

# **Weiterentwicklung eines Teilchendetektors für Outreach Zwecke**

Rojin Aksu

Bachelorarbeit in Physik  
angefertigt im Physikalischen Institut

vorgelegt der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der  
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität  
Bonn

Juni 2025

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

Bonn, .....  
Datum

.....  
Unterschrift

Erstprüfer: Prof. Dr. Florian Bernlochner  
Zweitprüfer: Prof. Dr. Sebastian Neubert

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>6</b>
2.1	Ionisierende Strahlung	6
2.1.1	$\beta$ -Zerfall	6
2.1.2	Schwache Wechselwirkung	7
2.2	Wechselwirkung von Teilchen mit Materie	7
2.2.1	Ionisation und Anregung	7
2.3	Detektorkomponenten	8
2.3.1	PIN-Diode	9
2.3.2	Operationsverstärker	9
2.4	Funktionsweise des Detektors	11
<b>3</b>	<b>Design des neuen Detektors</b>	<b>13</b>
3.1	Wahl des Operationsverstärkers	13
3.2	Design des PCBs	14
<b>4</b>	<b>Messungen und Ergebnisse</b>	<b>16</b>
4.1	Bestimmung der Raumladungszonenbreite der Diode	16
4.2	Einfluss von Rückkopplungsparametern	17
4.3	Signal-Rausch-Verhältnis und Rauschanalyse	17
4.4	Experimentelle Untersuchung der Detektionsrate bei variabler Versorgungsspannung	18
4.5	Stromverbrauch des Detektors	19
4.6	Vergleich des alten und neuen Detektors	19
4.7	Diskussion der Messergebnisse	20
<b>5</b>	<b>Fazit</b>	<b>22</b>
<b>6</b>	<b>Ausblick</b>	<b>24</b>
<b>A</b>	<b>Auslesecode</b>	<b>25</b>
<b>B</b>	<b>Abbildungen</b>	<b>29</b>
B.1	Vergleich der Operationsverstärker	29
B.2	PCB Design	30
B.3	Diode	30
B.4	Signalaufnahmen	32
B.4.1	Einfluss von Rückkopplungsparametern	32

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>33</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>35</b>

---

## Motivation

---

*Wie lassen sich elementare Teilchen sichtbar machen?*

Das DIY-Particle-Detector-Projekt, welches am CERN entwickelt wurde, bietet eine spannende Möglichkeit, Teilchenphysik greifbar zu machen, besonders für Schülerinnen und Schüler sowie weiteren Teilchenphysik Interessierten. Basierend auf dem Konzept von Oliver Keller nutzt es einfache physikalische Prinzipien und kostengünstige Bauteile, wodurch es sich hervorragend für Bildungsprogramme eignet [1].

Im Rahmen der Workshops des Bildungsprogramms „Netzwerk Teilchenwelt“ am Knotenpunkt Bonn erhalten Teilnehmende die Möglichkeit, diesen Detektor eigenständig zu bauen und Messungen durchzuführen. Dabei werden grundlegende Konzepte der Teilchenphysik etwa Detektorphysik, Signalverarbeitung, Elektronik und der Umgang mit Messdaten, ebenso wie praktische Fähigkeiten, z.B. das Löten der Detektoren, auf anschauliche und praxisnahe Weise vermittelt.

Die Erfahrungen aus vergangenen Workshops haben jedoch gezeigt, dass bei der Nutzung des ursprünglichen DIY-Detektors verschiedene Herausforderungen auftreten, unter anderem eine gewisse Anfälligkeit für Rauschen und Störsignale, die die Qualität der Messungen beeinträchtigen können. Gleichzeitig haben diese Erfahrungen viele Ideen zur Weiterentwicklung des Konzepts hervorgebracht, etwa durch den Einsatz optimierter Leiterplattenlayouts, verbesserter Bauteilauswahl oder auch verbesserter Auslesesoftware.

Dazu wurden in einem Zeitraum von vier Monaten systematisch elektronische Bauteile recherchiert und ausgewählt, verschiedene Schaltungsvarianten mit LTspice simuliert sowie mehrere Versionen des Leiterplattenlayouts mit KiCad entworfen und umgesetzt. Der Hauptfokus lag dabei auf dem Übergang von einer **THT**- zu einer **SMD**-Platine. Die bestückten Prototypen wurden in realen Messaufbauten getestet und hinsichtlich Signalqualität, Störanfälligkeit und Laufzeitverhalten im Batteriebetrieb untersucht.

Begleitend dazu wurde ein bestehendes Python-basiertes Ausleseprogramm weiterentwickelt, das die Signale des Detektors visualisiert und deren Analyse auch ohne komplexes Messequipment ermöglicht. Ziel war es, den DIY-Detektor nicht nur technisch zu verbessern, sondern gleichzeitig für Outreach-Veranstaltungen und schulische Workshops weiterhin leicht zugänglich und intuitiv bedienbar zu halten.

Zum einfachen Nachbau des Projekts stehen alle Schaltungen, Platinenlayouts sowie das Python-Oszilloskop zur öffentlich Verfügung.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> <https://github.com/rojinaks/diy-particle-detector-V2>

---

# Theoretische Grundlagen

---

## 2.1 Ionisierende Strahlung

Der DIY-Detektor wird für den Nachweis ionisierender Strahlung benutzt. Ionisierende Strahlung bezeichnet Strahlung, die über genügend Energie verfügt, um Elektronen aus Atomen oder Molekülen zu entfernen [2]. Dabei entstehen positiv geladene Ionen, ein Prozess, der als Ionisation bekannt ist. Ionisation kann chemische Bindungen aufbrechen und dadurch die Materie verändern. Bei ionisierender Strahlung, die aus radioaktivem Zerfall entsteht, unterscheidet man im Allgemeinen zwischen  $\alpha$ -,  $\beta$ - und  $\gamma$ -Strahlung. Diese Strahlungsarten unterscheiden sich unter anderem in ihrer Reichweite, ihrem **Ionisationsvermögen** sowie in ihrer Abschirmbarkeit.  $\alpha$ -Strahlung besteht aus zweifach positiv geladenen Heliumkernen. Sie hat eine sehr kurze Reichweite in Luft von nur wenigen Zentimetern und ein sehr hohes **Ionisationsvermögen**. Bereits ein Blatt Papier oder die äußere Hautschicht genügt, um sie vollständig abzuschirmen.  $\beta$ -Strahlung besteht aus Elektronen ( $\beta^-$ ) oder Positronen ( $\beta^+$ ) und besitzt eine mittlere Reichweite von mehreren Metern in Luft sowie ein mittleres **Ionisationsvermögen**. Zur Abschirmung genügt eine dünne Schicht aus Aluminium.  $\gamma$ -Strahlung hingegen ist eine elektromagnetische Strahlung mit sehr hoher Durchdringungsfähigkeit und geringem **Ionisationsvermögen**. Sie kann erst durch dichte Materialien wie Blei oder Beton wirksam abgeschirmt werden und ist vor allem bei äußerer Bestrahlung von Bedeutung [3],[4].

Unter den verschiedenen Formen ionisierender Strahlung ist die  $\beta$ -Strahlung im Kontext dieser Arbeit von besonderer Relevanz, da sie beim Zerfall bestimmter instabiler Atomkerne auftritt und dabei Elektronen emittiert, also jene Teilchen, die durch den eingesetzten Detektor erfasst werden können. Aus diesem Grund wird im Folgenden der  $\beta^-$ -Zerfall als zugrunde liegender physikalischer Mechanismus näher erläutert.

### 2.1.1 $\beta$ -Zerfall

Der  $\beta$ -Zerfall ist ein radioaktiver Zerfallsprozess, bei dem ein instabiler Atomkern entweder ein Elektron oder ein Positron sowie ein (Anti-)Neutrino emittiert. Dieser Prozess wird durch die schwache Wechselwirkung vermittelt. Im Rahmen des hier verwendeten DIY-Detektors wird das beim  $\beta^-$ -Zerfall entstehende Elektron nachgewiesen. Dabei wandelt sich ein Neutron, unabhängig davon, ob es gebunden oder frei vorliegt, in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino um (siehe Gleichung 2.1) [3].



### 2.1.2 Schwache Wechselwirkung

Der  $\beta$ -Zerfall unterliegt der schwachen Wechselwirkung. Diese gehört zu den vier fundamentalen Wechselwirkungen in der Physik. Im Vergleich zur elektromagnetischen oder starken Wechselwirkung ist sie deutlich schwächer und wirkt nur auf sehr kurze Distanzen [3].

Die schwache Wechselwirkung wird durch den Austausch von sogenannten  $W^\pm$ - und  $Z^0$ -Bosonen vermittelt (siehe Abb. 2.1).

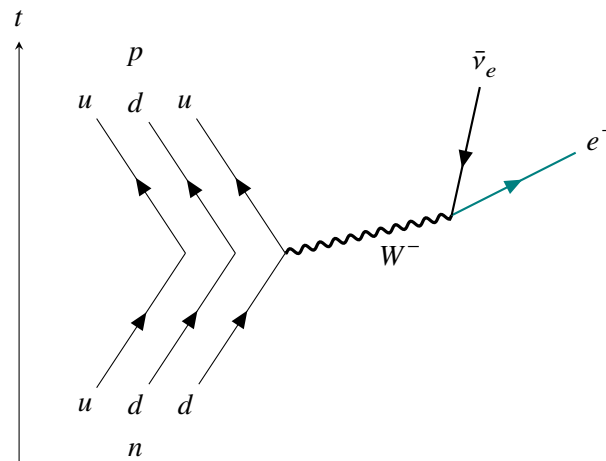


Abbildung 2.1: Feynman-Diagramm des  $\beta^-$ -Zerfall. Das Elektron ist farblich hervorgehoben.

## 2.2 Wechselwirkung von Teilchen mit Materie

Damit Teilchen überhaupt erst detektiert werden können, müssen sie mit Materie wechselwirken. Daher verwenden, im allgemeinen, Detektoren verschiedene Wechselwirkungen, um diese Teilchen zu detektieren, unter anderem [5]

- Ionisation und Anregung von Atomen des Mediums durch geladene Teilchen
- Bremsstrahlung
- Photonstreuung und Photonabsorption
- Cherenkov- und Übergangsstrahlung
- Kernreaktionen
- Schwache Wechselwirkung

Für den DIY-Detektor ist hierbei der Prozess der Ionisation und Anregung wichtig.

### 2.2.1 Ionisation und Anregung

Geladene Teilchen können beim Durchqueren eines Mediums Elektronen aus Atomen herausschlagen (Ionisation) oder sie auf ein höheres Energieniveau anregen (Anregung). Dieser Energieübertrag führt zu messbaren Effekten, wie z.B. zur Erzeugung von Sekundärelektronen, Lichtblitzen (Szintillation),

oder elektrischen Strömen – je nach Detektortyp. Die Energieverluste pro Wegstrecke werden durch die spezifische Energieverlustdichte beschrieben, die für geladene Teilchen häufig näherungsweise durch die Bethe-Bloch-Gleichung 2.2 ausgedrückt wird [5].

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \frac{Z}{A} \rho \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} - \frac{C(\beta\gamma, I)}{Z} \right] \quad (2.2)$$

mit:

$$K = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 = 0,307 \text{ MeV cm}^2 \text{ mol}^{-1}, \quad (2.3)$$

$$r_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \approx 2,8 \text{ fm} \quad (2.4)$$

### Bedeutung der Größen

- $z, \beta$  : Ladungszahl und Geschwindigkeit des Projektilteilchens
- $Z, A$  : Kernladungszahl und Massenzahl des Mediums
- $I$  : Mittlere Energie, die notwendig ist zur Ionisation des Mediums
- $T_{\max}$  : Maximaler Energieübertrag auf ein Hüllenelektron beim zentralen Stoß
- $\rho$ : Dichte des Mediums
- $\delta$  : [Dichtekorrektur](#), die bei hohen Energien wichtig wird
- $C/Z$  : [Schalenkorrektur](#), relevant für kleine  $\beta$ -Werte

Diese Beziehung erklärt, wie stark geladene Teilchen im Detektormaterial ionisieren, und liefert damit die physikalische Grundlage für die Signalbildung im DIY-Detektor.

Ein besonders relevanter Fall ist dabei das Minimum Ionizing Particle (MIP), also ein Teilchen, dessen Energieverlust im Material gerade dem Minimum der Bethe-Bloch-Kurve entspricht. Solche Teilchen sind typisch für viele Detektoranwendungen und dienen daher auch in dieser Arbeit als Referenzgröße zur Simulation und Abschätzung der erwarteten Signalhöhe.

