

# Charakterisierung eines passiven Signalwandlers zur ToT-basierten Auslese eines Szintillationsdetektors

Bachelor-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science (B.Sc.) im Studiengang Physik



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

**BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL**  
**Fakultät für Mathematik und Naturwissenschaften**

Der Fachgruppe Physik vorgelegt von

**Paula Lippert**

Erstprüfer: Herr Prof. Dr. Karl-Heinz Kampert

Zweitprüfer: Herr Dr. Christian Pauly

Wuppertal, Oktober 2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Messaufbau</b>	<b>5</b>
2.1	Detektionsprinzip . . . . .	5
2.2	Versuchsaufbau . . . . .	6
2.3	Aufbau der Platine . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Konfiguration der Messung</b>	<b>9</b>
3.1	Betriebsspannung am PMT . . . . .	9
3.2	Filterung der Pulse . . . . .	10
3.3	Einfluss der Kapazität $C_S$ . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Funktionsprinzip des A2ToTLC</b>	<b>13</b>
4.1	Transformation der Pulsform . . . . .	13
4.2	Reale Zusammenhänge zwischen den Parametern . . . . .	14
4.3	Schwellenwert im Pythoncode . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Datenauswertung</b>	<b>19</b>
5.1	Auswertung der Messung mit $C_S = 47 \text{ pF}$ . . . . .	19
5.2	Auswertung der Messung mit $C_S = 100 \text{ pF}$ . . . . .	22
5.3	Auswertung der Messung mit $C_S = 330 \text{ pF}$ . . . . .	27
5.4	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	31
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>38</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau mit Beschriftung der Geräte . . . . .	6
2	Abbildung der Platine . . . . .	8
3	Skizze der Platine . . . . .	8
4	Vergleich der PMT Ausgangssignale bei 1250 V und 1500 V . . . . .	10
5	Vergleich der Messdaten bei aktiviertem/deaktiviertem Trigger Coupling	12
6	Simulation der idealen Linearisierung der Pulsform durch den A2ToTLC	13
7	Fit für Amplitude und Ladung (exemplarisch) . . . . .	15
8	Verlauf der Abfallflanke des Ausgangssignals . . . . .	16
9	Mittelwertsignal des Output Signals mit drei Schwellenwerten . . . . .	17
10	ToT-Dauer für drei Schwellenwerte . . . . .	18
11	Fit für das Intervall zwischen 10 mV und 40 mV mit $C_S = 47$ pF . . . . .	20
12	Fit für das Intervall zwischen 60 mV und 280 mV mit $C_S = 47$ pF . . . . .	21
13	Simulation der ToT-Amplitudenbeziehung bei $C_S = 47$ pF . . . . .	22
14	Messdaten für $C_S = 100$ pF . . . . .	23
15	Simulation der ToT-Amplitudenbeziehung bei $C_S = 100$ pF . . . . .	24
16	Fit für das Intervall zwischen 10 mV und 25 mV mit $C_S = 100$ pF . . . . .	25
17	Fit für das Intervall zwischen 60 mV und 330 mV mit $C_S = 100$ pF . . . . .	26
18	Fit der ToT-Dauer in Abhängigkeit zur Pulsladung bei $C_S = 100$ pF . . . . .	27
19	Fit für das Intervall zwischen 140 mV und 410 mV mit $C_S = 330$ pF . . . . .	28
20	Simulation der ToT-Amplitudenbeziehung bei $C_S = 330$ pF . . . . .	29
21	Fit für das Intervall zwischen 10 mV und 60 mV mit $C_S = 330$ pF . . . . .	30
22	Fit der ToT-Dauer in Abhängigkeit zur Pulsladung bei $C_S = 330$ pF . . . . .	31
23	Tot-Amplitudenbeziehung bei aktiviertem/deaktiviertem Trigger Coupling	38
24	Fit für Amplitude und Ladung bei $C_S = 100$ pF . . . . .	39
25	Fit für Amplitude und Ladung bei $C_S = 330$ pF . . . . .	40

## Tabellenverzeichnis

1	Auflistung der Dämpfungsfaktoren . . . . .	7
2	Auflistung der in der Datenanalyse ermittelten Steigungen . . . . .	33

# 1 Motivation

Die präzise und zugleich kostengünstige Messung der Energie von Teilchen ist eine zentrale Herausforderung in der modernen Teilchendetektion. Besonders in großskaligen Experimenten wie dem Compressed Baryonic Matter (CBM)-Experiment am zukünftigen Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)-Beschleunigerzentrum in Darmstadt oder im High Acceptance Di-Electron Spectrometer (HADES)-Experiment ist dies von enormer Bedeutung, da hier Teilchen mit hohen Raten und auf tausenden von Kanälen detektiert werden.

Klassische Methoden zur Ladungsmessung, wie etwa die Nutzung schneller Analog-Digital-Wandler (ADCs), bieten zwar hohe Präzision, sind jedoch teuer und energieintensiv. Eine attraktive Alternative, um die Datenflut und Komplexität zu reduzieren, stellt die Verwendung von Time-over-Threshold (ToT)-Schaltungen dar, bei denen die Breite eines digitalisierten Ausgangsimpulses als Maß für die Amplitude des Eingangssignals verwendet wird. Allerdings weisen einfache ToT-Schaltungen häufig Einschränkungen hinsichtlich der Linearität auf.

In dieser Arbeit wird der Amplitude-to-Time-over-Threshold-Linearization-Circuit (A2ToTLC) untersucht. Dabei handelt es sich um eine ToT-Schaltung, die im Rahmen der Arbeiten am Ring Imaging Cherenkov (RICH) Detektor des CBM-Experiments von J. Peña-Rodríguez entwickelt wurde und dort auch praktisch getestet werden soll [2].

Diese Schaltung basiert auf einem passiven Analogdesign unter Verwendung einer rückwärtsgepolten Diode und eines Kondensators, die gemeinsam als nichtlineares Entladeglied fungieren. Im Idealfall wird die exponentielle Entladekurve des Kondensators in eine linear abfallende Flanke überführt, wobei ein geeigneter Schwellenwert die Pulsbreite festlegt. Durch gezielte Auswahl der Bauelemente und Optimierung der Schaltung kann eine signifikante Verbesserung der Linearität zwischen Eingangssignal und Pulsbreite erzielt werden.

Der A2ToTLC wird im Versuchsaufbau hinter einem Szintillationszähler mit Photomultiplier Tube (PMT) geschaltet, wobei kosmische Myonen als natürlich vorkommende, stabile Testteilchen dienen.

Zur Charakterisierung des Schaltungsverhaltens werden die PMT-Signale sowie die aus dem A2ToTLC erzeugten ToT-Signale zeitgleich mit einem Oszilloskop erfasst. Dabei wird insbesondere die Beziehung zwischen Amplitudenhöhe und ToT-Breite des im A2ToTLC umgewandelten Signals auf Linearität untersucht. Ziel ist es, eine Kalibrierung zu erhalten, die es erlaubt, aus der ToT-Breite auf die den Puls erzeugende Ladungsmenge im PMT und somit indirekt auf die deponierte Energie des einfallenden Teilchens zu schließen.

Die in dieser Arbeit untersuchte Schaltung bildet somit einen vielversprechenden Ansatz zur Realisierung einfacher, energieeffizienter und kostengünstiger Auslesesysteme für große Detektorarrays. Ihr Einsatz im Rahmen von Hochratenexperimenten wie CBM könnte entscheidend dazu beitragen, sowohl Hardwarekosten als auch Datenvolumen zu senken, ohne dabei wesentliche Präzisionseinbußen in Kauf zu nehmen.

Die vorliegende Arbeit positioniert sich damit an der Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung in der Teilchendetektion und angewandter Elektronikentwicklung und

leistet zugleich einen konkreten Beitrag zur Vorbereitung zukünftiger Anwendungen im Rahmen von CBM/HADES.

## 2 Messaufbau

Die folgenden Abschnitte beschreiben den experimentellen Aufbau zur Untersuchung des A2ToTLC. Zunächst wird das zugrunde liegende Detektionsprinzip erläutert, das zur Erfassung realer Teilchensignale verwendet wird. Anschließend werden der gesamte Versuchsaufbau sowie die Struktur der verwendeten Platine und die Integration des A2ToTLC detailliert beschrieben.

### 2.1 Detektionsprinzip

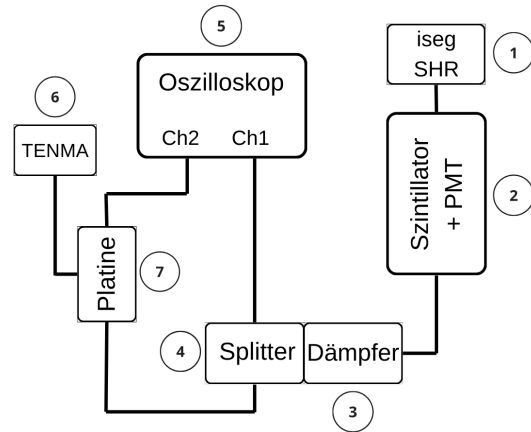
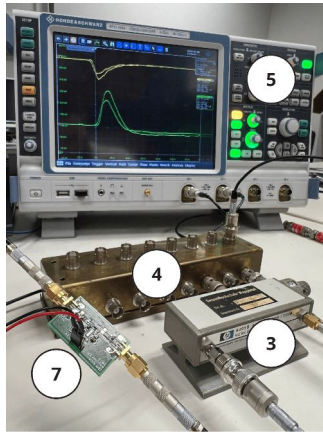
Als natürliche Teilchenquelle werden kosmische Myonen verwendet. Diese entstehen durch hochenergetische kosmische Strahlung in der oberen Atmosphäre und erreichen aufgrund ihrer relativistischen Geschwindigkeit durch Zeitdilatation auch die Erdoberfläche. Ihr nahezu kontinuierliches Auftreten ermöglicht eine autonome und dauerhafte Datenerfassung.

Die Myonen werden mit einem Szintillationszähler nachgewiesen, der aus einem Plastikszintillator und einem daran optisch gekoppelten Photomultiplier besteht. Beim Durchgang eines geladenen Teilchens durch das Szintillatormaterial werden Moleküle des Mediums in angeregte Zustände versetzt. Diese Zustände relaxieren durch die Aussendung von Photonen im sichtbaren oder UV-Bereich. Die Zahl der emittierten Photonen ist näherungsweise proportional zu der im Medium deponierten Energie des einfallenden Myons.

