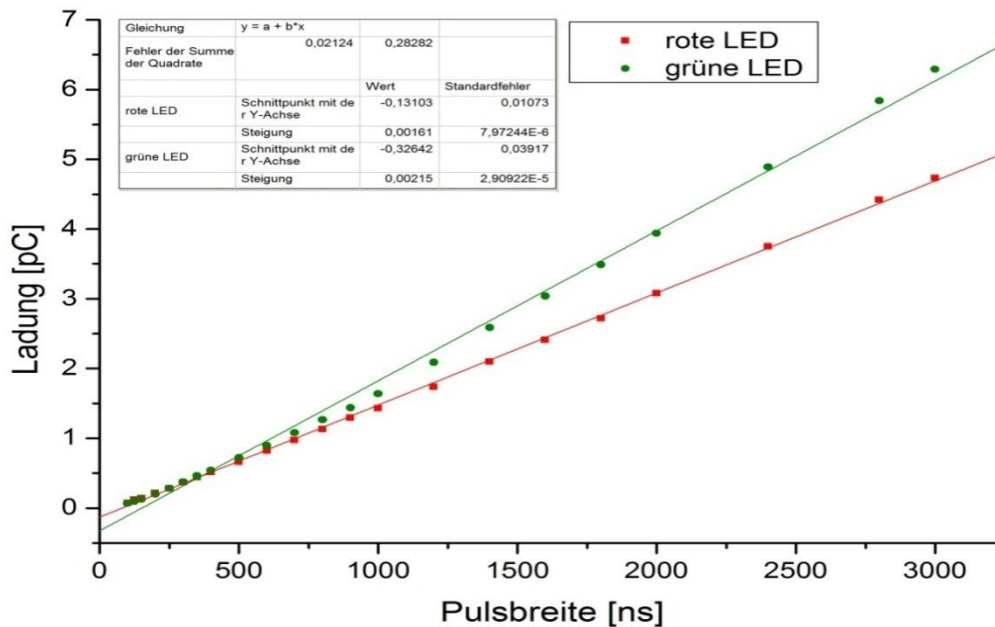


Abbildung 26: Die Ladungsmenge an der APD nimmt proportional zu  $\frac{1}{r^2}$  ab

## 4.5 Pulsbreitenmodulation

Neben der Amplitudenvariation bietet die Pulsbreitenmodulation eine zweite Möglichkeit, die Intensität der LED zu ändern. Zur genaueren Untersuchung des Zusammenhangs wird an die APD TH1s eine Sperrspannung von 80 V angelegt und jeweils eine Messung mit der runden grünen, sowie der roten LED durchgeführt. Die Pulsbreite wird in einem Bereich von 100 ns bis 3  $\mu$ s variiert. Da der gewählte Messbereich des Vorverstärkers nur bis ca. 3 pC reicht, wurde ab einer Pulsbreite von 1  $\mu$ s eine Dämpfung von 6 dB eingestellt. Abbildung 27 zeigt den Zusammenhang zwischen eingestellter Pulsbreite und zugehöriger Ladung.



**Abbildung 27:** Messung der Pulsweitenmodulation für die rote und grüne runde LED

Legt man einen linearen Fit an die beiden Messreihen, so erhält man zwei Geraden aus denen sich die Werte für die Steigung ablesen lassen. Diese gibt an, wie sich die Ladungsmenge bei veränderter Pulsbreite anpasst. Verdoppelt man beispielsweise die Pulsbreite von  $1 \mu\text{s}$  auf  $2 \mu\text{s}$ , so führt dies bei der grünen LED zu einer Erhöhung der Ladung um den Faktor 2,2 während das bei der roten LED nur zu einer Erhöhung um den Faktor 1,6 bringt. Die Ursache dieses Verhaltens wird im Abschnitt 4.6 genauer untersucht. Die Abweichung des y-Achsenabschnitts vom Nulldurchgang lässt sich hauptsächlich durch die Verwendung des Dämpfungsgliedes erklären, da hierbei eine Mittelung im Übergangsbereich bei  $1 \mu\text{s}$  durchgeführt werden muss.

Zusammenfassend kann man sagen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen der Lichtintensität und der Pulsbreite des Eingangssignals existiert.

## 4.6 Vergleich PIN-Diode und APD

Ein Vergleich der APD mit einer PIN-Diode hat zum Ziel, genauer verstehen zu können, wie sich die unterschiedliche Wellenlänge des Lichts auf die Lichtausbeute der APD auswirkt. Eine PIN-Diode besteht im Wesentlichen aus einem schwach n-leitendem Siliziumsubstrat, welches am einen Ende stark p-dotiert und am anderen Ende stark n-dotiert wird. Im Gegensatz zur APD hat die PIN-Diode keine interne Verstärkung.

Die Messungen werden mit der APD TH1s und einer Silizium-PIN-Diode bei der Spannung  $U_{Bias} = 30 V$  durchgeführt. Die Pulsbreite des Eingangssignals beträgt 500 ns bzw. 1000 ns. Die Messwerte wurden jeweils vier Mal für die grüne und rote, runde LED aufgenommen.