## 2.3 Detektorkomponenten

Damit der Detektor zuverlässig funktioniert, ist es notwendig, die eingesetzten Bauteile und deren Funktionsweise näher zu betrachten. Ziel ist es, Elektronen nachzuweisen, die im Rahmen des  $\beta^-$ -Zerfalls freigesetzt werden. Dafür wird ein Detektorelement benötigt, das empfindlich auf diese Elektronen reagiert. Im hier verwendeten DIY-Detektor übernehmen Silizium-PIN-Dioden diese Aufgabe. Sie bilden zusammen mit dem Operationsverstärker das zentrale Element des Detektors und spielen eine entscheidende Rolle bei der Detektion der ionisierenden Strahlung.

### 2.3.1 PIN-Diode

Halbleiter sind Festkörper, deren elektronische Struktur durch ein Valenzband und ein darüberliegendes Leitungsband charakterisiert ist. Diese beiden Energiebereiche sind durch eine Bandlücke (verbotene Zone) voneinander getrennt. Um zur elektrischen Leitfähigkeit beizutragen, müssen Elektronen ausreichend Energie aufnehmen, um vom Valenz- ins Leitungsband überzutreten. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Leitfähigkeit, da mehr Elektronen durch die Zufuhr von thermischer bzw. kinetischer Energie die Bandlücke überwinden können.

Die Leitfähigkeit lässt sich gezielt durch Dotierung steuern. Dabei werden dem intrinsischen (reinen) Halbleitermaterial Fremdatome hinzugefügt: Donatoren (z.B. Phosphor) erzeugen eine n-Dotierung (Elektronenüberschuss), während Akzeptoren (z.B. Bor) eine p-Dotierung (Elektronenmangel) bewirken. An der Grenzschicht zwischen p- und n-dotierten Bereichen entsteht ein pn-Übergang, in dessen Bereich sich durch Ladungsträgerdiffusion ein elektrisches Feld und eine Raumladungszone ausbilden. Diese Zone wirkt stromsperrend, solange keine äußere Vorwärtsspannung anliegt [6].

Die PIN-Diode stellt eine Erweiterung der klassischen pn-Diode dar. Zwischen der p- und der n-dotierten Region befindet sich eine intrinsische (undotierte) Halbleiterschicht, die sogenannte i-Zone. Sie vergrößert die Raumladungszone erheblich und beeinflusst dadurch das elektrische Verhalten der Diode maßgeblich (siehe Abb. 2.2). Im Sperrbetrieb wirkt die dicke i-Zone isolierend und ermöglicht eine hohe Sperrspannung. Im Durchlassbetrieb werden Ladungsträger mit hoher Geschwindigkeit durch die i-Zone transportiert, was zu kurzen Schaltzeiten führt [7].

Die i-Zone ist nicht zwingend erforderlich für die Detektion geladener Teilchen, trägt jedoch maßgeblich zur Effizienz bei. Durch ihre größere Dicke erhöht sich die aktive Detektionsfläche, was die Wahrscheinlichkeit für Wechselwirkungen mit einfallenden Teilchen und damit die Nachweisbarkeit verbessert.

Im Vergleich zu herkömmlichen pn-Dioden zeichnet sich die PIN-Diode durch ihre vergrößerte i-Zone aus, die eine deutlich höhere Empfindlichkeit und eine größere aktive Detektionsfläche ermöglicht. Dadurch lassen sich auch geringe Energiemengen zuverlässig nachweisen. Die in dem Detektor verwendeten PIN Dioden sind die BPW34-SZ [8] Dioden.

### 2.3.2 Operationsverstärker

Neben den PIN-Dioden bildet der Operationsverstärker das Herzstück des Detektors. Er übernimmt die zentrale Rolle in der internen Signalverarbeitung und sorgt letztlich dafür, dass ein sichtbares bzw. messbares Ausgangssignal entsteht.

Das Schaltsymbol eines idealisierten Operationsverstärkers ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Der Eingang mit dem Pluszeichen ( $U_+$ ) ist der *nicht-invertierende Eingang*, während der Eingang mit dem Minuszeichen ( $U_-$ ) als *invertierender Eingang* bezeichnet wird.

Ein idealer Operationsverstärker strebt im geschlossenen Regelkreis mit **Rückkopplung** auf den invertierenden Eingang den Zustand an, bei dem die Spannungsdifferenz zwischen den Eingängen verschwindet, also

$$U_+ \approx U_- \quad (2.5)$$

Gleichzeitig gilt für den Ausgang des Operationsverstärkers:

$$U_{\text{out}} = A \cdot (U_+ - U_-), \quad (2.6)$$

wobei  $A$  die Leerlaufverstärkung des Operationsverstärkers bezeichnet. Da  $A \gg 1$  ist, führt bereits eine sehr kleine Differenzspannung zu einem großen Ausgangssignal. Durch geeignete **Rückkopplung** (z.B. mit

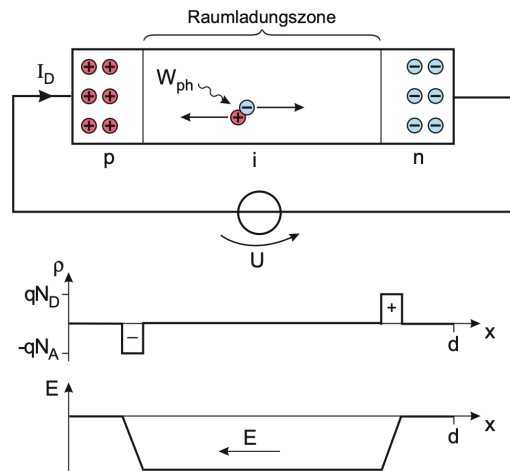


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der PIN-Diode mit der zentralen, undotierten i-Zone (intrinsischer Bereich), in der beim Durchgang ionisierender Strahlung Elektron-Loch-Paare erzeugt werden. Diese Ladungsträger werden durch das elektrische Feld getrennt und führen zu einem messbaren Stromimpuls. Unten sind die Raumladungsdichteverteilung sowie das resultierende elektrische Feld  $E$  in Sperrrichtung gezeigt. Das konstante Feld in der i-Zone sorgt für eine effiziente Drift der Ladungsträger zur Ausleselektronik. Quelle: [7]

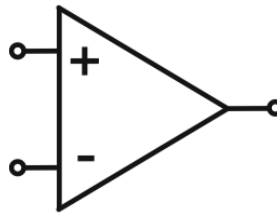


Abbildung 2.3: Schaltsymbol eines Operationsverstärkers, Quelle: [7]

Widerständen) kann die Verstärkung gezielt eingestellt werden.

In der hier verwendeten Version des DIY-Detektors kommt der Operationsverstärker AD8092 [9] zum Einsatz. Dabei handelt es sich um ein integriertes Bauteil, das zwei unabhängige Operationsverstärker in einem Gehäuse vereint (siehe Abb. 2.4).

In der vorliegenden Schaltung (siehe Abb. 2.5) übernimmt der erste Operationsverstärker die Rolle eines ladungssensitiven Verstärkers, während der zweite als invertierender Verstärker fungiert. Diese Kombination ermöglicht es, die sehr schwachen Signale, die durch die Wechselwirkung von Elektronen in der PIN-Diode entstehen, ausreichend zu verstärken und in ein auswertbares Spannungssignal umzuwandeln.

### Funktionsweise des ladungssensitiven Verstärkers

Wenn ionisierende Strahlung, wie Elektronen aus dem  $\beta^-$ -Zerfall, in der PIN-Diode Elektron-Loch-Paare erzeugt, führt dies zu einem sehr kurzen, aber messbaren Ladungsimpuls. Dieser Impuls ist jedoch extrem schwach und dauert nur wenige Mikro- oder Nanosekunden.

Der ladungssensitive Verstärker wandelt diese freigesetzte Ladung in eine proportionale Spannung um.

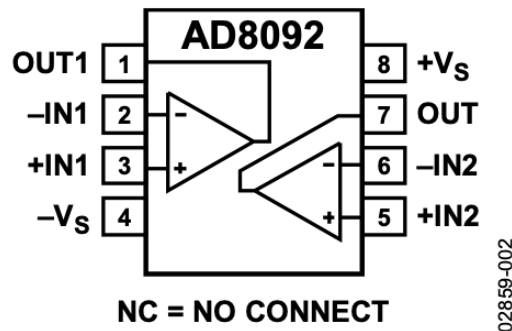


Abbildung 2.4: Schema des AD8092 Operationsverstärkers, Quelle: [9]

Dafür sind am invertierenden Eingang des Operationsverstärkers die PIN-Dioden angeschlossen, und im Rückkopplungspfad befindet sich ein kleiner Rückkopplungskondensator  $C_f$ .

Die Ausgangsspannung  $V_{out}$  des Verstärkers ist proportional zur eingespeisten Ladung  $Q$ :

$$U_{out} = -\frac{Q}{C_f} \quad (2.7)$$

Durch den Kondensator wird die Ladung „gespeichert“ und in eine messbare Spannungsänderung übersetzt. Der negative Vorfaktor ergibt sich aus dem invertierenden Eingang.

Um die Spannung später wieder auf Null zurückzubringen und eine neue Messung zu ermöglichen, wird ein großer Widerstand parallel zum Kondensator geschaltet, welcher für eine langsame Entladung sorgt.

### Signalaufbereitung mit dem invertierenden Verstärker

Das Ausgangssignal des ladungssensitiven Verstärkers ist in der Regel noch zu schwach, um direkt weiterverarbeitet oder digitalisiert zu werden. Daher wird es in einem weiteren Schritt durch einen invertierenden Verstärker sowohl verstärkt als auch phaseninvertiert.

Ein invertierender Verstärker nutzt einen Operationsverstärker mit negativer **Rückkopplung**, wobei das Eingangssignal über den Widerstand  $R_{in}$  dem invertierenden Eingang ( $U_-$ ) zugeführt wird. Der Widerstand  $R_f$  koppelt den Ausgang zurück an den invertierenden Eingang und legt gemeinsam mit  $R_{in}$  die Verstärkung fest

$$U_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}} \cdot U_{in}. \quad (2.8)$$

Durch die negative **Rückkopplung** stellt sich im stationären Zustand wieder  $U_+ \approx U_-$  ein. Da der nicht-invertierende Eingang typischerweise auf Masse liegt ( $U_+ = 0$ ), ergibt sich  $U_- \approx 0$ , man spricht von einem **virtuellen Massenpunkt**.

## 2.4 Funktionsweise des Detektors

Nach der Detektion von Elektronen und der Erzeugung eines Stromimpulses durch die PIN-Diode wird das Signal zunächst an den ersten Operationsverstärker U1 (AD8091, siehe Abb. 2.5) in einer ladungsempfindlichen Verstärkerkonfiguration weitergeleitet. Ein Spannungsteiler bestehend aus  $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$  und  $R_2 = 15 \text{ k}\Omega$  stellt die gewünschte Vorspannung am nicht-invertierenden Eingang ein. Nach der

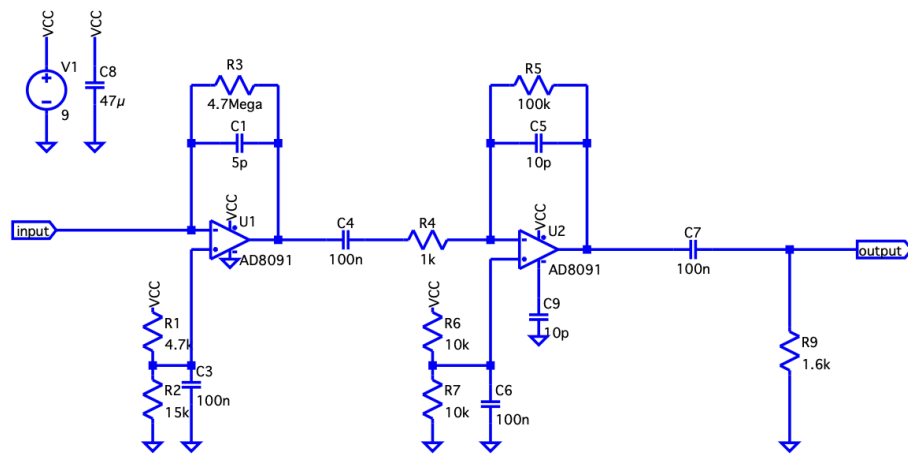


Abbildung 2.5: Schaltung des Detektors

Spannungsteilerformel

$$U_+ = U_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.9)$$

ergibt sich eine Spannung von ca. 6,85 V am Eingang  $U_+$ . Ein Rückkopplungsnetzwerk aus dem Widerstand  $R_3 = 4,7 \text{ M}\Omega$  und dem parallel geschalteten Kondensator  $C_1 = 5 \text{ pF}$  sorgt sowohl für die Umwandlung der Ladung in eine Spannung als auch für eine frequenzstabile Verstärkung und die Unterdrückung hochfrequenter Störungen.