Das im Szintillationsmaterial erzeugte Licht trifft auf die Photokathode eines Photomultipliers. Der PMT ist eine Elektronenröhre, in der über den äußeren photoelektrischen Effekt Elektronen aus der Photokathode herausgelöst werden. Die freigesetzten Primärelektronen werden durch ein elektrisches Feld beschleunigt und lösen über sogenannte Dynoden eine Kaskade aus. Jede Dynode befindet sich auf einem höheren Potential als die vorherige. Trifft ein Elektron auf eine dieser Dynoden, werden dabei mehrere neue Elektronen freigesetzt. Dieser Vorgang wiederholt sich über mehrere Stufen, typischerweise zwischen acht und zwölf Mal, sodass am Ende an der Anode ein verstärkter Ladungspuls von etwa  $10^6 e - 10^8 e$  [3] für ein einzelnes eintreffendes Photoelektron messbar ist. Die Energie, die das ursprünglich detektierte Teilchen im Szintillationsmaterial freisetzt, ist üblicherweise in guter Näherung proportional zum Integral des am PMT aufgezeichneten Ladungssignals, also der an der letzten Dynode herausgelösten Ladung. Das resultierende elektrische Signal weist eine negative Polarität auf. Im PMT treffen Elektronen auf die Anode mit einer Anstiegszeit im Nanosekundenbereich. Für die hier verwendete Schaltung wird das Signal mittels eines Inverters in ein positives Signal invertiert, da diese Schaltung ursprünglich für SiPM Sensoren und somit für positive Spannungspulse ausgelegt ist.

## 2.2 Versuchsaufbau

Die Primärsignale für die Untersuchung werden mithilfe eines ca. 46 cm x 10 cm langen hexagonalen Plastiksintillators des Typs BC-416 (vgl. Nummer 2 in [Abbildung 1](#), Datenblatt [4]) erzeugt, welcher sich in einer Holzkiste befindet und mit einem Photomultiplier des Typs XP2020 (vgl. Nummer 2 in [Abbildung 1](#), Datenblatt [5]) gekoppelt ist. Der PMT wird über ein Hochspannungsnetzgerät des Typs iseg SHR mit einer negativen Versorgungsspannung von 1250 V auf Kanal 0 betrieben (vgl. Nummer 1 in [Abbildung 1](#), Datenblatt [8]), um die Signalverstärkung über die Dynoden innerhalb des PMT herzustellen. Die erzeugten elektrischen Pulse haben typischerweise eine Dauer im Bereich von wenigen Nanosekunden (vgl. [Abbildung 4](#)) und dienen als Eingangssignal für die nachfolgende Elektronik.



**Abbildung 1:** In den beiden Abbildungen ist der verwendete Versuchsaufbau dargestellt. Das linke Bild zeigt ein Foto mit einigen verwendeten Geräten, die mit den Nummern 3, 4, 5 und 7 versehen sind. Rechts ist eine schematische Skizze des gesamten Aufbaus dargestellt, die den Signalfluss und die Verschaltung der einzelnen Geräte veranschaulicht. Alle Komponenten sind von 1 bis 7 nummeriert und beschriftet.

Das PMT-Ausgangssignal wird zunächst einem Dämpfungsglied zugeführt, welches in [Abbildung 1](#) mit der Nummer 3 bezeichnet ist. Die Dämpfung dient dazu, das Signal auf ein für die elektronische Auswertung geeignetes Niveau zu bringen und Reflexionen in der Leitung zu minimieren. Im Laufe der Experimente werden unterschiedliche Dämpferkonfigurationen verwendet. Der variable Dämpfer des Typs Hewlett-Packard 8495B, regelbar im Bereich von 0 dB bis 70 dB, wird für eine Dämpfung von 10 dB genutzt. Des Weiteren werden Koaxialdämpfer mit einer festen Dämpfung von  $(6 \pm 0,25)$  dB (Huber+Sühner, DC – 2 GHz, 1 W) und 19,9 dB (Huber+Sühner) genutzt, die in Kombination verschiedene Dämpfungsstufen ermöglichen. Die Angabe einer Dämpfung  $A_{dB}$  in Dezibel beschreibt das Verhältnis zwischen Ausgangssignal und Eingangssignal [6]

$$(1) \quad A_{dB} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{V_{out}}{V_{in}} \right) \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 10^{A_{dB}/20}$$

wobei  $V_{in}$  die Spannung vor dem Dämpfungsglied und  $V_{out}$  die Spannung danach beschreibt. In [Tabelle 1](#) sind die in den folgenden Experimenten verwendeten Dämpfungen und deren Dämpfungsfaktoren gelistet, um den tatsächlichen Effekt auf die Signalstärke zu quantifizieren.

**Tabelle 1:** Es sind die Dämpfungsfaktoren für verschiedene Dezibelwerten aufgelistet.

Dämpfung $A_{dB}$	Dämpfungsfaktor $\frac{V_{out}}{V_{in}}$
0 dB	1.000
6 dB	0.501
10 dB	0.316
12 dB	0.251
15 dB	0.178
20 dB	0.100

Vom Dämpfungsglied erfolgt der Signalfluss direkt zu einem passiven Signalsplitter, welcher in [Abbildung 1](#) mit der Nummer 4 gekennzeichnet ist. Von dort aus werden die gedämpften PMT-Signale auf zwei verschiedene Wege verteilt.

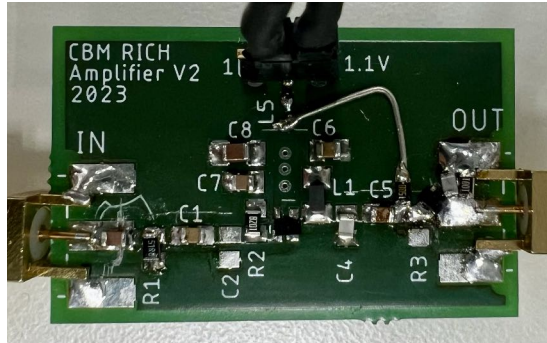
Ein Signalzweig wird unverändert vom Splitter auf Kanal 1 (Ch1) eines digitalen RTO-1044-Oszilloskops der Firma ROHDE&SCHWARZ geleitet, welches in [Abbildung 1](#) mit 5 nummeriert ist. Dieser Signalzweig dient der Aufzeichnung des ursprünglichen Eingangssignals des PMTs. Das verwendete Oszilloskop verfügt über eine Bandbreite von 4 GHz und eine Abtastrate von 20 GSa/s (Datenblatt [\[9\]](#)).

Der zweite Signalzweig durchläuft zunächst die Platine, die aus der Verstärkungsstufe und dem A2ToTLC besteht. Diese ist in [Abbildung 1](#) mit der Nummer 7 gekennzeichnet. Die Verstärkungsstufe wird mit 1,1 V durch ein TENMA-Labornetzgerät vom Typ EA-PS 2316-050 gespeist (vgl. Nummer 6 in [Abbildung 1](#), Datenblatt [\[7\]](#)). Anschließend wird das Signal auf Kanal 2 (Ch2) des Oszilloskops aufgezeichnet.

Dieser Aufbau ermöglicht die zeitlich parallele Erfassung des Eingangssignals (Ch1) und des geformten Ausgangssignals (Ch2), sodass beide Signale vergleichend gegenübergestellt werden können.

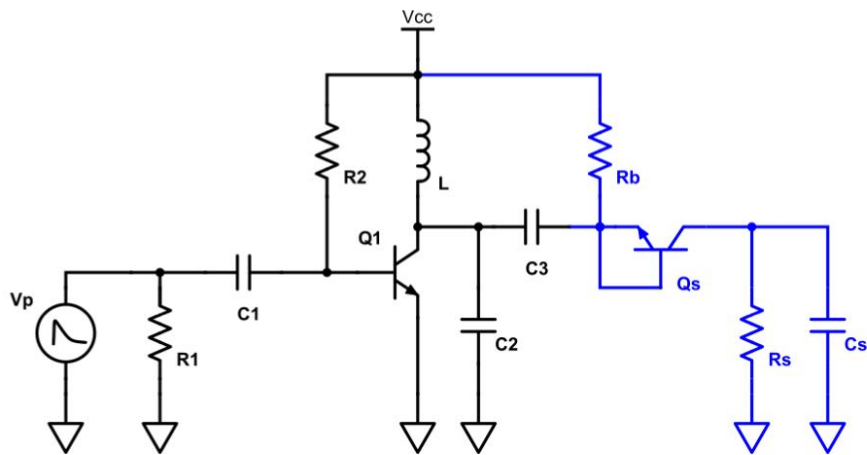
## 2.3 Aufbau der Platine

Der A2ToTLC ist hinter einer Schaltung zur Verstärkung des Eingangssignals auf eine Platine gebaut, die in [Abbildung 2](#) abgebildet ist.



**Abbildung 2:** Das Foto zeigt die verwendete Platine, auf der das Verstärkungsglied sowie der A2ToTLC implementiert sind.

Die Verstärkungsstufe und der A2ToTLC bilden das zentrale Element zur Umsetzung der Linearisierung zwischen Pulsbreite und Pulshöhe. Die vollständige Schaltung auf der Platine ist in [Abbildung 3](#) dargestellt, wobei die Verstärkungsstufe in schwarz und der A2ToTLC in blau hervorgehoben ist.



**Abbildung 3:** Es ist der Schaltplan der Platine skizziert, wobei die Verstärkungsstufe in schwarz markiert ist und der A2ToTLC in blau, wobei der Transistor  $Q_s$  als Diode fungiert [2].

Die Verstärkungsstufe dient der Anpassung und Verstärkung des Eingangssignals  $V_p$ , das vom Photomultiplier als Eingangssignal auf die Platine geführt wird. Es handelt sich um eine Konfiguration mit einem NPN-Transistor  $Q_1$ , der über den Widerstand  $R_2$  und die Induktivität  $L$  an die Versorgungsspannung  $V_{CC}$  gekoppelt ist. Der Kondensator  $C_1$  entkoppelt die Gleichspannungskomponente des Eingangssignals, während der Kondensator  $C_2$  die Stabilität des Arbeitspunktes unterstützt. Das verstärkte Signal wird über einen weiteren Kondensator  $C_3$  DC-frei ausgekoppelt und an den A2ToTLC übergeben. Die Verstärkung beträgt typischerweise den Faktor  $G \approx 12$  [2].



Ursprünglich wurde die Platine für SiPM-Sensoren mit deutlich kleineren Signalamplituden entwickelt, weshalb die Verstärkungsstufe auf der Platine implementiert ist. Bei der Verwendung von PMT-Signalen ist eine weitere Verstärkung eigentlich nicht erforderlich, jedoch gewährleistet der Verstärker auch in diesem Fall eine optimale Anpassung sowie eine Entkopplung der nachfolgenden A2ToT-Stufe. Sollte sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben, dass die A2ToT-Stufe zukünftig auf den CBM-RICH-DIRICH-Auslesemodulen integriert wird, so ist dort bereits die gleiche Verstärkerstufe vorhanden.