#### 4.6.1 Messung mit grüner LED

Abbildung 28 zeigt die Vergleichsmessung mit der grünen LED. Es fällt auf, dass die Lichtausbeute an der APD deutlich höher ist, als an der PIN-Diode. Berechnet man den Arithmetischen Mittelwert, so zeigt sich, dass der Emissionspeak der Lichtausbeute bei der APD 25,7 % höher ist, als bei der PIN-Diode.

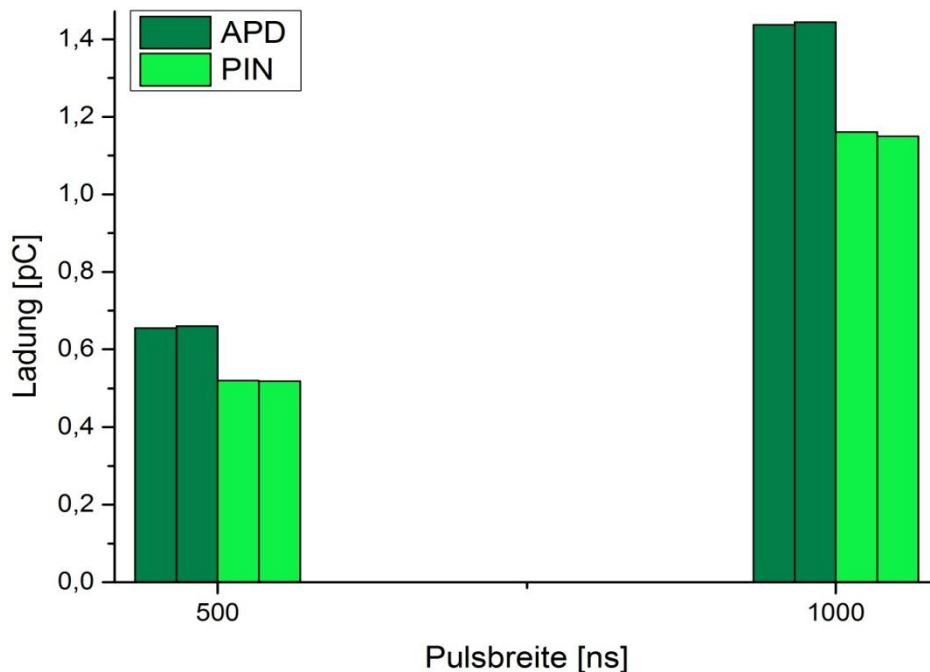


Abbildung 28: Vergleichsmessung der APD mit einer PIN-Diode und grüner LED

#### 4.6.2 Messung mit roter LED

Die vorherige Messung wird nun mit roter LED wiederholt. Auch hier zeigt sich, dass die APD eine höhere Lichtausbeute als die PIN-Diode hat (Abbildung 29). Eine Mittelung der Messwerte ergibt jedoch einen geringeren Unterschied. Mit roter LED ist die Lichtausbeute der APD 21,9 % höher.