Das so gewonnene Spannungssignal wird anschließend über den Koppelkondensator  $C_4 = 100 \text{ nF}$  und den Serienwiderstand  $R_4 = 1 \text{ k}\Omega$  an die nächste Verstärkerstufe weitergegeben. Der Koppelkondensator blockiert Gleichspannungsanteile und lässt nur den Wechselspannungsanteil passieren. Die zweite Stufe (U2, ebenfalls AD8091) ist als invertierender Verstärker eingebaut. Ein Rückkopplungsnetzwerk bestehend aus  $R_5 = 100 \text{ k}\Omega$  und  $C_5 = 10 \text{ pF}$  bestimmt die Verstärkung und verbessert das Frequenzverhalten. Eine **virtuelle Masse** bei halbem Versorgungspotential  $U_+ = 4,5 \text{ V}$  (nach Gl. 2.9) wird durch einen Spannungsteiler aus  $R_6 = R_7 = 10 \text{ k}\Omega$  erzeugt und mit dem Kondensator  $C_6 = 100 \text{ nF}$  geglättet. Dieses Referenzpotential stabilisiert den **Arbeitspunkt** der Operationsverstärker im **Single-Supply-Betrieb**. Nach dieser Stufe wird das Signal über den Entkopplungskondensator  $C_7 = 100 \text{ nF}$  und den Lastwiderstand  $R_9 = 1,6 \text{ k}\Omega$  ausgegeben, welche einen Hochpassfilter bilden. Der Kondensator  $C_9 = 10 \text{ nF}$  ist direkt zwischen dem Ausgang des Operationsverstärkers und Masse geschaltet. Er wirkt dabei als **Bypass-Kondensator** und bildet zusammen mit der parasitären **Impedanz** einen einfachen Tiefpassfilter.

---

## Design des neuen Detektors

---

Beim Design des neuen Detektors lag der Fokus darauf, die einfache Struktur und Übersichtlichkeit der ursprünglichen Schaltung beizubehalten. Ziel war es, die Anordnung der Bauteile so zu gestalten, dass die Funktionsweise der Schaltung (siehe Abb. 2.5) weiterhin erkennbar bleibt, um das Layout verständlich und nachvollziehbar zu halten. Ein zentrales Element des neuen Designs war der Austausch des ursprünglich verwendeten Operationsverstärkers TL2072 durch einen rauscharmeren Typ. Zum Einsatz kam der AD8092, der bessere Eigenschaften in Bezug auf Rauschverhalten und Geschwindigkeit bietet. Darüber hinaus wurde das PCB-Layout so optimiert, dass wichtige Signalverbindungen möglichst kurz gehalten werden. Kurze Leiterbahnen reduzieren die parasitäre Kapazität und verringern dadurch die Anfälligkeit gegenüber Störeinflüssen.

Zusätzlich trug die Umstellung von THT- auf SMD-Bauteile wesentlich zur Verkürzung der Signalwege bei, da SMD-Komponenten eine kompaktere Anordnung auf der Platine ermöglichen und damit eine platzsparende Layoutgestaltung erlauben. Diese Entscheidung war insbesondere deshalb bedeutend, weil sie parasitäre Effekte wie unerwünschte Induktivitäten und Kapazitäten reduziert, die sich negativ auf das Hochfrequenzverhalten auswirken können. Beide Maßnahmen, die kürzeren Signalwege und die reduzierte parasitäre Kopplung, verbessern das Hochfrequenzverhalten deutlich und leisten einen wichtigen Beitrag zur Rauschunterdrückung des Detektors.

Zur weiteren Reduktion von Störungen wurde im Bereich der empfindlichen Bauteile eine strukturierte Vias-Anordnung umgesetzt, die als Faradayscher Käfig fungiert. Diese Maßnahme verbessert die Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen und trägt wesentlich zur Rauschreduzierung des Detektors bei.

### 3.1 Wahl des Operationsverstärkers

Die Wahl des Operationsverstärkers hing von mehr oder weniger drei Faktoren ab. Der neue Operationsverstärker sollte (i) kostengünstig sein (ii) leicht verfügbar sein und (iii) besser in der Simulation funktionieren als der TLE2072. Ein Vergleich der beiden Operationsverstärker wurde mithilfe einer LTSpice-Simulation durchgeführt und ist in Abbildung B.1 dargestellt.

Tabelle 3.1 vergleicht die wesentlichen elektrischen Kenngrößen der beiden Operationsverstärker. Für den DIY-Detektor ist vor allem die Kombination aus Bandbreite, Slew-Rate und Rauschverhalten entscheidend.

Der AD8092 bietet mit einer Bandbreite von 70 bis 110 MHz und einer Slew-Rate von bis zu 105 bis 170 V/ $\mu$ s deutlich bessere Hochfrequenzeigenschaften als der TLE2072, der mit 9,4 MHz und 45 V/ $\mu$ s eher für langsamere oder präzise Analoganwendungen optimiert ist. Diese Eigenschaften machen

Eigenschaft	TLE2072	AD8092
Hersteller	Texas Instruments	Analog Devices
Bandbreite (GBW)	9,4 MHz	70 bis 110 MHz
Slew Rate	45 V/ $\mu$ s	105 bis 170 V/ $\mu$ s
Eingangsrauschen @ 10 kHz	17 nV $\sqrt$ Hz	16 nV $\sqrt$ Hz
Stromaufnahme pro Verstärker	1,35 bis 2,2 mA	4,4 bis 5 mA

Tabelle 3.1: Vergleich der Operationsverstärker TLE2072 und AD8092, basierend auf den Herstellerdatenblättern [10] und [9]

den AD8092 besser geeignet für schnelle Signalverläufe, wie sie bei Detektoranwendungen auftreten können.

Auch das Eingangsrauschen beider Verstärker ist vergleichbar ( 17 nV $\sqrt$ Hz und 16 nV $\sqrt$ Hz), wodurch sich der AD8092 keine Nachteile in Bezug auf das Rauschverhalten einhandelt, trotz seiner höheren Bandbreite.

Ein Nachteil des AD8092 ist seine höhere Stromaufnahme pro Verstärker (4,4 bis 5 mA gegenüber 1,35 bis 2,2 mA beim TLE2072).

Insgesamt ist der AD8092 für den vorliegenden Anwendungsfall die leistungsfähigere Wahl, da er eine schnellere Signalverarbeitung ermöglicht, ohne signifikante Unterschiede beim Rauschverhalten hinzunehmen. Die höhere Leistungsaufnahme ist für den prototypischen Betrieb akzeptabel.

## 3.2 Design des PCBs

Beim Design des PCBs wurde darauf geachtet, die Bauteile so anzuordnen, dass die ursprüngliche Schaltung weiterhin gut nachvollziehbar bleibt. Dies erleichtert insbesondere Schülerinnen und Schülern das Verständnis des Aufbaus und der Funktionsweise. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, die Bauteile möglichst nah aneinander zu platzieren, um die Länge der Signalwege zu minimieren und damit das Rauschen gering zu halten. Ein besonders wichtiger Aspekt war die Positionierung der PIN-Dioden in unmittelbarer Nähe zum Operationsverstärker. Da die von den PIN-Dioden erzeugten Signale sehr schwach und empfindlich gegenüber Störungen sind, sorgt ein kurzer Signalweg dafür, dass die Signalqualität erhalten bleibt und unerwünschte Einflüsse minimiert werden. Das PCB-Layout beinhaltet eine doppelte Massefläche (Ground Plane) auf der Ober- und Unterseite der Leiterplatte. Diese Masseflächen dienen dazu, elektromagnetische Interferenzen abzuschirmen und das Gesamtrauschen zu reduzieren. Zur weiteren Rauschunterdrückung und zur Abschirmung gegen elektromagnetische Störungen wurde das PCB mit zahlreichen Vias entlang des Randes versehen, die die oberen und unteren Masseflächen elektrisch miteinander verbinden (siehe Abb. 3.1). Diese Anordnung wirkt wie ein Faradayscher Käfig, der das empfindliche Eingangssignal vor externen Störeinflüssen schützt. Im Layout wurden für die Versorgungsspannung (VDD) bewusst breitere Leiterbahnen mit einer Breite von 0,500 mm statt 0,25 mm verwendet. Dies reduziert den Widerstand und Spannungsabfall auf der Versorgungsleitung, verbessert die Stabilität der Stromversorgung und minimiert Störgeräusche, die durch Spannungsschwankungen entstehen könnten. Insgesamt zielt das PCB-Design darauf ab, eine möglichst störungsarme und stabile Umgebung für die empfindliche Detektionsschaltung zu schaffen, um präzise und zuverlässige Messergebnisse zu ermöglichen.

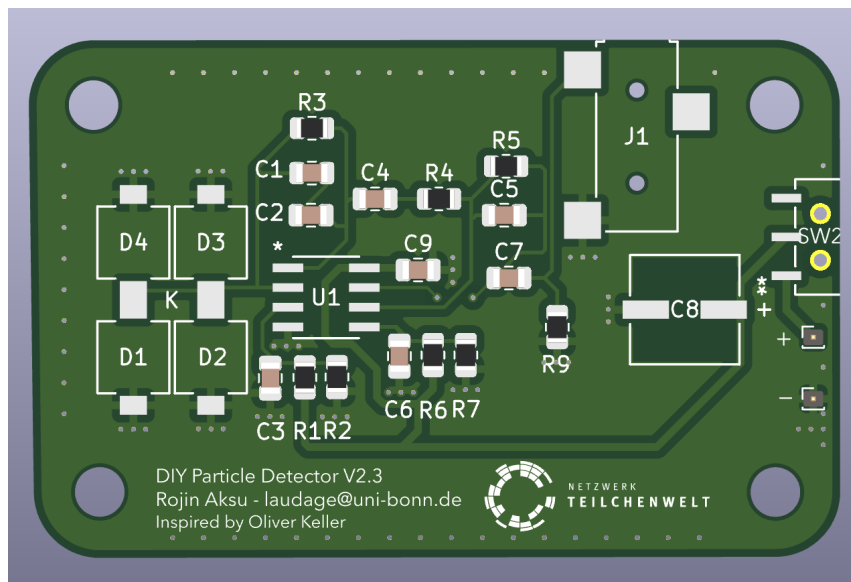


Abbildung 3.1: Erste realisierte Version (2.3) des DIY-Detektors basierend auf dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen PCB-Layout

---

## Messungen und Ergebnisse

---

Zur experimentellen Charakterisierung des entwickelten DIY-Detektors wurden verschiedene Messungen durchgeführt. Im Fokus stand die Überprüfung der Funktionsweise, die quantitative Bestimmung zentraler elektrischer Größen sowie die Analyse der Signalqualität. Insbesondere lag der Fokus auf der Bestimmung der Raumladungszonenbreite der verwendeten PIN-Dioden, der Einfluss der Rückkopplungsparameter, der Analyse des Signal-Rausch-Verhältnisse, der Detektionsrate bei variabler Spannung und der Erfassung des Stromverbrauchs.

### 4.1 Bestimmung der Raumladungszonenbreite der Diode

Im DIY-Detektor kommt die PIN-Diode BPW34-SZ zum Einsatz. Um abschätzen zu können, wie viel Energie tatsächlich im Detektor deponiert und somit registriert wird, ist es entscheidend, die Breite der Raumladungszone zu kennen. Diese bestimmt bei Halbleiterdetektoren das aktive Detektionsvolumen, also den Bereich, in dem Ladungsträger durch ionisierende Strahlung erzeugt und gesammelt werden können. Die Raumladungszone entsteht beim Anlegen einer Sperrspannung am pn-Übergang der Diode. Sie ist frei von freien Ladungsträgern und dehnt sich mit steigender Sperrspannung aus. Um die Ausdehnung dieser Zone experimentell zu bestimmen, wurde die Diode in Sperrrichtung geschaltet und in einem Messaufbau (siehe Abb. B.3) mit unterschiedlichen Spannungen bis zur maximal zulässigen Sperrspannung von 32 V [8] betrieben. Die gemessenen Kapazitätswerte in Abhängigkeit von der Sperrspannung sind in Abbildung 4.1(a) dargestellt. Dort ist ein deutlicher Abfall der Kapazität mit steigender Spannung zu erkennen. Dies entspricht den theoretischen Erwartungen und steht im Einklang mit den im Datenblatt angegebenen Grafik (siehe Abb. B.4).