Der A2ToTLC besteht aus einer passiven Netzwerkschaltung mit einem Transistor  $Q_s$ , der als Diode geschaltet ist, einem Vorwiderstand  $R_b$  sowie einem Formungszweig, bestehend aus einem Widerstand  $R_s$  und einem Kondensator  $C_s$ .

Das Ziel dieser Stufe ist die gezielte Umformung der exponentiell abfallenden Signalfanke zu einem möglichst linearen Abfallverlauf. Dies geschieht über eine kontrollierte Entladung des Kondensators  $C_s$  mit nahezu konstantem Strom.

Beim Anstieg des Eingangssignals lädt sich der Kondensator  $C_s$  über den PN-Übergang der Basis-Kollektor-Strecke des Transistors  $Q_s$  zunächst auf, welcher eine Diode in Durchlassrichtung darstellt. Sobald das Signal seinen Maximalwert  $V_{\max}$  erreicht und wieder abfällt, ändert sich die Spannungsrichtung an der Diode  $Q_s$ , wodurch diese nun in Sperrrichtung gepolt ist. In dieser Phase erfolgt die Entladung des Kondensators  $C_s$  im wesentlichen über den nahezu konstanten Sperrstrom der Diode. Diese Entladung folgt im Idealfall einer linearen Beziehung, die durch die Gleichung

$$(2) \quad V_C(t) = V_{\max} - \frac{I_S}{C_S} \cdot t$$

beschrieben wird. Hierbei ist  $I_S$  der konstante Sperrstrom der Diode  $Q_s$  und  $C_S$  die Kapazität des Kondensators  $C_s$  [2].

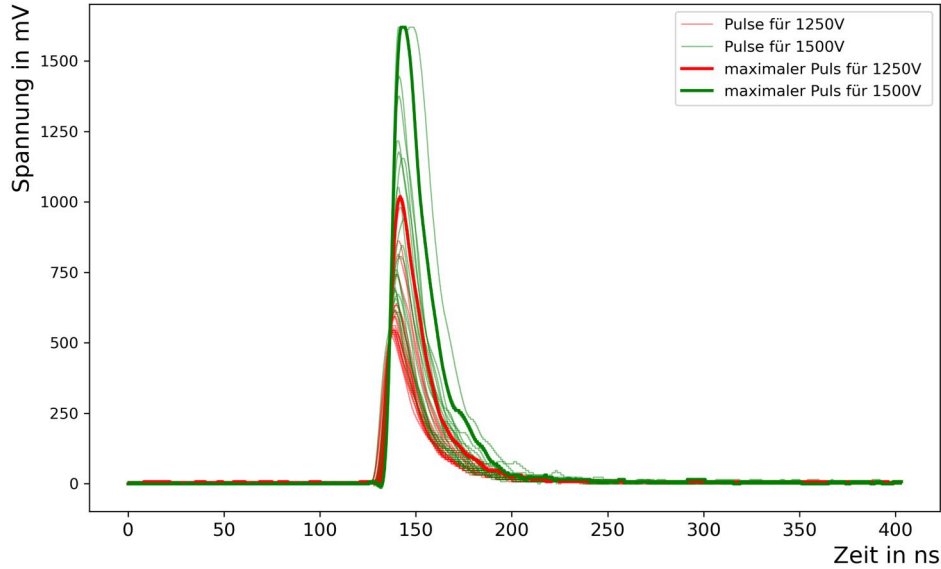
### 3 Konfiguration der Messung

In diesem Kapitel werden die für die Messung relevanten Geräteeinstellungen und Konfigurationen dargestellt. Dabei werden die am PMT angelegte Betriebsspannung, die Kriterien zur Auswahl der Pulse sowie der Einfluss der Kapazität  $C_S$  am A2ToTLC auf das Signalverhalten näher erläutert.

#### 3.1 Betriebsspannung am PMT

Bevor mit der eigentlichen Datenerfassung begonnen wird, muss zunächst eine geeignete Betriebsspannung für den Photomultiplier gewählt werden. Diese bestimmt die Verstärkung der vom Szintillator erzeugten Lichtpulse. Wird die Spannung zu niedrig gewählt, sinkt die Verstärkung, sodass kleine Lichtsignale unterhalb der Nachweisgrenze verschwinden. Daher wird eine Spannung gewählt, die eine ausreichend hohe Signalamplitude liefert, gleichzeitig das System jedoch nicht unnötig belastet oder rauschanfälliger macht.

Zur Orientierung werden in einem Bereich zwischen 1250 V und 1500 V mehrere Messungen durchgeführt. [Abbildung 4](#) zeigt exemplarisch die aufgenommenen Pulse bei zwei Spannungen. In rot sind dabei die Pulse bei 1250 V, in grün die bei 1500 V dargestellt.



**Abbildung 4:** Im Vergleich stehen die PMT Ausgangssignale bei 1250 V in rot und 1500 V in grün. Dargestellt sind jeweils mehrere Pulse sowie der stärkste Einzelpuls beider Spannungen.

Zu erkennen ist, dass bei steigender Spannung die Amplitude der Pulse ansteigt, jedoch das Verhältnis von Pulsbreite zu Pulsamplitude im Wesentlichen konstant bleibt. Für die vorliegende Auswertung reicht eine Spannung von 1250 V aus, da bereits in diesem Bereich stabile und deutlich erkennbare Pulse aufgezeichnet werden. Die Erhöhung auf 1500 V würde zwar die Amplitude vergrößern, brachte jedoch keinen zusätzlichen Vorteil für die geplante Analyse.

### 3.2 Filterung der Pulse

Eine präzise Datenauswertung setzt voraus, dass nur die für die Analyse relevanten Pulse berücksichtigt und Störeinflüsse bestmöglich unterdrückt werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie die Signalfilterung und die Auswahl geeigneter Pulse realisiert werden.

Bei der Auswertung stehen vor allem solche Pulse im Fokus, die durch Myonen verursacht werden, welche nahezu senkrecht den zylinderförmigen Szintillator durchqueren. In diesem Fall wird die maximale Strecke im Material durchlaufen, was mit einer entsprechend hohen Lichtausbeute und damit auch mit einer größeren Signalamplitude einhergeht. Myonen, die den Szintillator in einem flachen Winkel durchqueren, hinterlassen hingegen kürzere Spuren und erzeugen entsprechend kleinere Pulse. Kosmische Myonen besitzen Energien von wenigen GeV, wobei der Medianwert der Energie bei rund 4 GeV liegt [10].

Der mittlere Energieverlust von Myonen beim Durchgang durch den Szintillator BC-416 beträgt ungefähr 2 MeV/cm [4]. Ein Myon, das den 45 cm langen Szintillator in

senkrechter Richtung vollständig durchquert, deponiert demnach eine Energie von

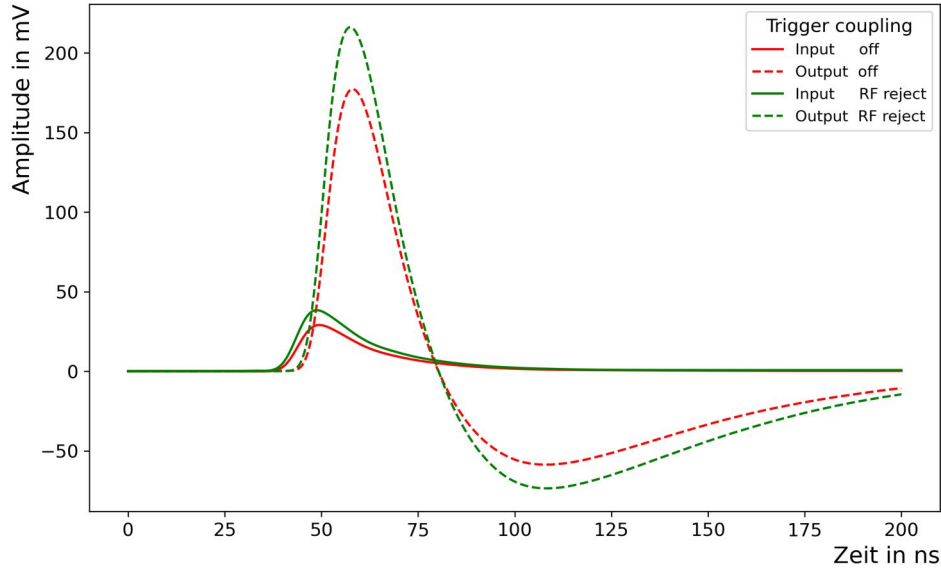
$$(3) \quad E \approx 2 \text{ MeV/cm} \cdot 45 \text{ cm} = 90 \text{ MeV}.$$

Demgegenüber durchqueren schräg einfallende Myonen nur etwa 10 cm des Szintillators und deponieren entsprechend weniger Energie (etwa 20 MeV). Das führt zu einer geringeren Lichtausbeute und deutlich kleineren Amplituden der resultierenden elektrischen Signale.

Am Oszilloskop können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, die eine Eingrenzung der aufgezeichneten Pulse ermöglichen, beispielsweise durch Bandbreitenbegrenzungen, digitale Filterfunktionen und Änderung des Schwellenwerts am Oszilloskop. Durch eine Anpassung des Schwellenwerts am Oszilloskop kann gezielt bestimmt werden, in welchem Amplitudenbereich die Messwerte erfasst werden. Pro Messdurchlauf werden 2000 Pulse aufgezeichnet. Bei niedrig eingestelltem Schwellenwert werden die 2000 Pulse sehr schnell registriert, da in diesem Fall eine große Anzahl von Signalen pro Sekunde die Schwelle überschreitet. Wird der Schwellenwert hingegen erhöht, so werden viele Signale aufgrund ihrer geringen Amplitude herausgefiltert. Durch die Wahl eines größeren Schwellenwerts kann die Dichte von Pulsen im Bereich großer Amplituden gezielt erhöht werden.

Das Oszilloskop verfügt über die Einstellung „Trigger Coupling = RF Reject“, bei der ein zusätzlicher Tiefpassfilter im Triggerpfad aktiviert wird. Dieser Filter reduziert hochfrequente Störanteile und verhindert ein fehlerhaftes Triggern auf verrauschte oder leere Signaltraces, wodurch stabilere und gleichmäßigere Signale erzielt werden.