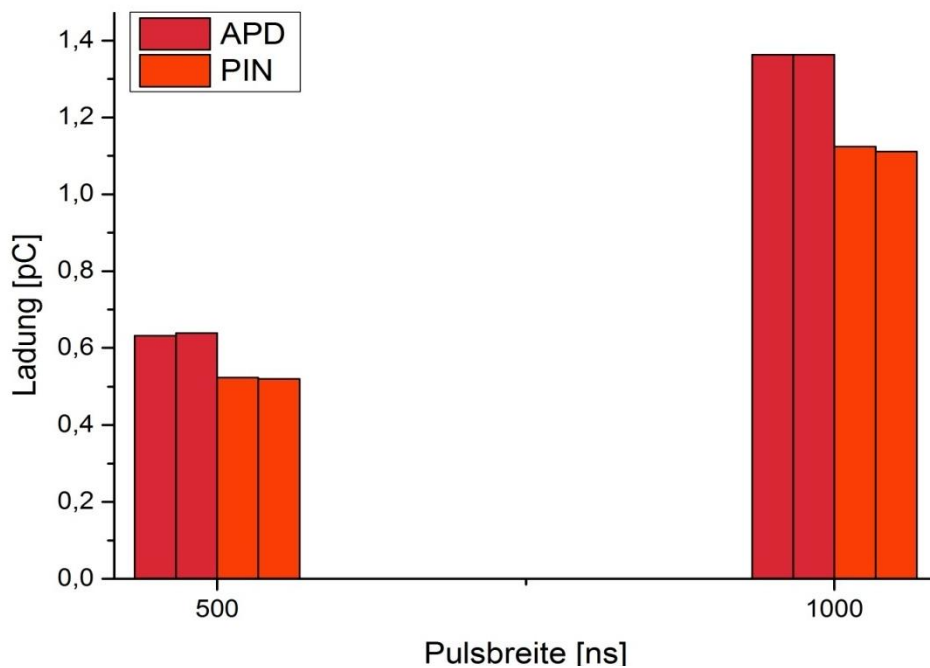


Abbildung 29: Vergleichsmessung der APD mit einer PIN-Diode und roter LED

### 4.6.3 Interpretation

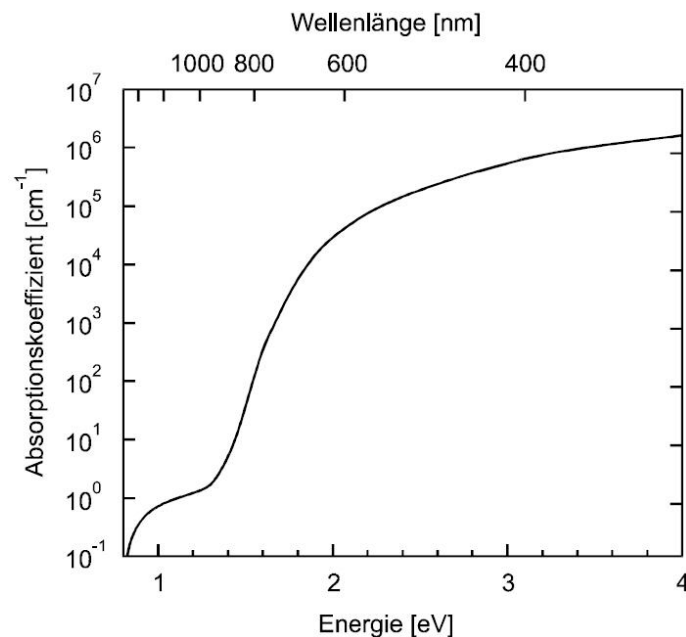
Ein erster Grund für die höhere Lichtausbeute der APD ist die unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit. Ein optischer Vergleich zeigt, dass die Avalanche Photodiode dunkler ist, was die Absorptionsfähigkeit begünstigt.



Abbildung 30: APD S8664-1010 von Hamamatsu (links) und eine PIN-Diode (rechts)

Des Weiteren ist bekannt, dass die letzte Schicht der APD epitaktisch aufgetragen wurde, wodurch eine spezielle Struktur erzeugt wird, die die Absorption ebenfalls begünstigt.

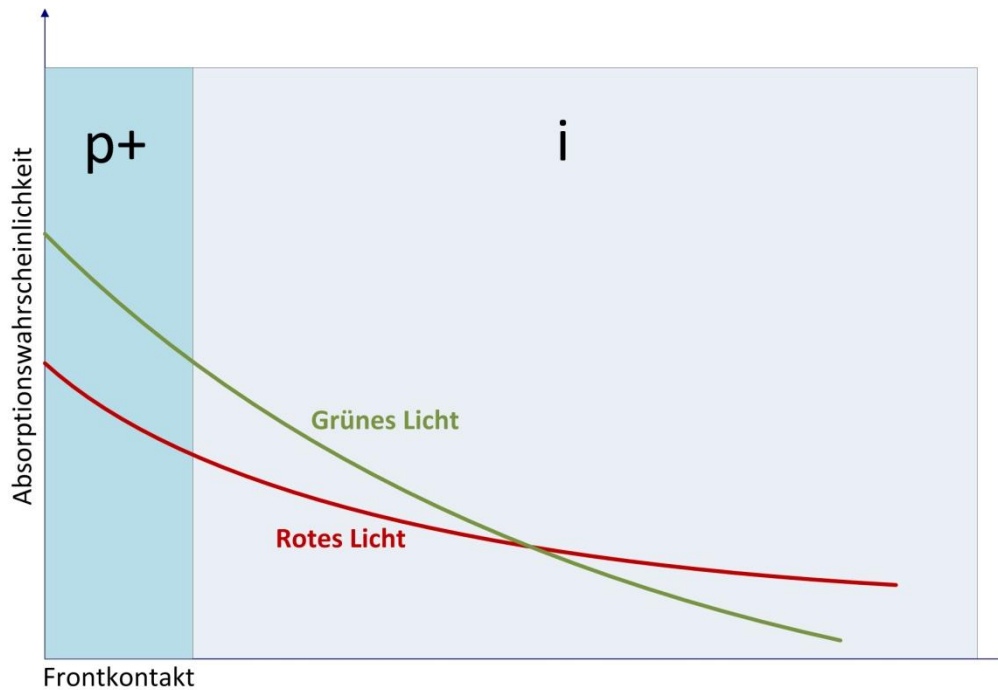
Der Unterschied zwischen roter und grüner LED ist in Abbildung 31 zu sehen. Der Absorptionspeak der grünen LED liegt bei 565 nm und somit unterhalb der Wellenlänge der roten LED von 630 nm. Der Absorptionskoeffizient steigt mit geringer werdender Wellenlänge bzw. zunehmender Energie an.



**Abbildung 31:** Optischer Absorptionskoeffizient von amorphem Silizium [CODY]

Abbildung 32 erklärt das Absorptionsverhalten der PIN-Diode in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Der dunklere Bereich stellt den stark p-dotierten Bereich, also den Frontkontakt dar. In diesem Bereich können keine Elektron-Loch-Paare erzeugt werden, weshalb er auch als Totschicht bezeichnet wird. Da die Eindringtiefe von Licht mit der Wellenlänge steigt, dringt das rote Licht tiefer ins Material ein. Die Absorptionswahrscheinlichkeit nimmt demnach bei grünem Licht schneller ab. Da die Fläche unter den beiden Graphen gleich groß sein muss, sind die prozentualen Verluste bei der roten LED größer als bei der grünen, was das Verhalten aus den beiden Messungen bestätigt. In der APD ist die Totschicht dünner, was ihre höhere Lichtausbeute erklärt.