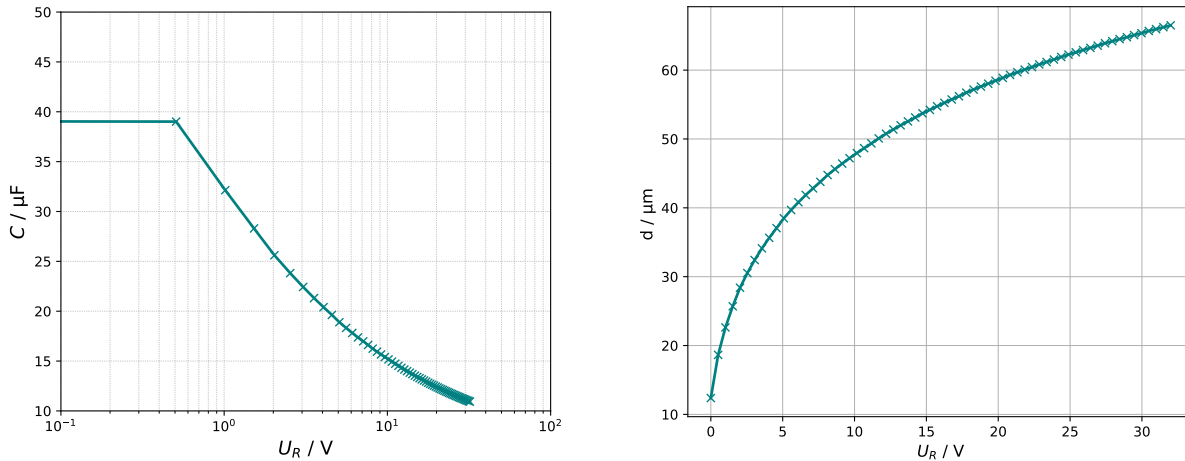
Die Breite der Raumladungszone  $d$  hängt von der anliegenden Sperrspannung  $V$ , der Permittivität von Silizium  $\epsilon$ , der Vakuumpermittivität  $\epsilon_0$  sowie von der effektiven Detektorfläche  $A$  ab. Sie lässt sich über die gemessene Kapazität  $C(V)$  mit folgender Beziehung bestimmen [11]

$$d(V) = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{C(V)}, \quad (4.1)$$

wobei  $\epsilon = 11,7$  [12],  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$  [13] und  $A = 7,02 \text{ mm}^2$  [8]

Mit Gleichung 4.1 wurde die Raumladungszonenbreite als Funktion der angelegten Sperrspannung bestimmt und in Abbildung 4.1(b) dargestellt. Die Versorgungsspannung des DIY-Detektors ist eine herkömmliche 9 V Batterie. Durch den ersten Spannungsteiler in der Schaltung (siehe Abb. 2.5) bekommt

der Operationsverstärker eine Spannung von  $U_{\text{out}} = 6,85 \text{ V}$ . Unter diesen Bedingungen entspricht die berechnete Raumladungszonenbreite etwa  $(42,3342 \pm 0,0048) \mu\text{m}$ .



(a) Kapazität gegen Sperrspannung

(b) Raumladungszonenbreite gegen Sperrspannung

Abbildung 4.1: Die Kapazität der Diode wurde in Abhängigkeit von der ansteigenden Sperrspannung bei einer Frequenz von  $f = 1 \text{ MHz}$  und einer Temperatur von  $T = 20^\circ\text{C}$  gemessen, wobei die Temperatur in einer Klimakammer konstant gehalten wurde. Die maximale Sperrspannung beträgt nach [8]  $32 \text{ V}$ . Auf Grundlage dieser Messdaten wurde die Breite der Raumladungszone nach Gleichung 4.1 berechnet und grafisch dargestellt.

## 4.2 Einfluss von Rückkopplungsparametern

Zur Untersuchung des Signalverhaltens bei unterschiedlichen Rückkopplungskonstanten wurden verschiedene Kombinationen von Widerständen und Kapazitäten eingesetzt und miteinander verglichen. Zunächst wurde der Detektor mit der in Abb. 2.5 gezeigten Rückkopplungskonfiguration getestet. Danach kamen Rückkopplungswiderstände von  $100 \text{ k}\Omega$ ,  $400 \text{ k}\Omega$ ,  $600 \text{ k}\Omega$  und  $4,7 \text{ M}\Omega$  und Kondensatoren  $C_1/C_2 = 10 \text{ pF}$ ,  $39 \text{ pF}$  zum Einsatz.

Die Messergebnisse (Abb. B.5) zeigen deutlich, dass die Wahl des Widerstands sowohl die Breite als auch die Höhe des Signals beeinflusst. Dies bestätigt die theoretische Erwartung, dass der erste Operationsverstärker ein sich entladendes Kondensatorsignal verarbeitet.

## 4.3 Signal-Rausch-Verhältnis und Rauschanalyse

Zur Bewertung der Signalqualität wurde ein Amplitude-basiertes Signal-Rausch-Verhältnis (engl. Signal-to-Noise Ratio, kurz: SNR) für den ursprünglichen und den neuen Detektor bestimmt. Dazu wurden mit dem Oszilloskop jeweils 50 Einzelmessungen aufgezeichnet und gemittelt, um das Rauschen zu unterdrücken und die charakteristische Pulsform sichtbar zu machen.

Das Signal-Rausch-Verhältnis ist ein Maß für die Qualität eines Signals relativ zum Hintergrundrauschen. Klassisch wird es als Verhältnis der mittleren Signal- zur mittleren Rauschleistung definiert und entspricht dem Quadrat der Effektivwerte [14]:

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Rauschen}}} = \frac{\text{RMS}_{\text{Signal}}^2}{\text{RMS}_{\text{Rauschen}}^2} \quad (4.2)$$

Da in diesem Fall jedoch ausschließlich getriggerte Einzelereignisse vorliegen und keine kontinuierliche Rauschaufzeichnung ohne Signal, wurde das SNR alternativ über die maximale Amplitude des gemittelten Pulses und die Effektivspannung des Rauschens abgeschätzt [15]:

$$\text{SNR}_{\text{dB}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{A_{\text{Signal}}}{\text{RMS}_{\text{Rauschen}}} \right) \quad (4.3)$$

Der amplitudenbasierte Signal-Rausch-Abstand wurde unter identischen Triggerbedingungen bei  $-200$  mV für beide Detektoren im Aluminiumgehäuse und unter lichtdichten Bedingungen bestimmt. Dabei ergibt sich für den alten Detektor ein Wert von 17,5 dB und für den neuen Detektor ein Wert von 18,4 dB. Dieser Unterschied fällt auf den ersten Blick zugunsten des neuen Detektors aus.

Allerdings genügt beim alten Detektor bereits eine deutlich flachere Triggerschwelle von etwa  $-46$  mV, um zuverlässig zwischen Signal und Rauschen zu unterscheiden. Der neue Detektor hingegen benötigt eine deutlich tiefere Schwelle von etwa  $-150$  mV, um eine klare Signal-Rausch-Trennung zu ermöglichen.

Dies weist darauf hin, dass der alte Detektor bei kleineren Signalpegeln eine höhere Empfindlichkeit und bessere Unterscheidbarkeit zwischen Nutzsignal und Rauschen bietet. Die bei  $-200$  mV ermittelten Peak-SNR-Werte sind zwar methodisch vergleichbar, bilden jedoch nicht die tatsächliche Betriebsqualität der beiden Detektoren ab.

## 4.4 Experimentelle Untersuchung der Detektionsrate bei variabler Versorgungsspannung

Um den DIY-Detektor nicht nur mit einer festen 9 V-Batterieversorgung zu betreiben, sondern das Verhalten bei verschiedenen Spannungswerten zu untersuchen, wurde anstelle der Batterie ein regelbares Netzteil verwendet. Damit konnten Versorgungsspannungen im Bereich von 3 V bis zur maximal zulässigen Betriebsspannung des verwendeten Operationsverstärkers AD8092, welcher nach [9] bei 12 V ist, eingestellt werden (siehe Tabelle 4.1).

Dabei zeigte sich, dass der neue DIY-Detektor erst ab etwa 7,2 V zuverlässig arbeitet, während der ältere Detektor bereits ab 4 V einsetzbar ist. Dieser Unterschied lässt sich unter anderem durch das höhere Grundrauschen im neuen Aufbau erklären, das erst bei ausreichender Versorgungsspannung überwunden wird. Zur quantitativen Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen Versorgungsspannung und Detektionsverhalten wurde für jeden Spannungswert die Zeit gemessen, die benötigt wurde, um 50 Ereignisse zu registrieren. So konnte die Detektionsrate als Funktion der Versorgungsspannung bestimmt und analysiert werden.

Alle Effizienzmessungen wurden bei einer konstanten Triggerschwelle von  $-200$  mV durchgeführt. Die ermittelte Ereignisrate beschreibt somit die effektive Detektoreffizienz oberhalb dieser festen Schwelle. Schwächere Signale, die unterhalb der Triggerbedingung liegen, wurden nicht erfasst. Die Analyse erlaubt daher Rückschlüsse auf das Verstärkungsverhalten und die Signaldynamik des Systems bei variabler Versorgungsspannung.

Versorgungsspannung $U$ [V]	Zeit $t$ [s]	Ereignisrate [1/s]
7.2	374.4	0.134
8.0	320.4	0.156
8.4	267.6	0.187
8.8	262.8	0.190
9.0	251.4	0.199
9.6	201.0	0.249
10.0	303.0	0.165
10.4	204.0	0.245
11.0	375.6	0.133
11.2	246.0	0.203
11.6	306.0	0.163
11.8	270.0	0.185
12.0	321.0	0.156

Tabelle 4.1: Detektionsrate bei variabler Versorgungsspannung. Angegeben sind die Zeiten zur Registrierung von 50 Ereignissen sowie die daraus berechneten Ereignisraten für eine Triggerschwelle bei  $-200$  mV

## 4.5 Stromverbrauch des Detektors

Zur Messung des Stromverbrauchs des Detektors wurde ein niederohmiger Widerstand ( $1 \Omega$ ) als Shunt in Serie mit der Spannungsquelle geschaltet. Der Spannungsabfall über dem Shunt wurde mit einem Digitalmultimeter gemessen und betrug  $(10,0 \pm 0,1)$  mV. Daraus lässt sich der Stromverbrauch der 9 V-Batterie direkt über das ohmsche Gesetz bestimmen.

$$I = \frac{U_{\text{shunt}}}{R_{\text{shunt}}} = \frac{10 \text{ mV}}{1 \Omega} = 10 \text{ mA}$$

Bei einem idealen konstanten Stromverbrauch dieser Größenordnung würde eine handelsübliche 9 V-Alkaline Batterie mit einer Kapazität von 525 mA h [16] eine Betriebsdauer von etwa 52,5 Stunden ermöglichen. In der Praxis ist die tatsächliche Betriebszeit jedoch kürzer, da der Detektor unterhalb einer bestimmten Versorgungsspannung, nach Abschnitt 4.4 unter 7,2 mV, nicht mehr zuverlässig arbeitet. Das liegt an dem internen Spannungsteiler, der die Operationsverstärker nur mit einem Bruchteil der Batteriespannung versorgt. Sinkt die Batteriespannung zu weit ab, kann die Schaltung nicht mehr korrekt betrieben werden.

## 4.6 Vergleich des alten und neuen Detektors

Für den Vergleich wurden jeweils 50 Einzelereignisse bei einer Triggerschwelle von  $-200$  mV aufgenommen und gemittelt. Die Darstellung erfolgt mit einer Zeitauflösung von 100 ns pro Kästchen auf der X-Achse und 50 mV pro Kästchen auf der Y-Achse im Oszilloskop. Die resultierenden Mittelwerte ermöglichen eine direkte Gegenüberstellung der Signalformen des alten und neuen Detektors (siehe Abb. 4.2).

Abbildung 4.2 zeigt die resultierenden Signale des neuen (gelb) und des alten (blau) Detektors.

Das Signal des neuen Detektors weist eine deutlich höhere Rauschkomponente auf, was auf eine stärkere Verstärkung oder ein geringeres Signalfiltering schließen lässt. Darüber hinaus ist die Impulsbreite geringer, was auf eine kürzere Entladezeit im ladungssensitiven Verstärker hindeuten könnte. Auch der Overshoot des Signals ist beim neuen Aufbau schwächer ausgeprägt.

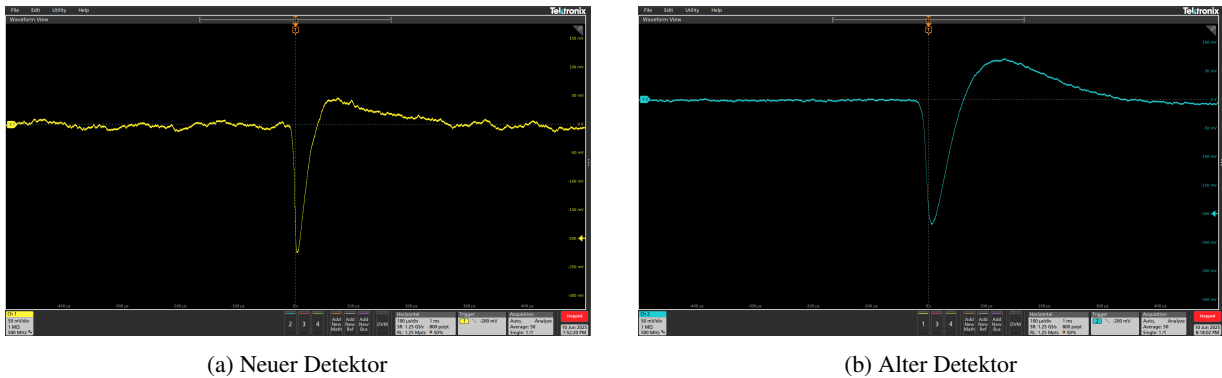


Abbildung 4.2: Vergleich der Ausgangssignale des überarbeiteten Detektors (gelb) und der ursprünglichen Version (blau). Es wurden jeweils 50 Ereignisse gemittelt. Die horizontale Skalierung beträgt jeweils  $100 \mu\text{s}/\text{div}$ , die vertikale Skalierung  $50 \text{ mV}/\text{div}$ .