Im Laufe der zugrundeliegenden Messungen wird die Einstellung des digitalen Filters von „Trigger Coupling = Off“ zu „Trigger Coupling = RF Reject“ geändert. Zur Untersuchung des Einflusses des digitalen Filters auf die aufgezeichneten Pulse wird eine Vergleichsmessung unter identischen Bedingungen durchgeführt. Dabei wird eine Kapazität  $C_S = 100 \text{ mV}$ , eine Dämpfung von 20 dB und ein Schwellenwert am Oszilloskop von 30 mV gewählt, einzig die Filtereinstellung variiert. Es werden 2000 Pulse aufgenommen und davon jeweils die Mittelwerte des Eingangs- und Ausgangssignals gebildet.



**Abbildung 5:** Vergleich der gemittelten Eingangs- und Ausgangssignale mit aktiviertem „Trigger Coupling = RF Reject“ in grün und deaktiviertem Trigger Coupling in rot. Die gestrichelten Linien zeigen die jeweiligen Ausgangssignale.

Die Signalformen in [Abbildung 5](#) unterscheiden sich nur geringfügig in der Amplitudenhöhe. Mit aktiviertem „RF Reject“ ergibt sich eine höhere mittlere Amplitude, da der Triggerpfad nicht auf kurzzeitige Rauschspitzen reagiert. Die Pulsform selbst bleibt unverändert, sodass der Filter keinen relevanten Einfluss auf den Verlauf oder die Linearität der ToT-Kennlinie ausübt. Der Einfluss der Filtereinstellung auf die ToT-gegen-Amplitude-Darstellung bei nicht gemittelten Messwerten ist in [Abbildung 23](#) im Anhang dargestellt. Er äußert sich in einer geringen Verschiebung der Kennlinie entlang der Amplitudenachse.

### 3.3 Einfluss der Kapazität $C_S$

Die Wahl der Kapazität  $C_S$  hat einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des A2ToTLC. Eine größere Kapazität erhöht die ToT-Dauer des Ausgangspulses für ein gegebenes Eingangssignal. Aus [Gleichung 2](#) ergibt sich die Dauer  $t$  des Signals oberhalb eines festen Schwellwerts  $V_{th}$  als Maß für  $V_{max}$

$$(4) \quad t = \frac{C_S \cdot (V_{max} - V_{th})}{I_S}$$

Werden die Amplituden gegen ToT in einem Diagramm aufgetragen, resultiert eine steilere Steigung, was die Sensitivität und somit die Auflösung verbessert.

Zur experimentellen Überprüfung des Einflusses der Kapazität  $C_S$  auf das ToT-Verhalten wurden LTSpice-Simulationen durchgeführt, bei denen die Kapazität systematisch variiert wurde. Die Simulationen wurden für die Werte  $C_S = 47 \text{ pF}$ ,  $C_S = 100 \text{ pF}$  und

$C_S = 330\text{ pF}$  durchgeführt. Die simulierten Abhängigkeiten der ToT-Dauer von der Eingangsamplitude sind in [Abschnitt 5](#) für die jeweiligen Kapazitäten in den Abbildungen [13](#), [15](#) und [20](#) dargestellt.

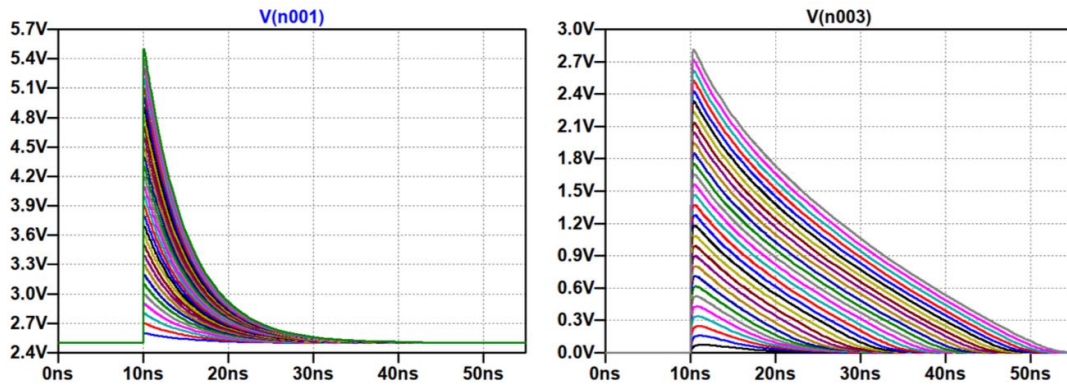
Bei der Wahl von  $C_S$  soll ein Gleichgewicht zwischen hoher Linearität, hoher ToT-Auflösung und geringer Signalverzerrung erreicht werden.

## 4 Funktionsprinzip des A2ToTLC

In den folgenden Abschnitten wird das Funktionsprinzip des A2ToTLC beschrieben. Dabei wird die Transformation der Eingangspulse durch den A2ToTLC erläutert und sowohl der Idealfall als auch das reale Verhalten werden betrachtet. Zudem wird die Vorgehensweise der Offline-Analyse mittels eines Python-Skripts beschrieben, in der die aufgezeichneten Signal-Traces ausgewertet und insbesondere der Einfluss des im Python-Code definierten Schwellenwerts näher betrachtet wird.

### 4.1 Transformation der Pulsform

Im Idealfall besitzt das Eingangssignal die in [Abbildung 6](#) (links) dargestellte Form eines sprunghaften Anstiegs ohne Zeitverzögerung, gefolgt von einem exponentiellen Abfall, der durch die Entladung des Kondensators  $C_S$  bestimmt ist.



**Abbildung 6:** Die Simulationen zeigen in welchem Maße der A2ToTLC den Pulsverlauf linearisiert. Im linken Bild ist der nicht transformierte Puls mit der exponentiellen Abfallflanke zu sehen. Die Simulation rechts zeigt den nahezu ideal durch den A2ToTLC linearisierten Puls. Auf der x-Achse ist die Zeit und auf der y-Achse die Amplitudenhöhe angegeben [2].

Durch den Einsatz des A2ToTLC wird dieser exponentielle Abfall linearisiert und die Pulsbreite erhöht (vgl. [Abbildung 6](#), rechts). Durch die höhere Pulsbreite steigt die Steigung der ToT-Kennlinie, was eine bessere Auflösung ermöglicht. Durch die Linearisierung des Abfalls wird eine nahezu lineare Abbildung zwischen Amplitude und Pulsbreite gewährleistet.

Das in [Abbildung 6](#) rechts dargestellte Signal lässt sich im theoretischen Grenzfall als rechtwinkliges Dreieck auffassen.

In der praktischen Messung weicht das Verhalten jedoch aufgrund parasitärer Effekte innerhalb der Schaltung von diesem Idealfall ab. Dabei verlängern Filter im Oszilloskop, wie beispielsweise die Bandbreitenbegrenzung, die Anstiegszeit des Signals und runden das Pulsmaximum ab. Die reale Pulsform weist anstelle einer Singularität im Maximum eine abgerundete Kuppe auf.

Während die Simulation in [Abbildung 6](#) einen gleichmäßigen linearen Zusammenhang zwischen Amplitude und ToT-Dauer erwarten lässt, tritt in den realen Daten eine Abweichung vom Trend auf.

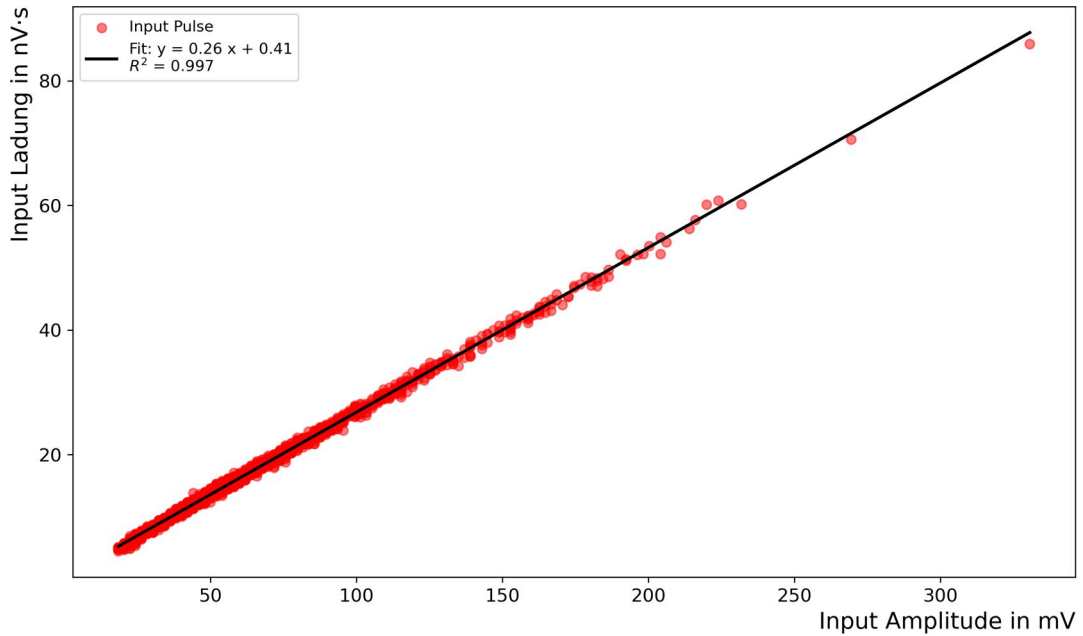
## 4.2 Reale Zusammenhänge zwischen den Parametern

Für jedes Ereignis wird aus den aufgezeichneten Rohdaten die Amplitudenhöhe des Eingangssignals, die Breite des ToT-Ausgangssignals und durch Integration über das Signal die Ladung berechnet. Diese Größen werden analysiert und miteinander in Beziehung gesetzt. Die primär interessierende Größe ist die Pulsladung, da sie proportional zur erzeugten Lichtmenge und somit zur deponierten Energie ist. Mit dem verwendeten Schaltkreis wird jedoch die Pulsamplitude gemessen.

Bei der zugrunde liegenden Pulsform ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Amplitude und Ladung, den exemplarisch [Abbildung 7](#) zeigt. In diesem Beispiel wird eine Kapazität  $C_S = 330 \text{ pF}$ , eine Dämpfung von 10 dB und ein Schwellenwert von 30 mV verwendet. Da die Pulsform im betrachteten Aufbau für alle Messungen gleich bleibt, kann von der Proportionalität

$$(5) \quad \text{Ladung} \propto \text{Amplitude}$$

auch für alle weiteren Messungen ausgegangen werden. Dies wird für die experimentellen Ergebnisse im Anschluss überprüft.



**Abbildung 7:** Dargestellt ist ein exemplarischer Fit, der die Linearität zwischen Amplitude und Ladung der Eingangspulse veranschaulicht. Der Fit weist eine Steigung von  $0,26 \frac{\text{nV}\cdot\text{s}}{\text{mV}}$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,997$  auf.