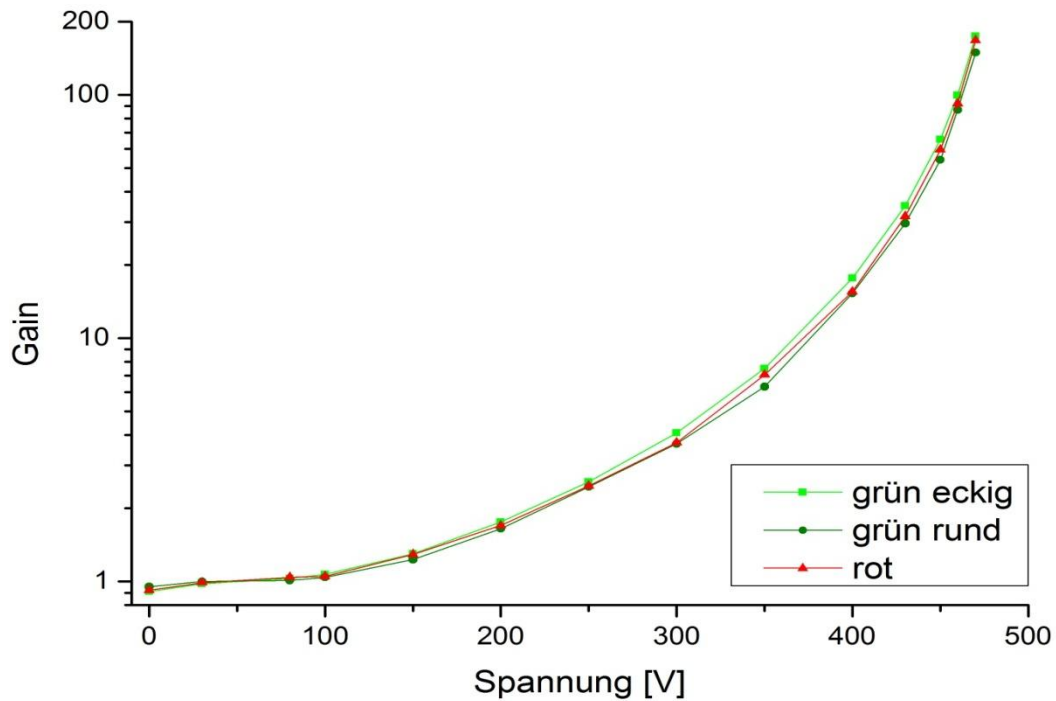
**Abbildung 32:** Schematische Darstellung der Absorptionswahrscheinlichkeit von grünem und rotem Licht in Silizium

## 4.7 Gainmessung

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt wurde, ist es von besonders großem Interesse, die APDs vor dem Einbau in sog. Gain- bzw. Temperaturgruppen einzuteilen. Dafür wurden verschiedene spannungsabhängige Messungen mit verschiedenen LEDs und unter verschiedenen Temperaturen durchgeführt.

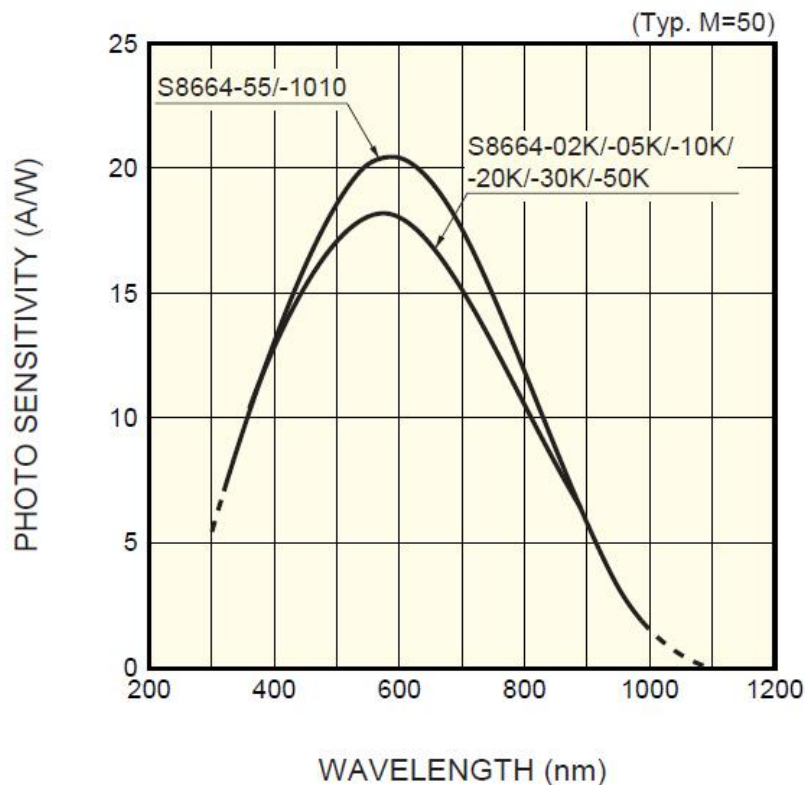
### 4.7.1 mit verschiedenen LEDs

In dieser Messung soll untersucht werden, ob die Wellenlänge des einfallenden Lichts einen Einfluss auf das Gainverhalten der APDs hat. Dabei wird die Spannung schrittweise von 0 – 470 V erhöht. Bei einer Spannung bis 100 V tritt noch kein nennenswerter Verstärkungseffekt auf. Die vier Messwerte wurden demnach gemittelt und als Bezugswert für Gain = 1 verwendet [SATO]. Ab ca. 150 V tritt eine Verstärkung des Signals auf, die bei einer Spannung von 470 V ihr Maximum von ca. 170 erreicht.