Im Gegensatz dazu zeigt das Signal des alten Detektors eine flachere, rauschärmere und breitere Pulsform. Insgesamt wirkt das Signal des älteren Detektors stabiler.

## 4.7 Diskussion der Messergebnisse

Die Messergebnisse der vorhergehenden Abschnitte zeigen, dass der neue DIY-Detektor gegenüber dem ursprünglichen Aufbau sowohl Vor- als auch Nachteile aufweist.

Der in Abschnitt 4.1 bestimmte Wert der Raumladungszonenbreite liegt im erwarteten Bereich, sodass die Kapazitätsmessung als erfolgreich gewertet werden kann. Dies bestätigt, dass die eingesetzten Dioden in diesem Aufbau wie erwartet funktionieren.

Während das gemessene Signal-Rausch-Verhältnis unter den gegebenen Bedingungen leicht verbessert erscheint (siehe Abschnitt 4.3), erfordert der neue Detektor eine deutlich tiefere Triggerschwelle. Dies deutet auf ein erhöhtes internes Grundrauschen hin, das eine zuverlässige Signalverarbeitung erst ab höheren Spannungen erlaubt.

Mögliche Ursachen für dieses Verhalten könnten in der Auslegung des Rückkopplungsnetzwerks liegen. Insbesondere der verwendete Rückkopplungswiderstand im ladungssensitiven Verstärker beeinflusst die Signalform maßgeblich (vgl. Abschnitt 4.2). Ein kleiner Widerstand begünstigt eine schnelle Entladung des Kondensators, was die Zeitauflösung verbessert, gleichzeitig jedoch auch die Rauschkomponente verstärken kann. Ein größerer Widerstand könnte in zukünftigen Versionen zur Reduktion des Rauschpegels beitragen und sollte gezielt getestet werden.

Darüber hinaus könnte auch der verwendete Operationsverstärker zum erhöhten Rauschpegel beitragen. Mit einer sehr hohen Bandbreite und Slew-Rate ist der AD8092 für Hochgeschwindigkeitsanwendungen ausgelegt. Diese Eigenschaften ermöglichen zwar eine schnelle Signalverarbeitung, erhöhen jedoch auch die Empfindlichkeit gegenüber hochfrequentem Eigenrauschen und externen Störungen. Zusätzlich stellt sich die Frage, ob externe elektromagnetische Störungen einen messbaren Einfluss auf die Noise-Charakteristik haben. Das PCB wurde mittels strukturierter Vias und Masseflächen so gestaltet, dass eine Art Faradayscher Käfig zur Abschirmung empfindlicher Bereiche entsteht (siehe Abschnitt 3.2). Allerdings könnte das eingesetzte Aluminiumgehäuse, sofern nicht korrekt geerdet oder leitend mit der Massefläche verbunden, die Wirksamkeit dieser Abschirmung beeinträchtigen. Unter bestimmten Bedingungen nicht optimal kontaktierte Gehäuseflächen als ungewollte Kopplungspfade für elektromagnetische Störungen wirken. In zukünftigen Versionen könnte eine gezielte Verbesserung der Gehäuseanbindung zur Massefläche zur

weiteren Störunterdrückung beitragen.

Insgesamt liefern die Ergebnisse dieser Arbeit wichtige Hinweise zur Verbesserung von Signalqualität und Detektionseffizienz. Gleichzeitig werden technische Schwächen sichtbar, die in künftigen Ausbaustufen gezielt adressiert werden sollten, insbesondere im Hinblick auf [Rückkopplung](#), Verstärkerauswahl und Abschirmung.

---

## Fazit

---

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde der DIY-Particle-Detector von Oliver Keller weiterentwickelt. Ziel der Arbeit war die Verbesserung eines bestehenden DIY-Detektorkonzepts im Hinblick auf Signalqualität, Störanfälligkeit und Benutzerfreundlichkeit. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein geeigneter Operationsverstärker ausgesucht (siehe Tab. 3.1) und mithilfe von LTspice simulativ untersucht. Darauf aufbauend wurde ein neues Leiterplattendesign entwickelt, wobei von THT- auf SMD-Bauteile umgestellt wurde (siehe Abb. 3.1) und die Signalintegrität durch optimierte Masseführung und Abschirmung verbessert werden konnte.

Zur experimentellen Charakterisierung des Systems wurden Messungen zur Raumladungszonenbreite der verwendeten PIN-Dioden, zum Einfluss verschiedener Rückkopplungsparameter sowie zur Signal-Rausch-Problematik durchgeführt. Zusätzlich wurden die Detektionsrate bei variabler Versorgungsspannung sowie der Stromverbrauch des Detektors bestimmt und ausgewertet.

Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass das ursprüngliche Ziel der effektiven Rauschunterdrückung nicht vollständig erreicht werden konnte. Zwar liefert der neue Detektor bei einer Triggerschwelle von  $-200\text{ mV}$  einen leicht verbesserten Peak-Signal-to-Noise-Wert (siehe Abschnitt 4.3), jedoch nur unter dieser vergleichsweise hohen Schwelle. Im Gegensatz dazu ist der ursprüngliche Detektor bereits bei einer deutlich flacheren Triggerschwelle von etwa  $-46\text{ mV}$  in der Lage, zwischen Signal und Rauschen zuverlässig zu unterscheiden. Der neue Aufbau benötigt hingegen eine Schwelle von rund  $-150\text{ mV}$ , um ein vergleichbar klares Signal zu liefern. Dieser Aspekt ist entscheidend, da niedrigerenergetische Signale dadurch schwerer vom Rauschen zu unterscheiden sind, was die zuverlässige Detektion erschwert.

Die experimentelle Bestimmung der Raumladungszonenbreite ergab einen Wert von etwa  $42,3\text{ }\mu\text{m}$  (siehe Abschnitt 4.1) bei der im Detektor anliegenden Sperrspannung. Dieser Wert liefert eine Abschätzung für das aktive Detektionsvolumen der PIN-Diode und damit eine Grundlage für die Interpretation der gemessenen Signalhöhen.

Im Rahmen der Spannungsstudie konnte gezeigt werden, dass der neue Detektor erst ab einer Versorgungsspannung von ca.  $7,2\text{ V}$  zuverlässig arbeitet. Darunter wird die interne Referenzspannung zu niedrig, um die Operationsverstärker im Single-Supply-Betrieb korrekt zu betreiben. Dies limitiert die Betriebsdauer bei batteriebetriebem Einsatz und sollte bei der praktischen Verwendung berücksichtigt werden.

Trotz der genannten Einschränkungen konnte durch die Kombination aus simulationsgestütztem Design, gezielter Bauteilauswahl und strukturierter Testung ein funktionsfähiger Prototyp entwickelt werden. Der Aufbau bleibt übersichtlich, kostengünstig und eignet sich nach wie vor für Outreach-Zwecke. Besonders die Umstellung auf SMD-Komponenten und die Weiterentwicklung der Auslesesoftware tragen zur Modernisierung und Zugänglichkeit des Systems bei. Der Detektor bildet damit eine solide Grundlage für

---

zukünftige Optimierungen, wie sie etwa in der geplanten Version 2.4 bereits angedacht sind.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern nicht nur zentrale Erkenntnisse zur technischen Leistungsfähigkeit des überarbeiteten Prototyps, sondern identifizieren auch gezielte Optimierungspotenziale, insbesondere im Hinblick auf Rauschunterdrückung, Rückkopplungsgestaltung und die Auswahl geeigneter Verstärkerbauteile. Die Entscheidung zugunsten eines hochfrequenten Operationsverstärkers wie des AD8092 erwies sich als vorteilhaft für die Signalverstärkung, brachte jedoch auch eine erhöhte Grundrauschkomponente mit sich. Diese lässt sich in zukünftigen Versionen voraussichtlich durch eine angepasste Schaltung weiter reduzieren.

Trotz dieser Einschränkungen eignet sich der Detektor weiterhin hervorragend für den praktischen Einsatz in Outreach Programmen und Schüler-Workshops. Seine kompakte Bauweise, der klare Schaltungsaufbau und das weiterentwickelte Ausleseprogramm machen ihn zu einem vielseitig einsetzbaren Instrument zur anschaulichen Vermittlung grundlegender Konzepte der Teilchenphysik.

Die Arbeit macht deutlich, wie man mit Simulation, gezielten Tests und stetiger Überarbeitung auch einfache DIY-Systeme technisch verbessern und gleichzeitig für Outreach Projekte oder Workshops besser nutzbar machen kann.

## Ausblick

„Ein Experiment, das nicht gelingt, ist oft wertvoller als zehn, die planmäßig verlaufen.“  
— *Heinz Maier-Leibnitz (zugeschrieben)*

Im Sinne dieses Zitats kann das ursprüngliche Ziel der Bachelorarbeit, die effektive Unterdrückung des Störrauschens, zwar als nicht vollständig erreicht gelten, dennoch wurden im Verlauf des Projekts wesentliche Erkenntnisse gewonnen. Insbesondere wurde ein besseres Verständnis für die Grenzen der aktuellen Detektorhardware sowie für die kritischen Einflussfaktoren des Signals gewonnen. Da das Verhalten des realen Detektors nicht den Erwartungen und Ergebnissen der Simulation entsprach, ergaben sich neue Ansätze zur Weiterentwicklung. Infolge dessen wurde mit der Konzeption einer überarbeiteten Version 2.4 begonnen, in der die Rauschunterdrückung weiterhin im Fokus steht, nachdem sie in Version 2.3 nicht im gewünschten Maß realisiert werden konnte.

### Version 2.4

Um den Anforderungen des kommenden Workshops im Juli gerecht zu werden, wurde die Version 2.4 überarbeitet und angepasst. Dabei wurde der Kabelanschluss von 2,5 mm auf 3,5 mm geändert, da für die Workshops überwiegend 3,5 mm-Kabel zur Verfügung stehen. Außerdem wurden zwei Testpunkte hinzugefügt, um Zwischenmessungen zu ermöglichen. Dadurch lässt sich die Rückkopplung des ladungssensitiven Verstärkers gezielter analysieren und untersuchen für weitere und verbesserte Versionen.

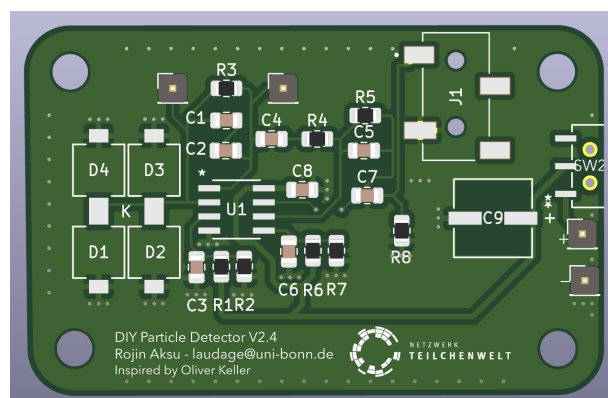


Abbildung 6.1: Version 2.4

## Auslesecode

Um nicht nur den Detektor, sondern auch die Ausleseelektronik kostengünstig und breit zugänglich zu gestalten, wurde ein Python-basierter Code entwickelt, der die Funktionalität eines einfachen Oszilloskops übernimmt. Ziel war es, eine benutzerfreundliche und flexible Lösung zur Signalvisualisierung bereitzustellen, die sich insbesondere für einfache Projekte ohne professionelles Messequipment eignet. Dabei handelt es sich um eine Weiterführung des Codes von Prof. Dr. Günter Quast aus dem KIT [17].