Gleichzeitig ist die Annahme, dass durch gezielte Formung der Abfallflanke des Signals über den A2ToTLC eine lineare Beziehung zwischen der Amplitude des Eingangssignals und der Breite des ToT-Ausgangsimpulses hergestellt wird, sodass gilt

$$(6) \quad \text{Amplitude} \propto \text{ToT}.$$

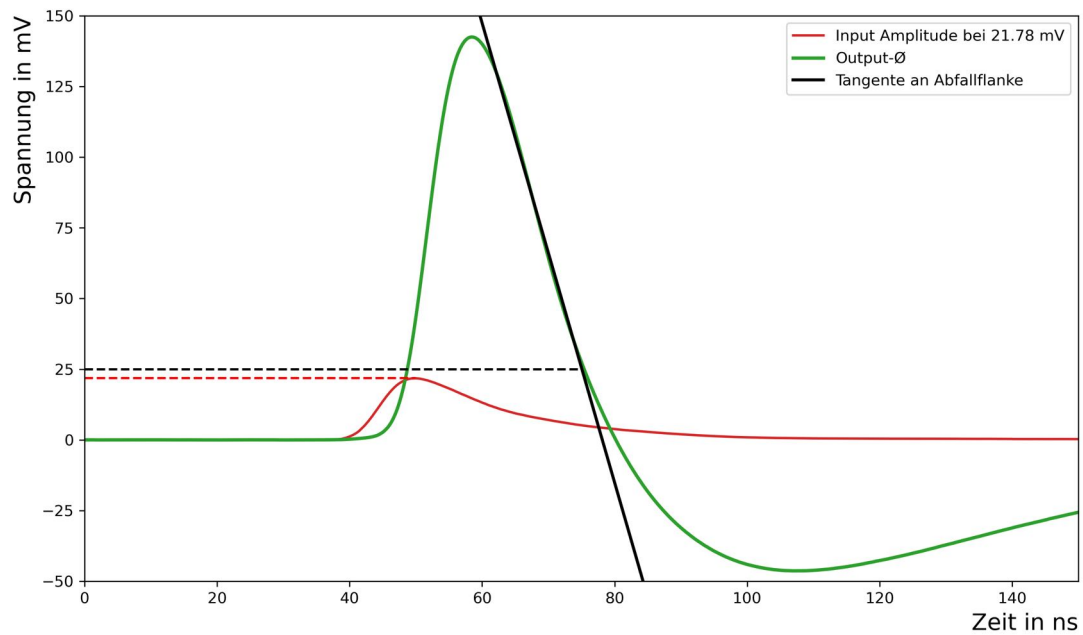
Aus diesen Zusammenhängen folgt, dass auch die Ladung direkt proportional zur ToT-Dauer ist:

$$(7) \quad \text{Ladung} \propto \text{ToT}.$$

Also besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der ToT-Dauer und der Pulsladung, sofern die Abbildung von Amplitude auf ToT im betrachteten Messbereich linear ist. Da die Amplitude außerdem direkt mit der Ladung korreliert, wird im Folgenden die Pulsamplitude in Abhängigkeit von der ToT-Dauer ausgewertet.

Zur qualitativen Untersuchung der vom A2ToTLC erzeugten Signalform ist in [Abbildung 8](#) ein Beispiel dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten stammen aus einer Messung mit einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 15 mV, einer Dämpfung von 20 dB und einer Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ . Für die Analyse sind alle Eingangssignale gemittelt und haben damit eine gemittelte Amplitude von 21,78 mV, die in [Abbildung 8](#) rot hervorgehoben ist. Parallel dazu ist das gemittelte Ausgangssignal des A2ToTLC grün gezeichnet. Dieses besitzt eine charakteristische Form mit einem schnellen Anstieg und einer anschließenden Abfallflanke.

Zur Beurteilung der Linearität des Entladeverhaltens liegt an der abfallenden Flanke des Ausgangssignals eine schwarze Tangente an. Zusätzlich markiert die horizontal gestrichelte schwarze Linie die Höhe von 25 mV, bis zu der die Tangente qualitativ mit der Abfallflanke übereinstimmt. Unterhalb dieser Schwelle beginnt das Ausgangssignal hingegen sichtbar vom linearen Verlauf abzuweichen.

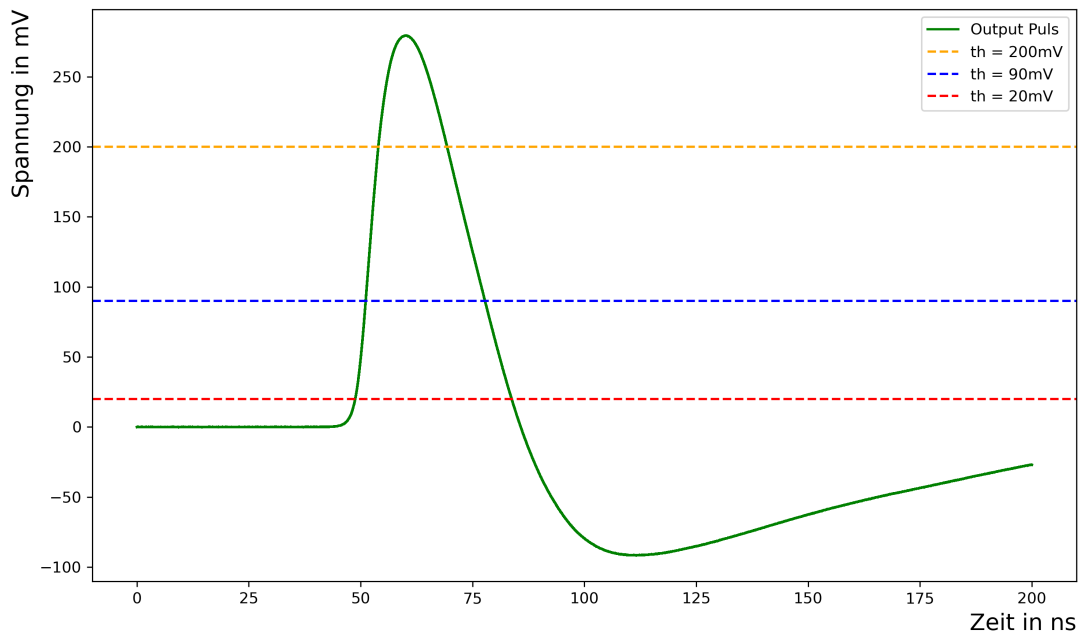


**Abbildung 8:** Die gemittelten Eingangssignale mit einer Amplitude von  $V_{in} = 21,78$  mV sind in rot skizziert und die gemittelten Ausgangssignale in grün. Die schwarze Linie zeigt eine Tangente an der abfallenden Flanke des Ausgangssignals, wobei die gestrichelte schwarze Linien die Schwelle von 25 mV markiert, bis zu der die Tangente mit dem Signal qualitativ übereinstimmt.

### 4.3 Schwellenwert im Pythoncode

Im Python-Auswerteskript wird nach der Aufnahme der Daten ein variabler Schwellenwert  $V_{th}$  definiert, um die ToT-Dauer des transformierten Ausgangssignals zu bestimmen. Das Vorgehen ist in [Abbildung 9](#) exemplarisch dargestellt. Die dabei zugrunde liegende Messung ist mit einem Schwellenwert von 30 mV am Oszilloskop, einer Dämpfung von 6 dB und einer Kapazität von  $C_S = 100$  pF kalibriert. Aus allen Ereignissen wird jeweils ein mittleres Eingangs- und Ausgangssignal gebildet. Der Mittelwert der Eingangspulse besitzt in diesem Beispiel eine Amplitude von  $V_{in} = 90,90$  mV.

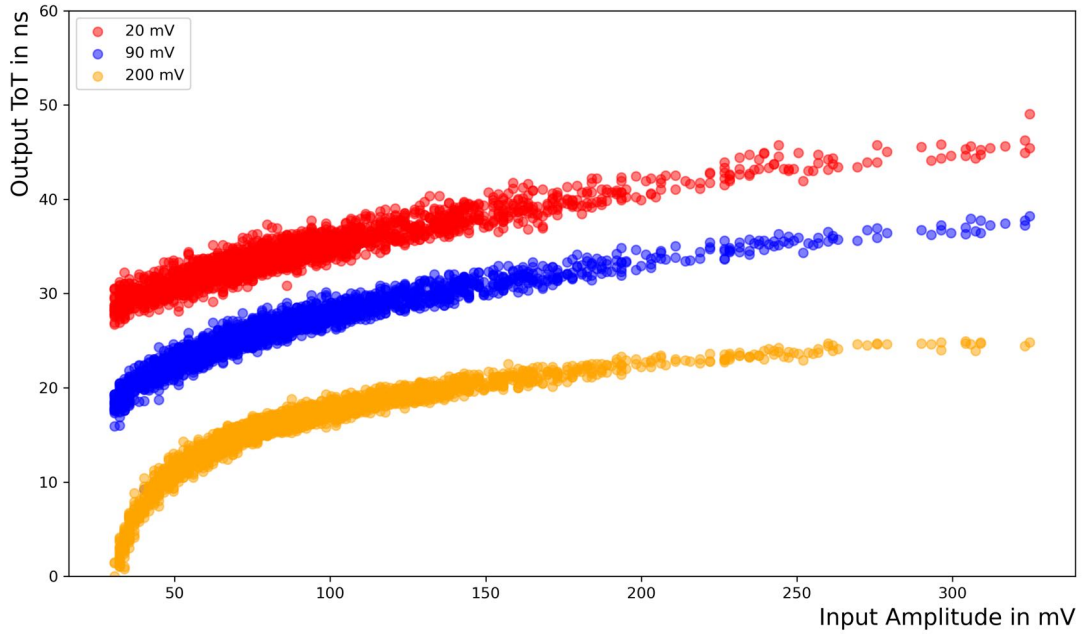




**Abbildung 9:** Exemplarisch dargestellt ist das Mittelwertsignal der Output Pulse bei einem Mittelwertsignal der Input Pulse von  $V_{in} = 90,90 \text{ mV}$ . Zusätzlich sind drei Schwellenwerte von  $V_{th} = 20, 90, 200 \text{ mV}$  gesetzt, welche hier gestrichelt gekennzeichnet sind. Die ToT-Dauer entspricht jeweils dem Zeitintervall, in dem das grün gekennzeichnete Ausgangssignal oberhalb der jeweiligen gestrichelten Linie liegt.