**Abbildung 33:** Gainkurven für grüne und rote LEDs im Spannungsbereich von 0 - 470 V

In Abbildung 33 ist erkennbar, dass mit der grünen, eckigen LED eine etwas höhere Verstärkung erreicht wird. Ein Blick ins Datenblatt des Herstellers zeigt, dass die maximale Sensitivität der APD bei einer Wellenlänge knapp unter 600 nm liegt [HAM].



**Abbildung 34:** Lichtausbeute der APD S8664-1010 in Abhängigkeit der Wellenlänge [HAM]

Das Abstrahlmaximum der grünen, eckigen LED liegt bei 575 nm und somit bei den drei verwendeten LEDs am nächsten bei 600 nm. Folglich wird dieses Licht am besten von der APD, am Anfang der Verstärkungszone, absorbiert.

#### 4.7.2 Temperaturverhalten

Da es sich beim verwendeten APD-Material um Silizium und somit einen Halbleiter handelt, ist zu vermuten, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Verstärkung hat. Um dies genauer zu untersuchen, wurde eine Gainmessung bis 420 V bei annähernd Raumtemperatur durchgeführt und anschließend der gesamte Messaufbau mit Hilfe der Heizplatte auf ca. 40 °C aufgewärmt und eine erneute Messung aufgenommen. Dieser Vorgang wurde für die eckige grüne LED durchgeführt. Es ist zu erwarten, dass die Verstärkung bei höherer Temperatur abnimmt, da mehr Phononen im Silizium vorhanden sind, an denen die Elektronen gestreut werden können. Diese Vermutung wird in der Messung bestätigt (Abbildung 35).

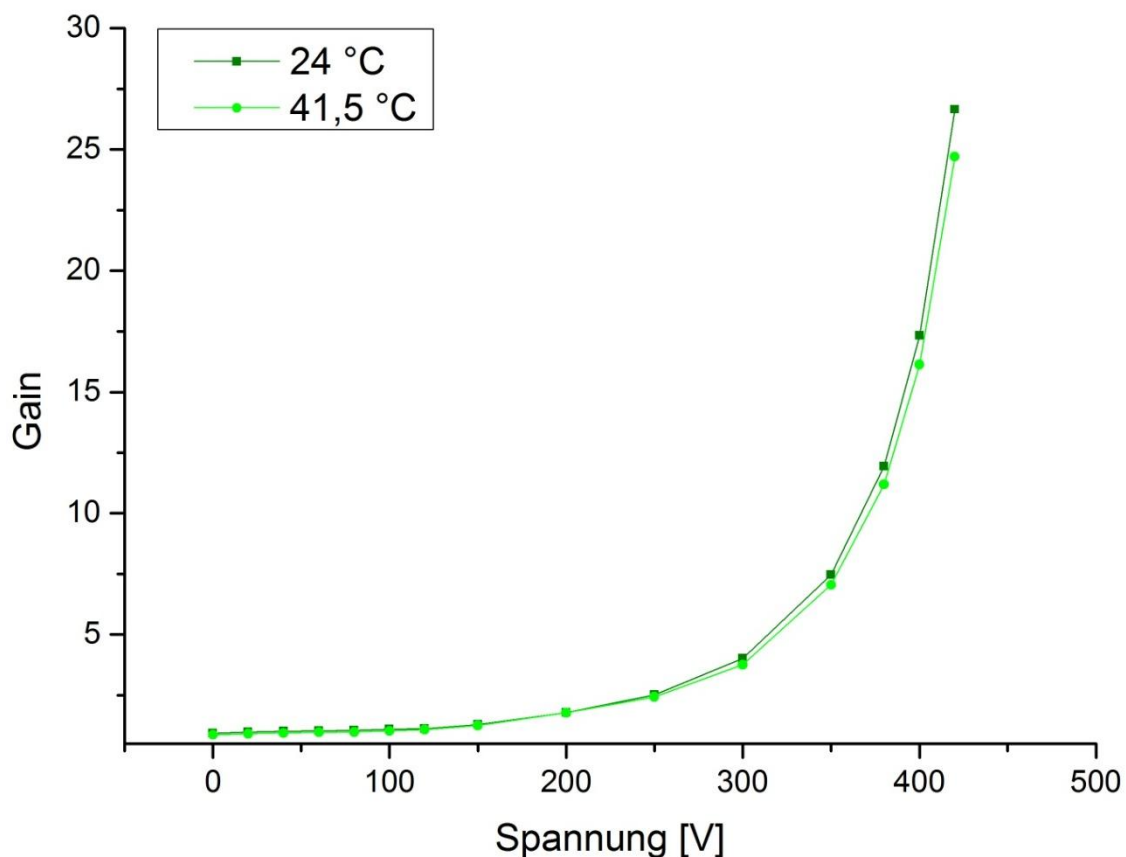
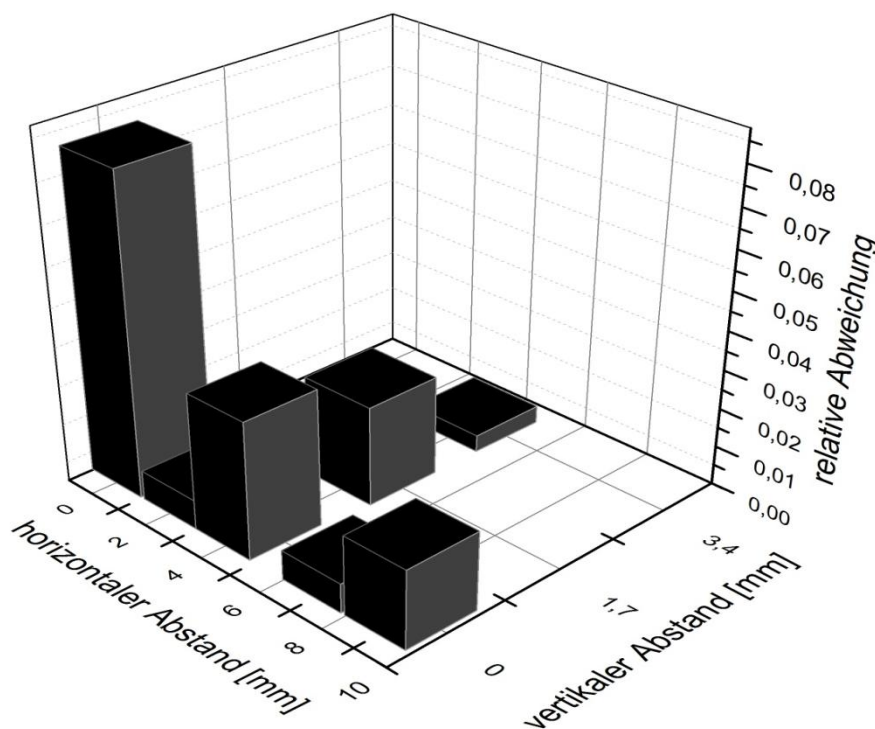