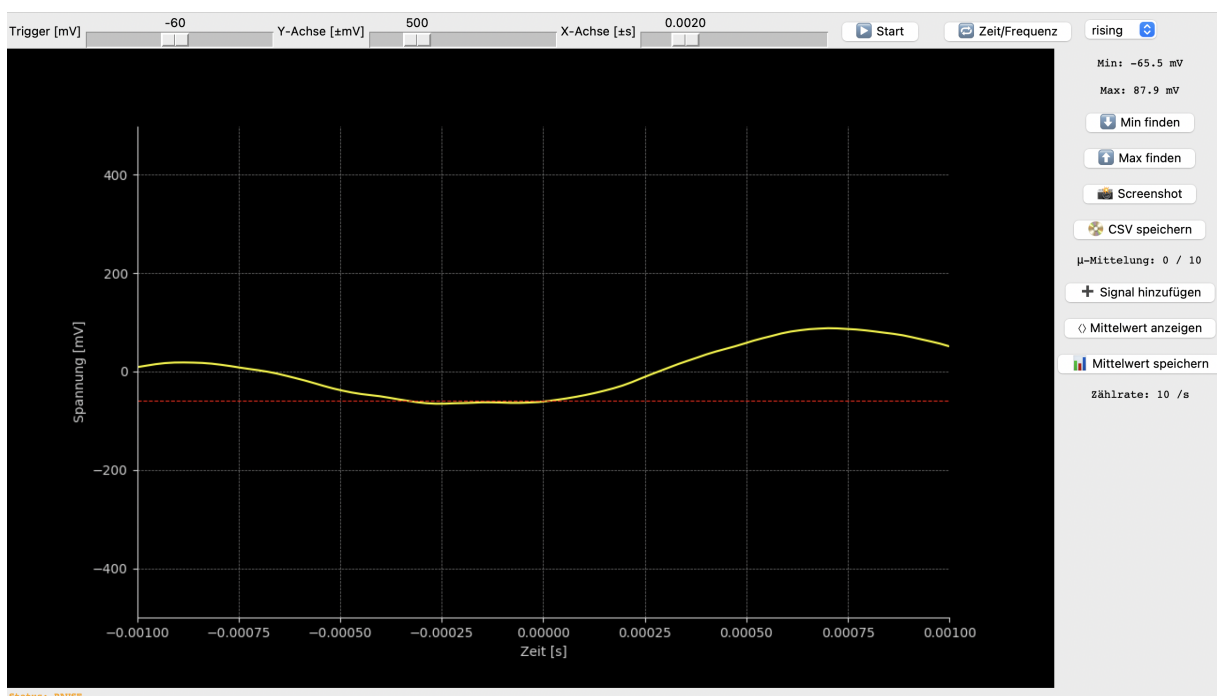


Abbildung A.1: Beispielhafte Darstellung eines Eingangssignals mit dem eigens entwickelten Python-Oszilloskop. Sichtbar sind das gemessene Spannungssignal (gelb), ein exemplarisch gesetzter Trigger bei  $-60$  mV (rote Linie) sowie die benutzerdefinierbaren Achseneinstellungen für Zeit- und Spannungsbereich. Die GUI erlaubt zusätzlich Mittelwertbildung, Signalvergleiche und Exportfunktionen (CSV, Screenshot).

Es wurden verschiedene Funktionen ergänzt, um das Python-Oszilloskop insbesondere für den Einsatz in Workshops und in eigenständigen Projekten möglichst benutzerfreundlich und vielseitig nutzbar zu gestalten. So ist es möglich, die aufgenommenen Messdaten im CSV-Format zu exportieren, um sie anschließend in

Programmen wie Python, MATLAB oder Excel weiterzuverarbeiten. Zur schnellen Dokumentation der Signale dient eine integrierte Screenshot-Funktion, die die aktuelle Ansicht mitsamt Achsenskalierung und Triggerinformationen speichert.

```

1 t = np.linspace(-self.x_range.get() / 2, self.x_range.get() / 2, len(data))
2 df = pd.DataFrame({"Zeit_[s]": t, "Spannung_[mV]": data})
3 df.to_csv(f"oszi_{ts}.csv", index=False)

```

Listing A.1: Export der gemessenen Daten im CSV-Format

Eine zentrale Funktion stellt die Triggerung dar, bei der ein benutzerdefinierter Schwellenwert (z.B.  $-60$  mV) gesetzt werden kann, um wiederkehrende Pulse zuverlässig zu detektieren und zeitlich stabil darzustellen. Ergänzend dazu erlaubt die Mittelwertbildung über mehrere Signale hinweg eine Reduktion des Rauschens und damit eine verbesserte Auswertung der zugrundeliegenden Signalstruktur.

```

1 if direction == "rising":
2     trigger_indices = np.where((prev < trigger) & (curr >= trigger))[0]
3 else:
4     trigger_indices = np.where((prev > trigger) & (curr <= trigger))[0]

```

Listing A.2: Trigger-Bedingung zur Detektion eines steigenden Signalsprungs

Zur flexiblen Darstellung können Zeit- und Spannungsachsen frei gewählt werden, wodurch sich das Oszilloskop sowohl für langsame als auch schnelle Signalverläufe eignet. Darüber hinaus ist eine Frequenzanalyse mittels schneller Fourier-Transformation (FFT) integriert, mit der spektrale Eigenschaften des Eingangssignals sichtbar gemacht werden können. Für komplexere Messaufgaben steht eine Mehrkanalunterstützung zur Verfügung, mit der mehrere Eingangssignale parallel aufgenommen und verglichen werden können. Eine zentrierte Zeitachse um  $t = 0$  ermöglicht schließlich die symmetrische Betrachtung von Signalverläufen rund um ein getriggertes Ereignis.

All diese Funktionen sind in einer übersichtlichen grafischen Benutzeroberfläche (GUI) zusammengeführt, die vollständig in Python implementiert wurde und eine einfache sowie intuitive Bedienung ermöglicht.

Die Spannungsachse des Python-Oszilloskops zeigt keine absolut kalibrierten Werte, da das Eingangssignal über eine handelsübliche USB-Soundkarte erfasst wird, ohne eine explizite Umrechnung in physikalische Spannung vorzunehmen. Die Abtastung erfolgt mit einer Samplerate von 48 kHz bei einer Auflösung von 16 Bit. Der darstellbare Spannungsbereich hängt vom verwendeten Audiointerface ab; in diesem Fall beträgt der Eingangsbereich 5 V DC.

Die Rohdaten werden vom Betriebssystem als Ganzzahlen im Bereich  $[-32768, +32767]$  bereitgestellt. Im Python-Code erfolgt eine lineare Skalierung dieser Werte durch den Faktor  $GAIN = 500$ , um die Anzeige in Millivolt zu ermöglichen. Diese Umrechnung ist jedoch nur als Näherung zu verstehen, da keine messtechnische Kalibrierung mit Referenzspannungen vorgenommen wurde.

```

1 FS = 48000          # Samplingrate in Hz
2 BLOCKSIZE = 4096   # Anzahl Samples pro Datenblock
3 GAIN = 500         # Umrechnung von Rohwerten in Millivolt

```

Listing A.3: Parameter für die Datenerfassung

Die resultierende vertikale Achse liefert somit lediglich relative Spannungswerte, die jedoch für qualitative Signalvergleiche, Triggerung, Mittelwertbildung und Frequenzanalyse ausreichend sind. Eine genaue absolute Spannungsangabe wäre nur durch eine externe Kalibrierung oder die Verwendung spezialisierter Hardware möglich. Obwohl das Python-Oszilloskop bereits zahlreiche Funktionen bietet, besteht auch weiterhin Entwicklungspotenzial, wie etwa in der Automatisierung des Ablaufs nach einer Triggerung, da das Programm derzeit nach jedem Triggerereignis gestoppt wird.

Ein Beispiel hierfür ist die Signalerfassung mit dem älteren Detektormodell, da dieses ein geringeres Rauschen aufweist.

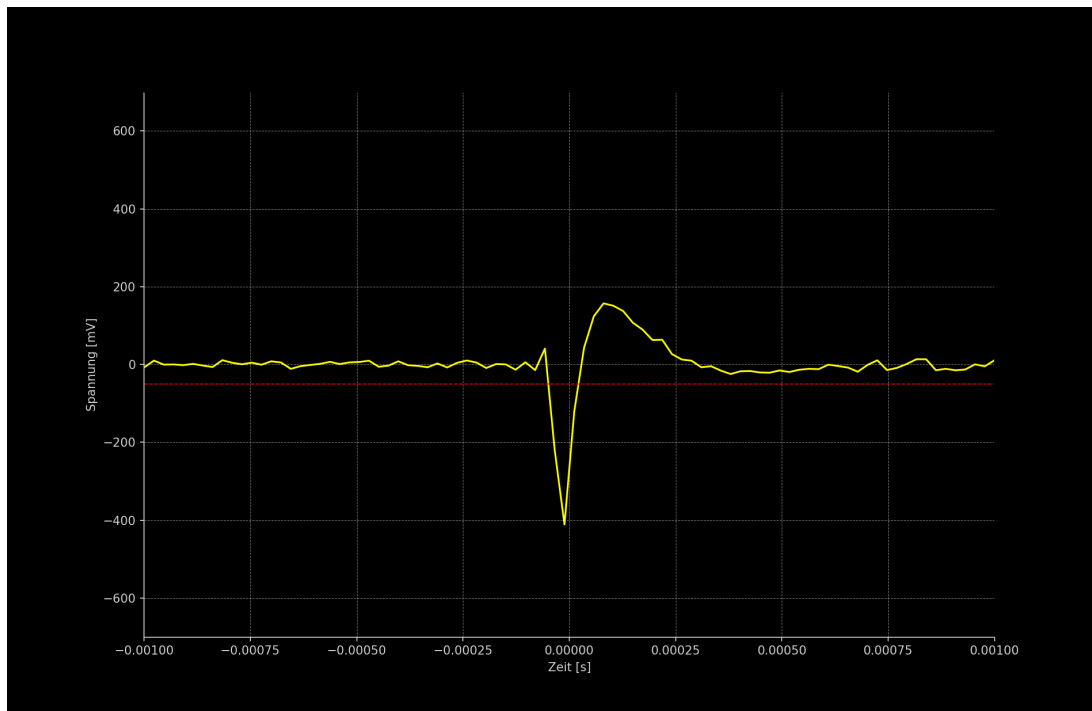


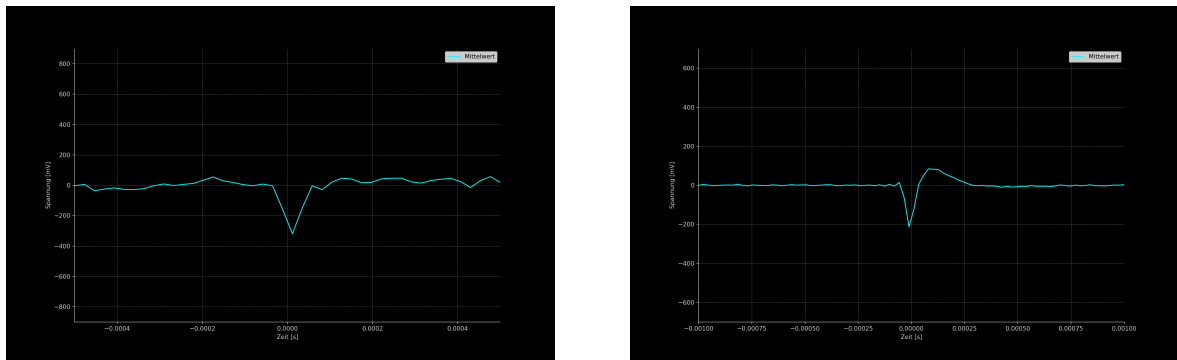
Abbildung A.2: Beispielhafte Signalaufnahme mit dem älteren Detektor. Das Signal zeigt einen Puls mit einer Amplitude von etwa  $-40$  mV

Zur weiteren Analyse wurden dennoch zusätzliche Signale sowohl mit dem älteren als auch mit dem neuen Detektor aufgenommen. Dabei wurden jeweils zehn Einzelmessungen durchgeführt und anschließend gemittelt, um das Rauschen zu reduzieren und die Charakteristik der Signale deutlicher herauszuarbeiten und die Funktionsfähigkeit der Benutzeroberfläche zu beurteilen.

```
1 def plot_average(self):
2     if not self.accumulated_signals:
3         return
4     min_len = min(len(sig) for sig in self.accumulated_signals)
5     trimmed = [s[:min_len] for s in self.accumulated_signals]
6     avg = np.mean(trimmed, axis=0)
7     t = np.linspace(-self.x_range.get() / 2, self.x_range.get() / 2, len(avg)
8         )
9     self.avg_data = avg
10    self.avg_time = t
11    self.showing_average = True
```

Listing A.4: Funktion zur Mittelwertbildung über mehrere Signale

Die in Abbildung A.3 dargestellten Signale zeigen die gemittelten Pulsverläufe zweier unterschiedlicher Detektoren. Der Puls des neuen Detektors (a) hat eine deutlich höhere Amplitude und eine schärfere negative Spitze, welches auf eine höhere gesammelte Ladung oder einen schnelleren Verstärker hindeutet. Das Signal des alten Detektors (b) ist flacher und breiter, dies zeigt eine längere Entladezeit oder eine andere Kopplungskapazität an.