Wird der Schwellenwert  $V_{th}$  angehoben, verkürzt sich die ToT-Breite bei konstanter Eingangsamplitude. Die Ursache ist die näherungsweise dreieckige Pulsform, die nach oben hin zunehmend schmaler wird und lediglich bei kleinen Ausgangsamplituden merklich von dieser Form abweicht. Ein höherer Schwellenwert schneidet folglich einen schmaleeren Bereich des Signals aus, sodass die gemessene ToT-Dauer abnimmt.

Die Ereignisse der beschriebenen Messung werden als nicht gemittelte Darstellung für drei unterschiedliche Schwellenwerte in [Abbildung 10](#) präsentiert. Jeder Kurvenzug stellt die Beziehung zwischen der Eingangsamplitude und der ToT-Dauer für einen fest eingestellten Schwellenwert  $V_{th}$  im Code dar.



**Abbildung 10:** Es sind die Output ToT Werte als Funktion der Eingangsamplitude für Schwellenwerte von  $V_{th1} = 20$  mV in rot,  $V_{th2} = 90$  mV in blau und  $V_{th3} = 200$  mV in gelb dargestellt.

Wie in [Abbildung 10](#) zu erkennen ist, verschieben sich die ToT-Kurven mit zunehmend höherem Schwellenwert systematisch nach unten. Dieser Effekt ist nachvollziehbar, da ein höher gewählter Schwellenwert größere Bereiche des Pulsverlaufs ausblendet. Das resultiert in kürzeren ToT-Dauern für alle betrachteten Eingangsamplituden, was auch aus [Abbildung 9](#) hervorgeht.

Auffällig ist der Verlauf der Kurve bei einem Schwellenwert von  $V_{th} = 200$  mV. Hier fällt der ToT-Wert im Bereich niedriger Eingangsamplituden, etwa zwischen 20 mV und 60 mV, stark ab. Dieses Phänomen ist auf die nicht ideale Pulsform zurückzuführen. Die Pulsspitze ist nicht scharf ausgeprägt, sondern verrundet. Dadurch tritt bei hohen Schwellenwerten bzw. bei kleinen Pulsen mit Amplituden nahe der Schwelle ein Schwelleneffekt auf, der in [Abbildung 10](#) in der gelben Kurve erkennbar ist.

Wird im Code der Schwellenwert so weit erhöht, dass er im Bereich der abgerundeten Kuppe liegt, führt bereits eine geringe Erhöhung der Pulshöhe zu einer deutlich größeren Ausweitung der Pulsbreite, als dies bei niedrigeren Schwellenwerten der Fall ist. Daraus resultiert in [Abbildung 10](#) bei kleinen Amplituden für einen Schwellenwert von 200 mV eine steilere Steigung, die ab Amplitudenwerten von  $\approx 50$  mV in den linearen Bereich der Korrelation übergeht. Mit einem Schwellenwert von 20 mV führt eine Amplitudenerhöhung nur zu einer geringen Änderung der ToT-Dauer.

Während die Simulation in [Abbildung 6](#), die den Idealfall der Pulstransformation durch den A2ToTLC beschreibt, einen gleichmäßigen linearen Zusammenhang zwischen Amplitude und ToT-Dauer erwarten lässt, tritt in den realen Daten eine Abweichung im Trend auf. Daher ist zu vermuten, dass in realen Messungen die unterschiedlichen Stei-

gungen für kleine Amplituden in [Abbildung 10](#) aus den ToT-Messungen im Bereich der abgeflachten Kuppen resultieren.

## 5 Datenauswertung

Die nachstehenden Abschnitte widmen sich der offline Analyse, Interpretation und Einordnung der Messergebnisse. Es werden für unterschiedliche Konfigurationen jeweils 2000 Pulse aufgenommen. Die Messungen werden automatisch gestoppt, sobald 2000 Myoneneinschläge aufgenommen sind, für die der PMT Eingangsamplituden liefert, die oberhalb des am Oszilloskop gewählten Schwellenwerts liegen. Durch die unterschiedliche Setzung dieses Schwellenwerts sowie die Wahl verschiedener Dämpfungsstufen kann die Verteilung der Messwerte auf bestimmte Amplitudenbereiche konzentriert werden.

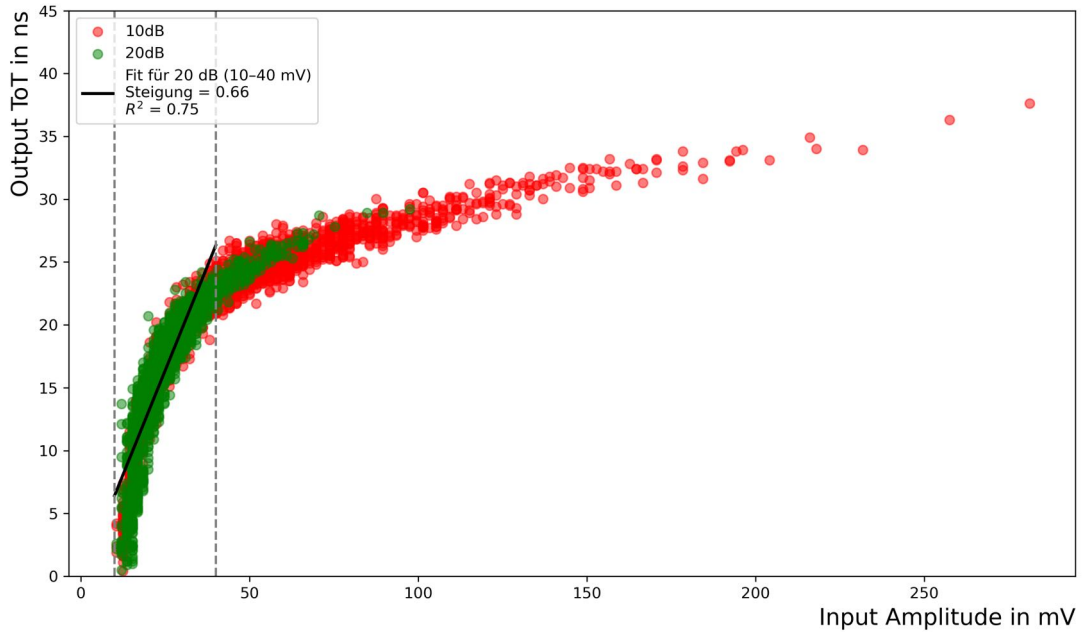
Es werden systematische Messungen mit drei unterschiedlichen Shaper-Kapazitäten von  $C_S = 47 \text{ pF}$ ,  $C_S = 100 \text{ pF}$  und  $C_S = 330 \text{ pF}$  mittels eines Python-Skripts offline ausgewertet. Im Fokus steht dabei die Untersuchung der Bereiche, in denen ein linearer Zusammenhang zwischen der ToT-Dauer und der Eingangsamplitude vorliegt, aus dem wiederum Rückschlüsse auf die Beziehung zwischen der ToT-Dauer und der Pulsladung gezogen werden können. Zur Gegenüberstellung werden LTSpice-Simulationen betrachtet und beschrieben. Zu den Simulationen liegen lediglich die abgebildeten Plots vor, quantitative Aussagen können nur anhand dieser Plots ermittelt werden.

Die erzielten Ergebnisse der unterschiedlichen Messungen werden anschließend miteinander verglichen und diskutiert.

### 5.1 Auswertung der Messung mit $C_S = 47 \text{ pF}$

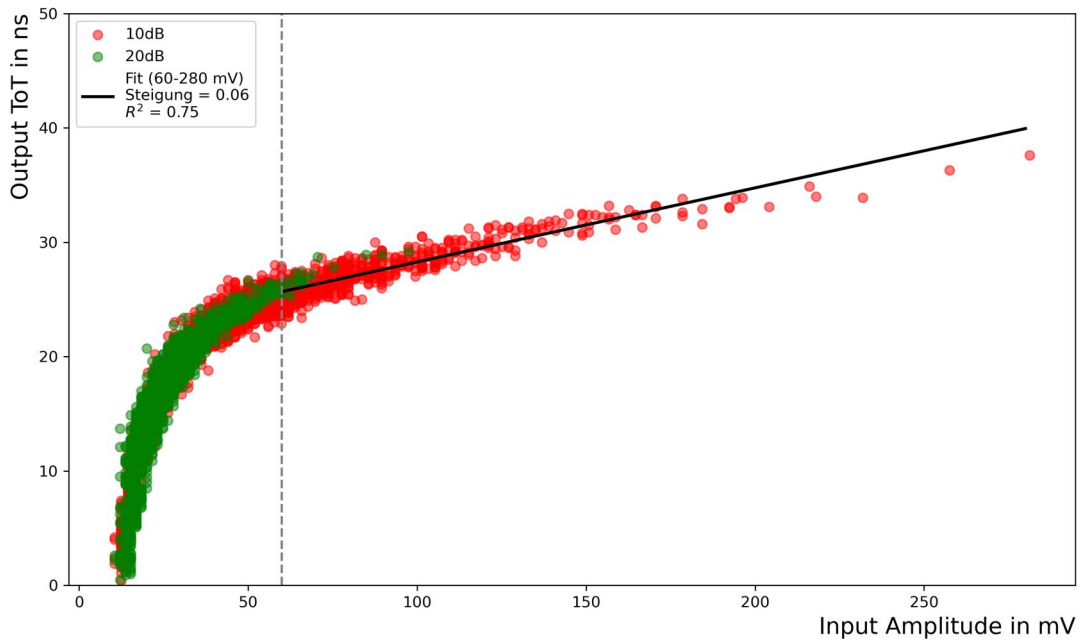
Zunächst wird die Messreihe ausgewertet, bei der die Kapazität auf  $C_S = 47 \text{ pF}$  festgelegt ist. Die Dämpfungen werden auf 10 dB und 20 dB eingestellt, um einen möglichst großen dynamischen Bereich an Eingangsamplituden abzudecken. Das Oszilloskop ist dabei mit einem festen Schwellwert von 10 mV konfiguriert, sodass Pulse unterhalb dieser Grenze nicht erfasst werden. Für die anschließende offline Datenanalyse wird im Pythoncode für die ToT-Dauer der Ausgangsamplituden ein Schwellenwert von 50 mV angewendet. Diese höhere Schwelle stellt sicher, dass die ToT-Dauer im linearen Bereich der Abfallflanke des Signalpulses ermittelt wird.

Die resultierenden ToT-Dauern des Ausgangssignals in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude sind in [Abbildung 11](#) dargestellt.



**Abbildung 11:** Gezeigt ist die gemessene ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude für eine Kapazität von  $C_S = 47$  pF. Die Abbildung enthält Messdaten mit zwei Dämpfungsstufen von 10 dB (rot) und 20 dB (grün). Der Schwellwert am Oszilloskop beträgt 10 mV. Der lineare Fit liegt im Intervall zwischen 10 mV und 40 mV und ergibt eine Steigung von 0,66 ns/mV bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,75$ .