Abbildung 35: Gainmessung bei 24 °C und 41,5 °C mit der grünen, eckigen LED

## 4.8 Lokale Homogenität

Eine weitere interessante Frage, die sich stellt, ist die der lokalen Homogenität. Damit soll untersucht werden, ob sich die Lichtausbeute und somit der Gain abhängig vom Einfallsort des Lichts ändert. Hierfür wurde eine Lochblende mit einem Lochdurchmesser von 3 mm direkt vor die APD gestellt. Die Blende wurde insgesamt sieben Mal verschoben, wodurch sich sieben Messwerte ergeben (Abbildung 36). Als Referenzwert wurde der Mittelwert der Messwerte verwendet. Die Höhe der Balken gibt die prozentuale Abweichung des Gains an. Beim ersten Messwert an der horizontalen Position 0 mm wurde das Loch mittig über den Rand der APD gelegt. Anschließend wurde die Blende vier Mal horizontal verschoben. Danach wurde der vertikale Abstand zum Mittelpunkt der APD erhöht.



**Abbildung 36:** Messung zur lokalen Homogenität. Die Höhe der Balken spiegelt die Abweichung vom Mittelwert der Intensitäten wider.

Der Messwert am Rand der APD weicht am stärksten ab, was sich aber dadurch erklären lässt, dass die exakte Ausrichtung auf den APD-Rand nur abgeschätzt werden kann. Lässt man diesen Wert unbeachtet, so zeigt sich eine maximale Abweichung im Inneren der lichtsensitiven Fläche von 3,5 %.

Der aufgenommene Wert am Rand der APD zeigt die Vermutung, dass die Intensität in etwa halb so groß ist wie der Wert im Inneren der aktiven Fläche. Insgesamt kann man also die lichtempfindliche Fläche als homogen annehmen.

## 5 Fazit & Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein Messaufbau entwickelt und gefertigt, mit dem es möglich ist, einfach und schnell größere Stückzahlen von Avalanche Photodioden zu charakterisieren. Die Grundanforderungen wie Reproduzierbarkeit der Messungen und unabhängige Parametervariation wurden ebenso erfüllt wie die Möglichkeit verschiedene Quellen, APDs und Abstände zu verwenden. Eine exakte und komfortable Analyse der digitalisierten Daten ist mit der Analysesoftware Go4 möglich. Besonders hilfreich ist die Tatsache, dass die Rohdaten des Vorverstärkers nachträglich jederzeit erneut, mit eventuell angepassten Parametern, ausgewertet werden können.

Eine besondere Herausforderung stellte im Verlauf der Arbeit die über zwei Größenordnungen variabel einstellbare aber auch reproduzierbare Lichterzeugung dar. Hier musste eine besondere Signalansteuerung für die verschiedenen „Light Emitting Diodes“ (LED), die als schmalbandige und schnelle Lichtquellen eingesetzt werden, entwickelt werden. Die nun verwendete Schaltung ermöglicht ein schnelles Pulsen der LED mit kurzer Anstiegsflanke  $\tau < 10$  ns.

Die zahlreichen Messungen haben dazu beigetragen, mehr über die Funktionsweise der APD zu erfahren. So wurde zum Beispiel durch die Vergleichsmessung von APD und PIN-Diode eine Erklärung für die Wellenlängenabhängig unterschiedlichen Effizienzen der beiden Sensortypen gefunden. Ebenfalls interessant waren die Einflüsse der Pulsbreite oder des Abstandes auf die Intensität genauer zu untersuchen.