(a) Signal mit neuem Detektor

(b) Signal mit altem Detektor

Abbildung A.3: Vergleich zweier gemittelter Signale mit unterschiedlichen Detektoren bei identischem Triggerpegel von  $-200\text{ mV}$

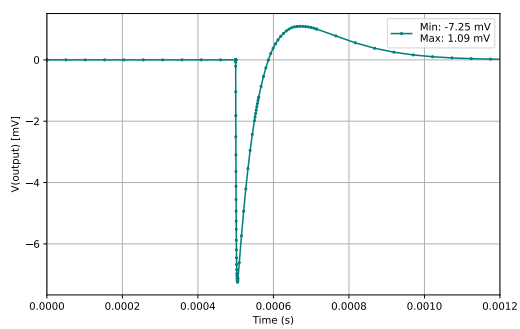
Ein Vergleich der Pulsbreiten zeigt, dass der neue Detektor eine schmalere Zeitstruktur erzeugt. Dies könnte auf eine geringere Integrationszeit oder ein schnelleres Rücksetzverhalten zurückzuführen sein. Das Verhalten der Signale vor und nach dem Peak deutet zudem auf eine symmetrische Ladungsverteilung ohne nennenswertes Nachschwingen hin.

Beide Signale zeigen nach der Mittelung ein deutlich reduziertes Rauschen. Das verbleibende Grundrauschen ist beim neuen Detektor etwas ausgeprägter, was auf eine höhere Verstärkung oder ein geringfügig höheres Eigenrauschen der Ausleseschaltung hindeuten könnte. Eine exakte Analyse des Rauschverhaltens ist jedoch ohne eine absolute Kalibrierung der vertikalen Achse nicht möglich.

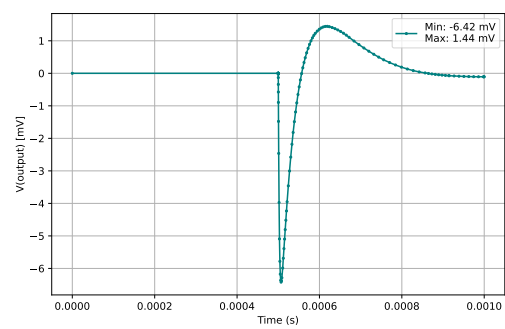
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der neue Detektor eine höhere Signalamplitude mit steilerer Flanke liefert, während der alte Detektor ein glatteres, aber schwächeres Signal produziert.

# Abbildungen

## B.1 Vergleich der Operationsverstärker



(a) AD8091



(b) TLE2072

Abbildung B.1: Vergleich der Operationsverstärker mit einer LTspice-Simulation

## B.2 PCB Design

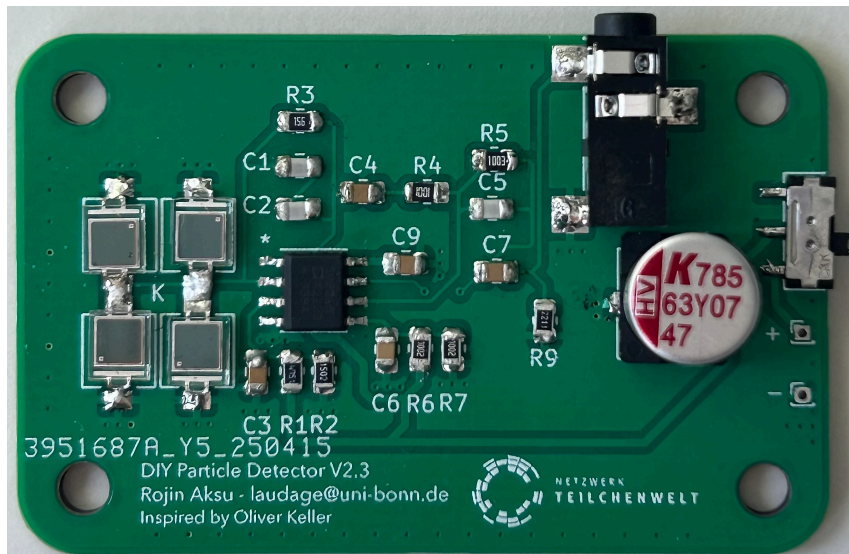


Abbildung B.2: Aufgebautes PCB

## B.3 Diode

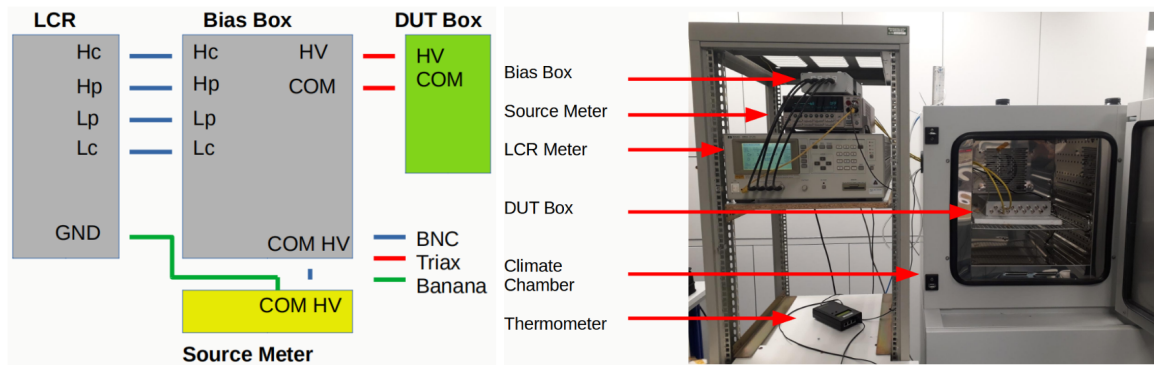


Abbildung B.3: Messaufbau zur Bestimmung der Raumladungszonenbreite der Diode mittels kapazitiver C(V)-Messung. Die Diode befindet sich in der DUT-Box innerhalb einer Klimakammer. Über den Source Meter wird eine Bias-Spannung angelegt, während das LCR-Meter die Kapazität erfasst, Quelle: [18]

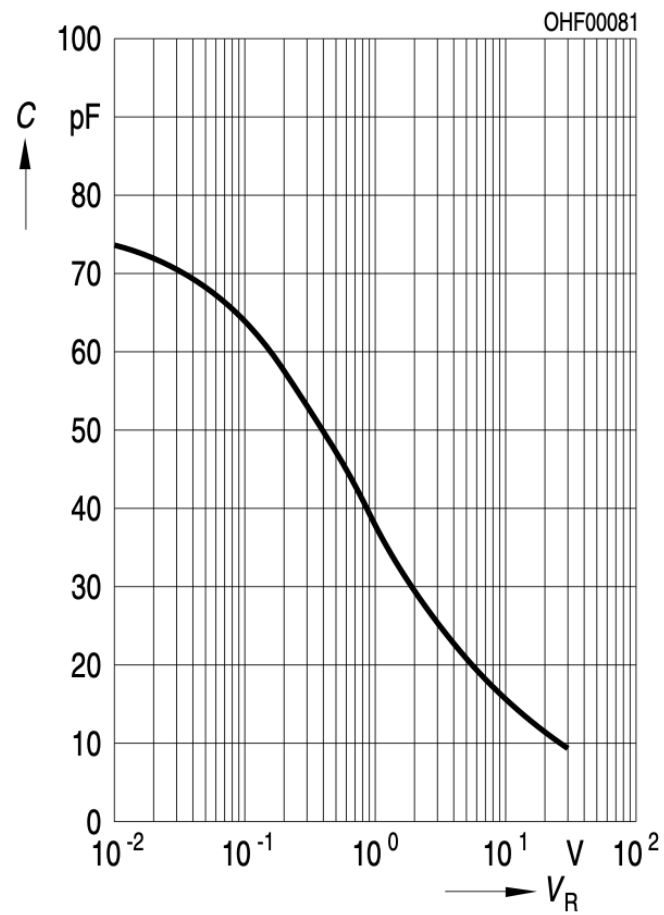
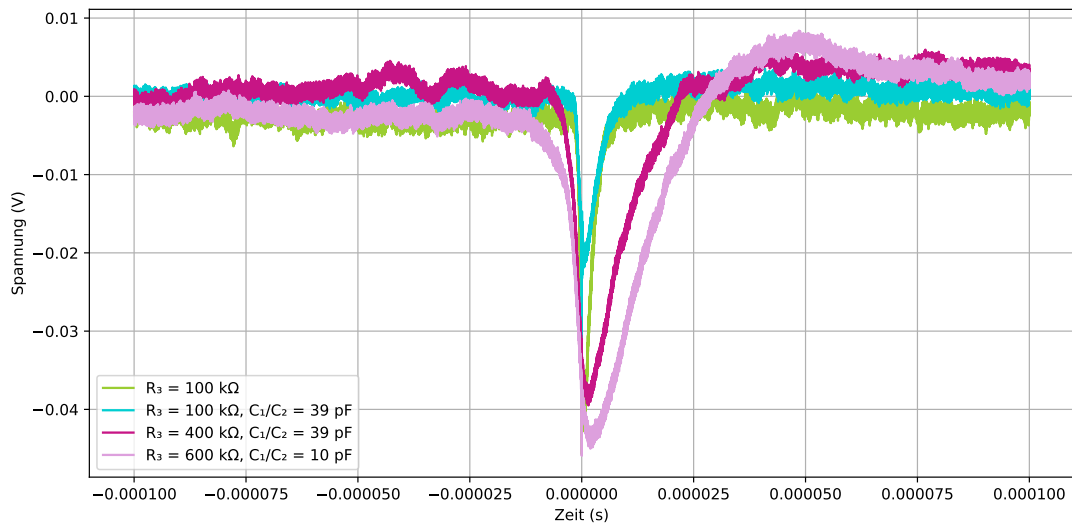


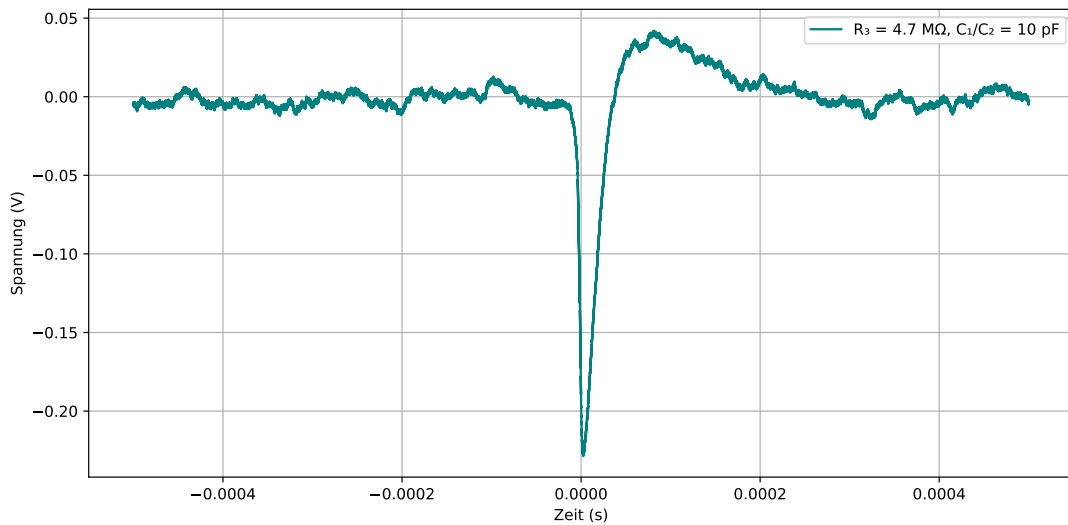
Abbildung B.4: Gemessene Kapazität gegen Sperrspannung aus dem Datenblatt der BPW34-SZ Diode [8]. Bei einer Frequenz von  $f = 1$  MHz und Temperatur  $T = 25^\circ\text{C}$

## B.4 Signalaufnahmen

### B.4.1 Einfluss von Rückkopplungsparametern



(a) Vergleich verschiedener Kombinationen von  $R_3$ ,  $C_1$  und  $C_2$  bis 600 k $\Omega$



(b) Signalverlauf bei einem hohem Rückkopplungswiderstand  $R_3 = 4,7 \text{ M}\Omega$

Abbildung B.5: Vergleich der Signale bei verschiedenen Widerständen und Kapazitäten in der Rückkopplung eines ladungssensitiven Operationsverstärkers. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem  $R_3$  die Signaldauer breiter wird und mit kleineren  $C_1/C_2$  die Signalhöhe kleiner.