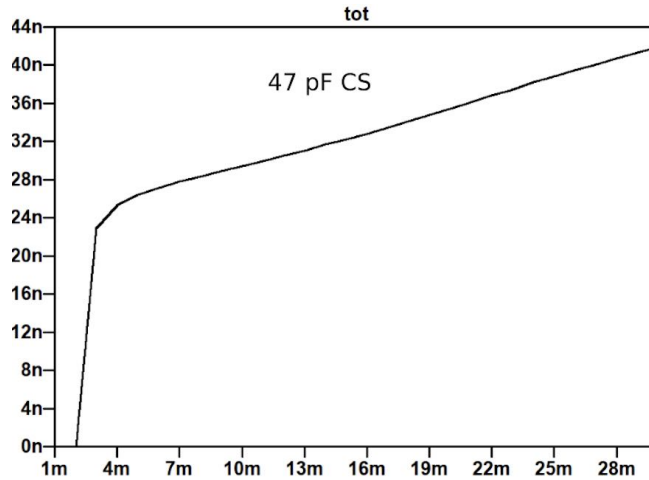
Abbildung 11 zeigt, dass die Messdaten zwei unterschiedlichen Verläufen folgen, wie im Abschnitt 4.3 erläutert wird. Im unteren Amplitudenbereich weist die Messung mit 20 dB Dämpfung einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen Eingangsamplitude und ToT-Dauer auf. Das durch die gestrichelten Linien markierte Intervall reicht von 10 mV bis 40 mV und der darin eingezeichnete lineare Fit besitzt eine Steigung von 0,66 ns/mV. Aufgrund der deutlichen Streuung der Messpunkte ist dieser Fit jedoch mit einer entsprechend hohen Unsicherheit behaftet, was durch das Bestimmtheitsmaß  $R^2 = 0,75$  numerisch beschrieben wird. Dieses gibt den durch den linearen Fit erklärten Anteil der Varianz der ToT-Werte an und wird hier als Quadrat des Pearson-Korrelationskoeffizienten bestimmt. Für höhere Amplituden als 40 mV tritt eine deutliche Abflachung der Kurven auf. Dieser Effekt ist bei der Messung mit 10 dB Dämpfung besonders ausgeprägt, da hier ein größerer Anteil der Ereignisse innerhalb eines Bereichs mit hohen Amplitudenwerten liegt.



**Abbildung 12:** Dargestellt ist der Fit für das Intervall zwischen 60 mV (gestrichelte Linie) und 280 mV bei einer Kapazität von  $C_S = 47$  pF. Die Messkurve zeigt zwei Dämpfungsstufen von 10 dB (rot) und 20 dB (grün), wobei das Oszilloskop bei beiden Dämpfungsstufen mit einem Schwellwert von 10 mV konfiguriert ist. Der Fit weist eine Steigung von 0,06 ns/mV und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,75$  auf.

Abbildung 12 lässt im Bereich der hohen Amplitudenwerte ebenfalls einen linearen Trend erkennen, allerdings mit einer wesentlich geringeren Steigung von 0,06 ns/mV. Die gestrichelte Linie markiert den Beginn des linearen Bereichs ab einer Amplitudenhöhe von 60 mV. Die Abflachung bedeutet, dass die Signalpulse, wenn eine Pulsbreite von  $\approx 25$  ns erreicht ist, mit wachsender Amplitude auf der gesetzten Schwellenhöhe kaum breiter werden. Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,75$  zeigt, dass die Linearität bei großen Amplituden fehlerbehaftet ist. Zusätzlich verschlechtert die geringe Steigung die Auflösung, wobei dieser Bereich ein Breites Spektrum von Amplitudenwerten abdeckt, was die Auflösung wiederum verbessert.

Um die Messergebnisse besser einzuordnen, wurde eine LTSpice-Simulation durchgeführt, die das Verhalten des A2ToTLC bei einer Kapazität von  $C_S = 47$  pF beschreibt (vgl. Abbildung 13). Die Simulation bildet verschiedene reale Phänomene ab. So zeigt sich auch in der Simulation, dass die Pulsform keine idealisierte Spitze besitzt, sondern im oberen Bereich leicht abgerundet ist. Dies zeigt sich in Abbildung 13 darin, dass im unteren Amplitudenbereich ein Verlauf mit steiler Steigung beobachtet wird, während im weiteren Verlauf eine Abflachung einsetzt. Damit weist auch die Simulation zwei verschiedene Trends auf, die qualitativ den Messdaten entsprechen. Das Intervall zwischen 3 mV und 4 mV beschreibt die Spitze des Pulses und weist eine hohe Steigung auf, während der Bereich zwischen 4 mV und 30 mV eine geringere Steigung von  $\approx 0,64$  ns/mV besitzt und den restlichen Puls repräsentiert.



**Abbildung 13:** Die Simulation zeigt die ToT-Dauer des Ausgangsignals für eine Kapazität von  $C_S = 47 \text{ pF}$  ohne Berücksichtigung von Dämpfung oder Sättigung. Es sind zwei unterschiedliche Trends erkennbar, die qualitativ den Messdaten entsprechen. Der Bereich zwischen 4 mV und 30 mV besitzt eine Steigung von  $\approx 0,64 \text{ ns/mV}$ .

Auffällig ist, dass der Übergangspunkt der beiden Verläufe sowohl in den Messdaten als auch in der Simulation bei etwa 25 ns in den ToT-Werten liegt. Die genaue Skalierung der Amplituden und die Steigungen unterscheiden sich jedoch, da die Simulation nur begrenzt reale Einflüsse berücksichtigt. In der Simulation wird nicht der gesamte Versuchsaufbau berücksichtigt, sondern ein besonderer Fokus liegt auf der Schaltung der Platine und Effekte wie Dämpfung und Sättigung werden nicht mit einbezogen. Qualitativ zeigt sich jedoch eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentellen Messungen und der Simulation der Daten.

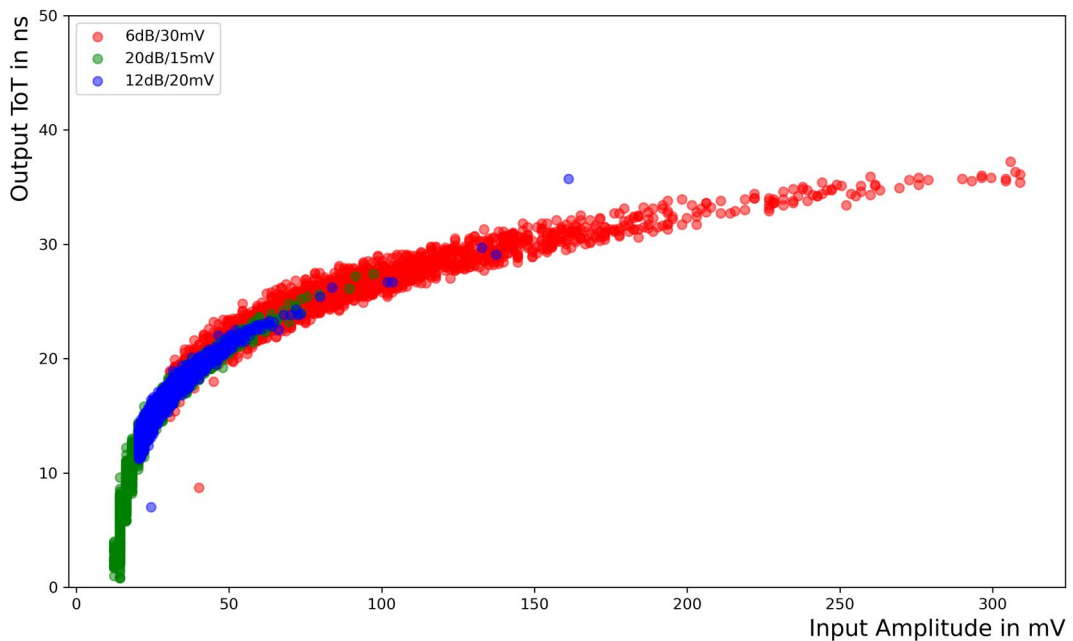
Aus [Abbildung 11](#) ist somit zu schließen, dass der A2ToTLC einen beschränkten linearen Bereich mit starker Steigung für Amplitudenwerte unter 40 mV umfasst. Außerdem ist zu sehen, dass bei einer Kapazität von  $C_S = 47 \text{ pF}$  und einer Dämpfung von 20 dB ein Großteil der Messwerte in diesem Bereich liegt, während bei einer Dämpfung von 10 dB mehr Werte oberhalb von 40 mV liegen und damit einen stark abgeflachten Trend beschreiben. Um den Bereich mit hoher Steigung näher zu untersuchen, ist es daher notwendig, möglichst viele Ereignisse in diesem Bereich zu erfassen. Eine stärkere Dämpfung könnte den Effekt verstärken und mehr Signale in den linearen Bereich mit hoher Steigung verschieben. Die Simulation zeigt eine Trendänderung mit einem abgeflachten Bereich, der auch in den Messwerten zu beobachten ist. Durch die Reduzierung der Dämpfung und die Erhöhung des Schwellenwerts am Oszilloskop können auch in diesem Bereich viele Ereignisse erfasst werden.

## 5.2 Auswertung der Messung mit $C_S = 100 \text{ pF}$

Im Folgenden wird eine Messreihe mit einer erhöhten Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  untersucht. Bei einer größeren Kapazität wird eine steilere Steigung im linearen Bereich der ToT-Eingangsamplituden-Darstellung erwartet. Dies erklärt [Gleichung 4](#), da mit steigender Kapazität die ToT-Dauer zunimmt, wodurch sich der Messbereich in dieser

Darstellung auf der y-Achse vergrößert. Durch eine verringerte Dämpfung treten mehr Ereignisse bei höheren Amplitudenwerten auf. Im Folgenden soll daher ein großflächiger Messbereich für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  betrachtet werden.

In [Abbildung 14](#) sind die Messergebnisse für diese Kapazität dargestellt. Die gewonnene Messreihe setzt sich aus drei Teilmessungen mit jeweils unterschiedlicher Eingangs-dämpfung zusammen, um einen möglichst großen Amplitudenbereich abzudecken. Im Übergangsbereich überlappen die Teilmessungen nahtlos, sodass der gesamte Datensatz als eine Messung über einen großen Amplitudenbereich interpretiert werden kann. Durch die Verwendung unterschiedlicher Schwellenwerte am Oszilloskop ist sichergestellt, dass die gewonnenen Einzelpulse gleichmäßig über den gesamten Messbereich verteilt sind. Der im Pythoncode verwendete Schwellenwert für die Messung der ToT-Dauer der Ausgangsamplituden beträgt in diesen Messungen  $80 \text{ mV}$ . Die Erläuterungen zur [Abbildung 10](#) zeigen, dass diese Schwelle für die Offline-Datenanalyse entscheidend ist, um auch den Bereich der hohen Steigung im Zusammenhang von ToT-Dauer und Eingangsamplitude zu erfassen.