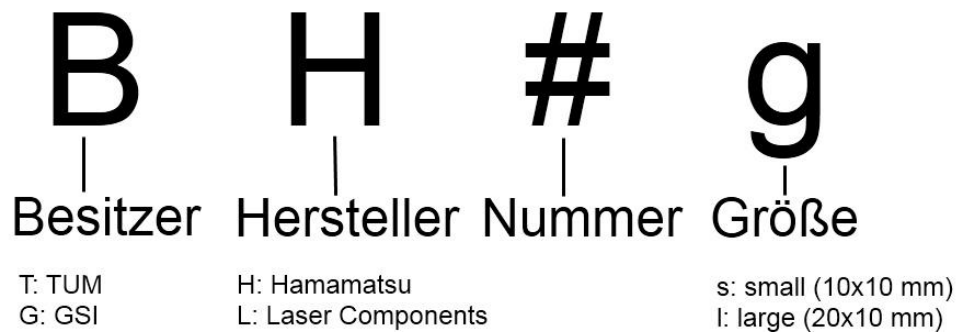
Bedauerlicherweise konnte in der Bachelorarbeit keine funktionierende Version der APDs vom Hersteller Laser Components vergleichend untersucht werden, da Produktionsschwierigkeiten die Herstellung der erste Prototypen verzögert haben. Die Rahmenbedingungen für die Untersuchung wurden aber durch diesen Messaufbau gelegt und so können diese APDs auf Basis dieser Bachelorarbeit vermessen werden. Ein weiteres Ziel wird eine erneute Temperaturmessung sein, bei der der gesamte Versuchsaufbau dieses Mal nicht erwärmt sondern abgekühlt werden soll. Generell muss nachgewiesen werden, wie stark die Temperaturabhängigkeit der APD-Verstärkung streut. Hinzu kommt der Wunsch, mit dem Aufbau nicht nur relative Vergleichswerte messen zu können. Verwendet man zur Kalibration der Messpositionen beispielsweise eine geeichte PIN-Diode, so erhält man eine absolute Effizienz aller vermessenen Photosensoren. Zuletzt wäre es auch noch wünschenswert, das Testverfahren für die Erstellung der Temperaturgruppen zu automatisieren. Geplant ist, dass in CALIFA ca. 3000 APDs verbaut werden sollen, von denen jede einzelne vor dem Einbau vermessen werden muss. Mit dem Messaufbau ist es möglich, gleichzeitig bis zu acht APDs auszulesen. Die Ergebnisse müssen aktuell jedoch im Anschluss einzeln ausgewertet werden. Hier gibt es noch Potential, das Verfahren zu verbessern und beispielsweise eine Software zu entwickeln, die automatisch die wichtigsten Parameter auswertet und dann ein kleines Datenblatt zu jeder APD anlegt.



## Anhang

### A Liste der APDs

Die Beschriftung der APDs erfolgt nach folgendem Schema:



**Abbildung 37:** Beschriftung der APDs

Für Messungen können die in aufgeführten APDs verwendet werden. Für diese drei Typen sind bereits Trägerplatinen vorhanden.

Hamamatsu S8664-1010	Hamamatsu S8664-2010	Laser Components
TH1s	TH1l	TL1s
TH2s	TH2l	TL2s
TH3s	TH3l	TL3s
TH4s	TH4l	
TH5s	TH5l	
TH6s		
TH7s		
TH8s		

**Tabelle 2:** Verfügbare APDs

Bei den Messungen in Kapitel 4 kam ausschließlich die APD TH1s zum Einsatz.





## Literaturverzeichnis

- BEN.** *M. Bendel, Diplomarbeit, Technische Universität München, 2010.*
- CODY.** *G. D. Cody, The Optical Absorption Edge of a-Si:H, Academic Press Inc., 11-82, 1984.*
- DPG.** *DPG Tagung Gruppenbericht, Michael Bendel, 2012 Mainz.*
- FIN.** *Professor J. Finley, TU München, Introduction to solid state physics, Lecture 27 - The p-n junction and basic semiconductor devices, page 8, 2012.*
- FTR.** *FAIR Baseline Technical Report, 2006.*
- HAM.** *Hamamatsu Photonics K.K. Solid State Division. Datenblatt Si APD S8664-series, 2005.*
- HPTI.** *Hamamatsu, Photodiode Technical Information.*
- KSK.** *J. Kataoka, T. Saito, Y. Kuramoto. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 541 (1-2):398-404, 2005.*
- MPRB.** *Mesytec GmbH & co. KG, MPRB-16 Specifications.*
- SATO.** *R. Sato et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A556 535-542, 2006.*
- SGPC.** *Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc; Cesium Iodide Scintillation Material 06-12, 2007-2012.*