---

# Abbildungsverzeichnis

---

2.1	Feynman-Diagramm des $\beta^-$ -Zerfall. Das Elektron ist farblich hervorgehoben. . . . .	7
2.2	Schematische Darstellung der PIN-Diode mit der zentralen, undotierten i-Zone (intrinsischer Bereich), in der beim Durchgang ionisierender Strahlung Elektron-Loch-Paare erzeugt werden. Diese Ladungsträger werden durch das elektrische Feld getrennt und führen zu einem messbaren Stromimpuls. Unten sind die Raumladungsdichteverteilung sowie das resultierende elektrische Feld E in Sperrrichtung gezeigt. Das konstante Feld in der i-Zone sorgt für eine effiziente Drift der Ladungsträger zur Ausleseelektronik. Quelle: [7] . . . . .	10
2.3	Schaltensymbol eines Operationsverstärkers, Quelle: [7] . . . . .	10
2.4	Schema des AD8092 Operationsverstärkers, Quelle: [9] . . . . .	11
2.5	Schaltung des Detektors . . . . .	12
3.1	Erste realisierte Version (2.3) des DIY-Detektors basierend auf dem in Abschnitt 3.2 beschriebenen PCB-Layout . . . . .	15
4.1	Die Kapazität der Diode wurde in Abhängigkeit von der ansteigenden Sperrspannung bei einer Frequenz von $f = 1$ MHz und einer Temperatur von $T = 20^\circ\text{C}$ gemessen, wobei die Temperatur in einer Klimakammer konstant gehalten wurde. Die maximale Sperrspannung beträgt nach [8] 32 V. Auf Grundlage dieser Messdaten wurde die Breite der Raumladungszone nach Gleichung 4.1 berechnet und grafisch dargestellt. . . . .	17
4.2	Vergleich der Ausgangssignale des überarbeiteten Detektors (gelb) und der ursprünglichen Version (blau). Es wurden jeweils 50 Ereignisse gemittelt. Die horizontale Skalierung beträgt jeweils 100 $\mu\text{s}/\text{div}$ , die vertikale Skalierung 50 mV/div. . . . .	20
6.1	Version 2.4 . . . . .	24
A.1	Beispielhafte Darstellung eines Eingangssignals mit dem eigens entwickelten Python-Oszilloskop. Sichtbar sind das gemessene Spannungssignal (gelb), ein exemplarisch gesetzter Trigger bei $-60$ mV (rote Linie) sowie die benutzerdefinierbaren Achseneinstellungen für Zeit- und Spannungsbereich. Die GUI erlaubt zusätzlich Mittelwertbildung, Signalvergleiche und Exportfunktionen (CSV, Screenshot). . . . .	25
A.2	Beispielhafte Signalaufnahme mit dem älteren Detektor. Das Signal zeigt einen Puls mit einer Amplitude von etwa $-40$ mV . . . . .	27
A.3	Vergleich zweier gemittelter Signale mit unterschiedlichen Detektoren bei identischem Triggerpegel von $-200$ mV . . . . .	28
B.1	Vergleich der Operationsverstärker mit einer LTspice-Simulation . . . . .	29
B.2	Aufgebautes PCB . . . . .	30

B.3	Messaufbau zur Bestimmung der Raumladungszonenbreite der Diode mittels kapazitiver C(V)-Messung. Die Diode befindet sich in der DUT-Box innerhalb einer Klimakammer. Über den Source Meter wird eine Bias-Spannung angelegt, während das LCR-Meter die Kapazität erfasst, Quelle: [18] . . . . .	30
B.4	Gemessene Kapazität gegen Sperrspannung aus dem Datenblatt der BPW34-SZ Diode [8]. Bei einer Frequenz von $f = 1$ MHz und Temperatur $T = 25^\circ\text{C}$ . . . . .	31
B.5	Vergleich der Signale bei verschiedenen Widerständen und Kapazitäten in der Rückkopplung eines ladungssensitiven Operationsverstärkers. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem $R_3$ die Signaldauer breiter wird und mit kleineren $C_1/C_2$ die Signalhöhe kleiner. . . . .	32

---

# Tabellenverzeichnis

---

3.1	Vergleich der Operationsverstärker TLE2072 und AD8092, basierend auf den Herstellerdatenblättern [10] und [9] . . . . .	14
4.1	Detektionsrate bei variabler Versorgungsspannung. Angegeben sind die Zeiten zur Registrierung von 50 Ereignissen sowie die daraus berechneten Ereignisraten für eine Triggerschwelle bei $-200\text{ mV}$ . . . . .	19

---

# Literatur

---

- [1] Ozel, O. *DIY Particle Detector*. [https://github.com/ozel/DIY\\_particle\\_detector/tree/master](https://github.com/ozel/DIY_particle_detector/tree/master). Aufgerufen am 27. Mai 2025.
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. *Überblick: Ionisierende Strahlung*. Aufgerufen am 6. Juni 2025. 2024. URL: <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/strahlenschutz/ionisierende-strahlung/ueberblick-ionisierende-strahlung>.
- [3] B. Povh u. a. *Teilchen und Kerne: Eine Einführung in die physikalischen Konzepte*. 9. Aufl. Springer-Lehrbuch. Aufgerufen am 18. Juni 2025. Springer Spektrum, 2014. ISBN: 978-3-642-37822-5. DOI: [10.1007/978-3-642-37822-5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37822-5). URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-37822-5>.
- [4] K. Bethge und G. Walter. *Kern- und Teilchenphysik*. 7. Aufl. Springer, 2004. ISBN: 978-3-540-40887-8. DOI: [10.1007/978-3-662-08061-0](https://doi.org/10.1007/978-3-662-08061-0). URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-08061-0.pdf>.
- [5] H. Kolanoski und N. Wermes. *Teilchendetektoren: Grundlagen und Anwendungen*. Aufgerufen am 9. Juni 2025. Berlin, Heidelberg: Springer, 2016. ISBN: 978-3-662-45350-6. DOI: [10.1007/978-3-662-45350-6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-45350-6). URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-45350-6>.
- [6] H. Spieler. *Semiconductor Detector Systems*. Online-Version, aufgerufen am 19.06.2025. Oxford University Press, 2005. ISBN: 978-0-19-852784-8. URL: [https://www-physics.lbl.gov/~spieler/misc\\_stuff/text/sent\\_02jul05/text\\_pdf/Semiconductor\\_Detector\\_Systems.pdf](https://www-physics.lbl.gov/~spieler/misc_stuff/text/sent_02jul05/text_pdf/Semiconductor_Detector_Systems.pdf).
- [7] F. Goebel. *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Aufgerufen am 8. Juni 2025. 2019. URL: [https://www.raffia.ch/content/docplus/Halbleiter-Schaltungstechnik\\_Goebel\\_\(2019\).pdf](https://www.raffia.ch/content/docplus/Halbleiter-Schaltungstechnik_Goebel_(2019).pdf).
- [8] OSRAM Opto Semiconductors GmbH. *BPW 34 S – Silicon PIN Photodiode*. Version 1.7. Datenblatt, aufgerufen am 9. Juni 2025. OSRAM Opto Semiconductors GmbH. Regensburg, Germany, 26. Mai 2021. URL: <https://look.ams-osram.com/m/1f206a499ac1f0b2/original/BPW-34-S.pdf>.
- [9] Analog Devices Inc. *AD8091/AD8092: Low Cost, High Speed, Rail-to-Rail Amplifiers*. Datenblatt, [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8091\\_8092.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8091_8092.pdf), aufgerufen am 9. Juni 2025. 2009.
- [10] Texas Instruments. *TLE2072: Low-Noise, High-Speed, Precision Operational Amplifier*. Datenblatt, aufgerufen am 9. Juni 2025. 2015. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tle2072.pdf>.

- 
- [11] O. Keller u. a. „Smartphone and Tablet-Based Sensing of Environmental Radioactivity: Mobile Low-Cost Measurements for Monitoring, Citizen Science, and Educational Purposes“. In: *Sensors* 19.19 (2019). Open Access, aufgerufen am 9. Juni 2025, S. 4264. DOI: [10.3390/s19194264](https://doi.org/10.3390/s19194264). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/19/4264>.
- [12] U. Tietze, C. Schenk und E. Gamm. *Halbleiter-Schaltungstechnik* 2. 16. Aufl. Aufgerufen am 9. Juni 2025. Springer Vieweg, 2021. ISBN: 978-3-662-62607-8. DOI: [10.1007/978-3-662-62608-5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-62608-5). URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-62608-5>.
- [13] National Institute of Standards and Technology (NIST). *vacuum electric permittivity*. Aufgerufen am 9. Juni 2025. 2023. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ep0>.
- [14] Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften. *Messung verrauschter Signale*. [https://www.uni-due.de/imperia/md/content/ofm/messung\\_verrauschter\\_signale.pdf](https://www.uni-due.de/imperia/md/content/ofm/messung_verrauschter_signale.pdf). Aufgerufen am 13. Juni 2025. 2014.
- [15] D. G. für EMV-Technologie e.V. *Signal-Rausch-Verhältnis in der Messtechnik*. [https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectID=ba9b9b9b\\_e081\\_515d\\_74652eb6549544da](https://www.demvt.de/publish/viewfull.cfm?objectID=ba9b9b9b_e081_515d_74652eb6549544da). Aufgerufen am 17.06.2025.
- [16] Ansmann. *Industrial Alkaline Battery 9V E-block – Specifications*. Datenblatt, aufgerufen am 9. Juni 2025. 2015. URL: [https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D600/ANS\\_IND\\_10X9V.pdf](https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D600/ANS_IND_10X9V.pdf).
- [17] G. Quast. *DIY Particle Detector – Educator’s Guide*. <https://github.com/PhyPiDAQ/EducatorsGuide/blob/main/experiments/DIY-ParticleDetector.md>. Aufgerufen am 16. Juni 2025.
- [18] A. V. Himmelreich. *Development of a Capacitance Measurement Setup for Silicon Pixel Sensors*. Bachelor’s thesis. Bachelorarbeit am Physikalischen Institut. Bonn, Germany, Aug. 2021.

---

# Glossar

---

- Arbeitspunkt** Der Arbeitspunkt bezeichnet den Betriebszustand eines aktiven Bauelements, bei dem bestimmte elektrische Größen wie Spannung und Strom im Gleichgewicht sind. [12](#)
- Bypass** ein Kondensator zur Unterdrückung hochfrequenter Störungen, meist zwischen Versorgungsspannung und Masse geschaltet. [12](#)
- Dichtekorrektur** Korrekturterm in der Bethe-Bloch-Formel, der den Effekt der Polarisierung des Mediums bei hohen Teilchengeschwindigkeiten berücksichtigt. [8](#)
- Impedanz** komplexer Wechselstromwiderstand, der aus einem ohmschen Anteil und einem frequenzabhängigen Anteil (kapazitiv oder induktiv) besteht. [12](#)
- Ionisationsvermögen** Maß dafür, wie stark ein Teilchen (z.B. ein geladener Teilchenstrahl) die Ionisation von Atomen oder Molekülen in einem Medium verursacht. [6](#)
- PCB** steht für Printed Circuit Board (Leiterplatte). Eine PCB ist eine elektrisch isolierende Platte, auf der elektronische Bauteile befestigt und über Leiterbahnen elektrisch miteinander verbunden werden. [13–15](#), [20](#), [33](#)
- Rückkopplung** Gezielte Rückführung des Ausgangssignals an einen Eingang eines Operationsverstärkers, um dessen Verstärkungsverhalten und Stabilität zu beeinflussen. [9](#), [11](#), [21](#)
- Schalengkorrektur** Korrekturterm in der Bethe-Bloch-Formel, der bei niedrigen Teilchengeschwindigkeiten die endliche Bindungsenergie der Elektronen im Atom berücksichtigt. [8](#)
- Single-Supply-Betrieb** Betriebsart elektronischer Schaltungen mit nur einer Versorgungsspannung; typischerweise liegt Masse auf 0V und die Versorgung auf z.B. +9V, wodurch Signalverarbeitung nur im positiven Bereich erfolgt. [12](#), [22](#)
- SMD** steht für Surface-Mounted Device (oberflächenmontiertes Bauteil). Im Gegensatz zur Durchsteckmontage (THT) werden SMD-Bauteile direkt auf der Oberfläche der Leiterplatte verlötet. [5](#), [13](#), [22](#)
- THT** steht für Through-Hole Technology (Durchsteckmontage). Dabei werden die Anschlussbeinchen elektronischer Bauteile durch Bohrlöcher in der Leiterplatte gesteckt und auf der Unterseite verlötet. [5](#), [13](#), [22](#)

**Via** Ein Via ist eine leitfähige Durchkontaktierung auf einer Leiterplatte (PCB), die verschiedene Leiterbahnebenen elektrisch verbindet. Es handelt sich dabei um ein kleines, mit Kupfer ausgekleidetes Bohrloch, das Signale zwischen den Lagen leitet. [13](#), [14](#), [20](#)

**virtuelle Masse** Ein Punkt in einer Schaltung, der sich elektrisch wie Masse verhält, aber nicht direkt mit Masse verbunden ist. Auch als virtueller Massenpunkt bezeichnet. [12](#)

**Virtueller Massenpunkt** Ein Punkt in einer Schaltung, der sich elektrisch wie Masse verhält, aber nicht direkt mit Masse verbunden ist. [11](#)