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1:</b> Lageplan der neuen Beschleunigereinheit FAIR [FTR] .....	1
<b>Abbildung 2:</b> CALIFA-Kalorimeter mit Haltestruktur [DPG] .....	3
<b>Abbildung 3:</b> <i>Reverse-Type</i> LAAPD nach [KSK] .....	4
<b>Abbildung 4:</b> <i>Reach-Through</i> LAAPD nach [KSK] .....	4
<b>Abbildung 5:</b> Zonen einer <i>Reverse-Type</i> APD [BEN] .....	5
<b>Abbildung 6:</b> Zonen einer <i>Reach-Through</i> APD [BEN].....	5
<b>Abbildung 7:</b> Bandstruktur des pn-Übergangs [FIN].....	5
<b>Abbildung 8:</b> Verstärkung der S8664-1010 APD [HAM] .....	7
<b>Abbildung 9:</b> Das Messgehäuse .....	10
<b>Abbildung 10:</b> Layout der Grundträgerplatine.....	11
<b>Abbildung 11:</b> Emissionsspektrum eines CsI-Kristalls [SGPC].....	11
<b>Abbildung 12:</b> Konstantstromschaltung für die LED .....	13
<b>Abbildung 13:</b> Ladungssensitiver Vorverstärker mit angeschlossener APD .....	14
<b>Abbildung 14:</b> <i>Ballistische Defizit</i> . [BEN].....	15
<b>Abbildung 15:</b> Vorverstärker MPRB-16 von Mesytec .....	16
<b>Abbildung 16:</b> Messung im Go4. ....	17
<b>Abbildung 17:</b> Messaufbau .....	18
<b>Abbildung 18:</b> Ladungskalibration.....	20
<b>Abbildung 19:</b> Reproduzierbarkeit der Pulsbreite.....	21
<b>Abbildung 20:</b> Reproduzierbarkeit der Amplitude.....	22
<b>Abbildung 21:</b> Reproduzierbarkeit der Messposition .....	23
<b>Abbildung 22:</b> Abstrahlcharakteristik der grünen, eckigen LED.....	24
<b>Abbildung 23:</b> Abstrahlverhalten der grünen, runden LED. ....	25
<b>Abbildung 24:</b> Abstrahlverhalten der roten, runden LED.....	25
<b>Abbildung 25:</b> Lichtabstrahlung der eckigen grünen LED .....	27
<b>Abbildung 26:</b> Ladungsmenge an der APD .....	28
<b>Abbildung 27:</b> Pulsbreitenmodulation für die rote und grüne runde LED.....	29
<b>Abbildung 28:</b> Vergleichsmessung der APD mit einer PIN-Diode und grüner LED ...	30
<b>Abbildung 29:</b> Vergleichsmessung der APD mit einer PIN-Diode und roter LED .....	31
<b>Abbildung 30:</b> APD S8664-1010 von Hamamatsu (li) und eine PIN-Diode (re) .....	31
<b>Abbildung 31:</b> Optischer Absorptionskoeffizient von amorphem Silizium [CODY]...	32
<b>Abbildung 32:</b> Schematische Darstellung der Absorptionswahrscheinlichkeit .....	33
<b>Abbildung 33:</b> Gainkurven für grüne und rote LEDs .....	34
<b>Abbildung 34:</b> Lichtausbeute der APD S8664-1010 [HAM].....	34
<b>Abbildung 35:</b> Gainmessung bei 24 °C und 41,5 °C .....	35
<b>Abbildung 36:</b> Messung zur lokalen Homogenität. ....	36
<b>Abbildung 37:</b> Beschriftung der APDs .....	39



## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1:</b> Verwendete LED-Typen.....	12
<b>Tabelle 2:</b> Verfügbare APDs .....	39



## Danksagung

Abschließend möchte ich mich bei zahlreichen wichtigen Personen bedanken, die mir in den letzten Monaten zur Seite standen.

Zuerst möchte ich Herrn Professor Walter F. Henning für die Vergabe dieses interessanten Themas danken. Vor allem der große experimentelle Anteil hat mir große Freude bereitet. Des Weiteren danke ich meinem Betreuer Dr. Roman Gernhäuser dafür, dass er sich unzählige Male die Zeit genommen hat, meine Fragen zu beantworten und mir auch des Öfteren praktisch weitergeholfen hat.

Vielen herzlichen Dank auch an die Jungs aus der Werkstatt Michael Klöckner und Ralf Lang für die Mitarbeit bei der Herstellung des Messgehäuses. Ein weiterer Dank gilt Max Winkel für die vielen investierten Stunden, um die Datenauslese mit der FEBEX zu realisieren, auch dem restlichen E12-Team vornehmlich Tudi Le Bleis und Josef Lichtinger sei für ihre Hilfsbereitschaft gedankt.

Ein ganz besonderer Dank geht an Michael Bendel, welcher sich ausnahmslos die Zeit nahm, mir bei meinen Problemen zu helfen und spannende Diskussionen mit mir zu führen. Vielen Dank auch besonders für die letzten Wochen, in denen ich im Institut nicht anwesend sein konnte, für die hilfsbereite Vertretung.

Nicht zuletzt bin ich meinen Eltern, Familie und Freunden für die uneingeschränkte Unterstützung, in finanzieller wie auch moralischer Hinsicht, zutiefst dankbar. Meine tiefste Dankbarkeit gilt meiner Frau Tina, die vor allem in den letzten Monaten mit sehr viel Liebe und Geduld zum Gelingen dieser Bachelorarbeit beigetragen hat.





## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe.

Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden und auch nicht veröffentlicht worden.

Garching, den 24.08.2012

---

Thomas Stettner