**Abbildung 14:** Dargestellt sind die Messdaten der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ . Die grüne Kurve zeigt Messungen mit einer Dämpfung von  $20 \text{ dB}$  und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von  $15 \text{ mV}$ . Die blaue Kurve entspricht einer Dämpfung von  $12 \text{ dB}$  und einem Schwellenwert von  $20 \text{ mV}$ , während die rote Kurve eine Dämpfung von  $6 \text{ dB}$  und einen Schwellenwert von  $30 \text{ mV}$  zeigt.

Wie in Abschnitt 4.3 erläutert, lässt sich im unteren Amplitudenbereich ein steiler Anstieg erkennen, während oberhalb von etwa  $40 \text{ mV}$  ein deutlich abflachender Verlauf auftritt. Dieser Verlauf beschreibt eine Pulsform, die im oberen Bereich eine breite, abgerundete Puls-kuppe aufweist. Dadurch resultiert im ToT-Amplituden-Diagramm zunächst eine steile Steigung. Beim Betrachten des Signalpulses verläuft die Abfallflanke

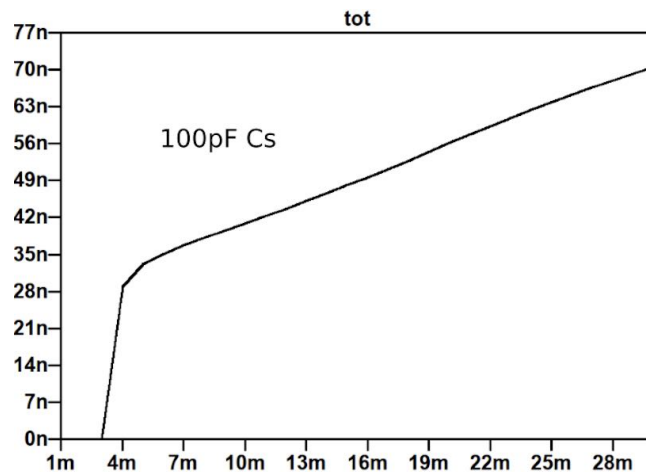
im unteren Pulsbereich im Verhältnis zur Eingangsamplitude steiler, was in der Darstellung in [Abbildung 14](#) durch die Abflachung der Kurve sichtbar wird. Die Rundung im Übergang der beiden Verläufe deutet auf einen Bereich hin, in dem der A2ToTLC kein lineares Verhalten aufweist.

Die grüne Messreihe hat eine Dämpfung von 20 dB und einen am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 15 mV. Durch die starke Dämpfung werden viele Ereignisse in den unteren Amplitudenbereich verschoben. Die genutzte Dämpfung und der am Oszilloskop eingestellte Schwellenwert beeinflussen die Form der Kurve nicht, sondern lediglich die Verteilung der Messpunkte auf dieser Kurve.

Die Messreihe mit einer Dämpfung von 12 dB und einem Schwellenwert von 20 mV liegt genau zwischen dem unteren steilen Anstieg der Kurve und dem abgeflachten Bereich, wobei dort eine kontinuierliche Krümmung erkennbar ist. Also liegt diese Messung genau in dem bereits beschriebenen Intervall, in dem die Pulsform nicht durch den A2ToTLC linearisiert wird.

Die rot dargestellte Messung mit einer Dämpfung von 6 dB und einem Schwellenwert von 30 mV befindet sich fast vollständig im Bereich mit geringer Steigung.

Zum qualitativen Vergleich zeigt [Abbildung 15](#) die LTSpice-Simulation für  $C_S = 100$  pF.



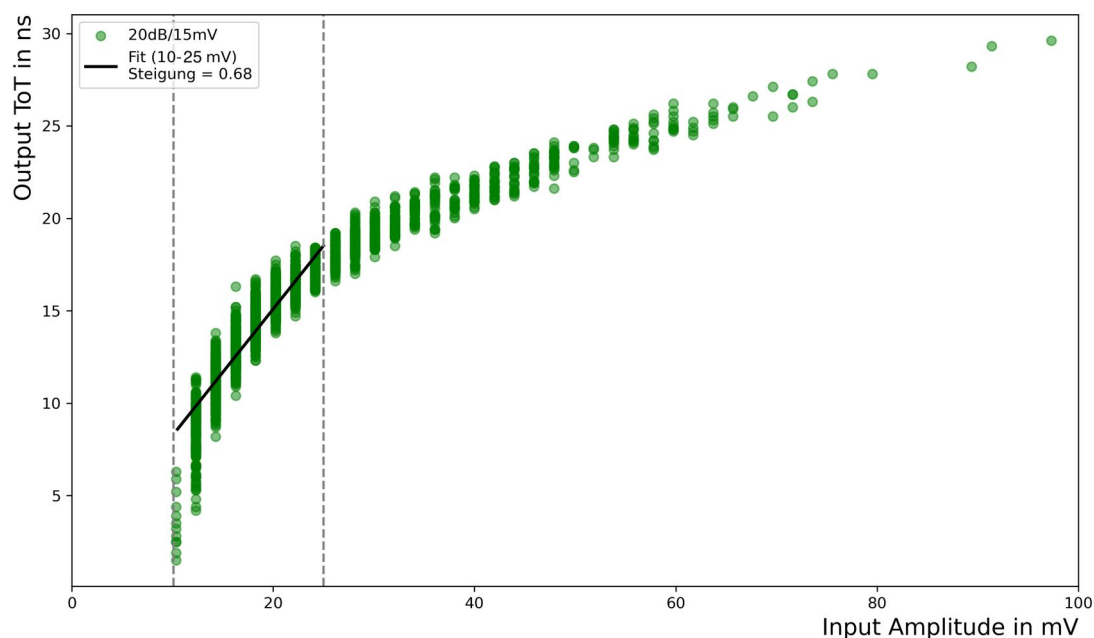
**Abbildung 15:** Simulation der ToT-Dauer in Nanosekunden in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude in Millivolt bei einer Kapazität von  $C_S = 100$  pF. Im Bereich zwischen 5 mV und 30 mV ergibt sich eine Steigung von  $\approx 1,73$  ns/mV.

Korrespondierend zu den Messwerten treten auch in der Simulation in [Abbildung 15](#) zwei verschiedene Trends auf. Ein unterer Bereich zwischen etwa 3 mV und 4 mV mit hoher Steigung sowie ein zweiter Bereich zwischen 4 mV und 30 mV mit geringerer Steigung von  $\approx 1,73$  ns/mV. Der Übergang zwischen beiden Bereichen liegt bei etwa 30 ns auf der ToT-Achse und weist in der Simulation eher einen Knick als eine kontinuierliche Krümmung wie in [Abbildung 14](#) auf.

Für eine nähere Analyse des steilen Anstiegs in den Messergebnissen ist insbesondere die grüne Messreihe mit 20 dB Dämpfung und 15 mV Schwellenwert relevant, da sie



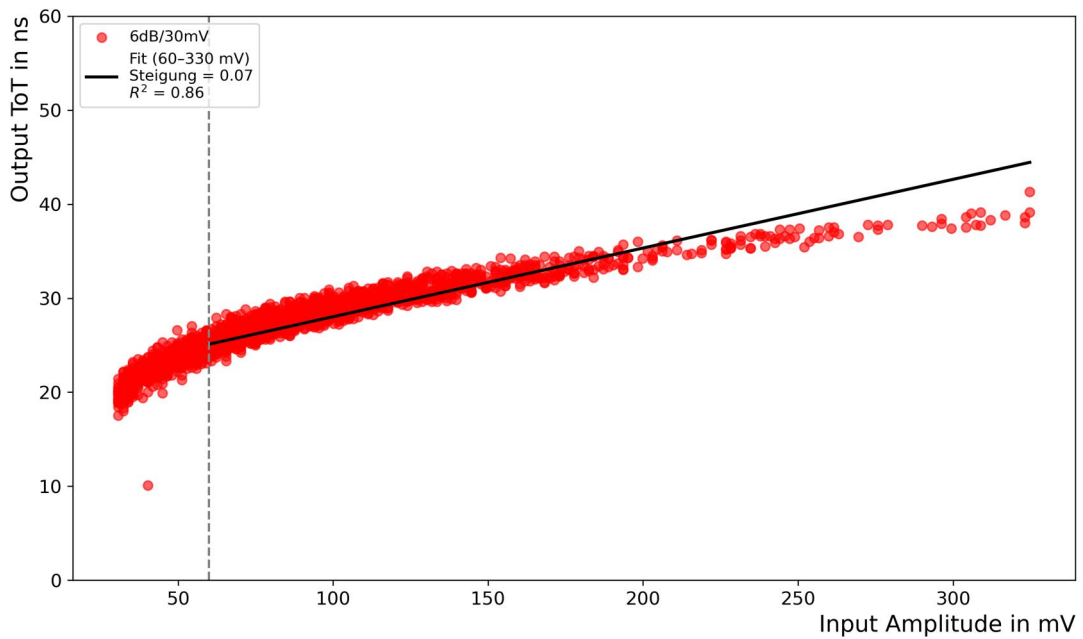
die meisten Ereignisse in diesem Bereich enthält. Eine detaillierte Darstellung dieser Messung ist in [Abbildung 16](#) aufgeführt.



**Abbildung 16:** Dargestellt ist die ToT–Amplitude-Kennlinie für eine Kapazität von  $C_S = 100$  pF. Die Messdaten haben eine Dämpfung von 20 dB und einen am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 15 mV. Der lineare Fit liegt im Intervall zwischen 10 mV und 25 mV und ergibt eine Steigung von 0,68 ns/mV, wobei eine deutliche Streuung der Messpunkte erkennbar ist.

Innerhalb des markierten Intervalls zwischen 10 mV und 25 mV ergibt sich eine Steigung von 0,68 ns/mV. Allerdings macht sich die schlechte Auflösung in diesem Bereich im quantisierten Muster der Messpunkte bemerkbar. Zusätzlich ist die Streuung groß, sodass der Fehler erheblich ist und die berechnete Steigung damit keine präzise Aussage zulässt. Die ermittelte Steigung hängt empfindlich von der Wahl der Begrenzungslinien ab, da die Daten in diesem Bereich keine ausgeprägte Linearität aufweisen.

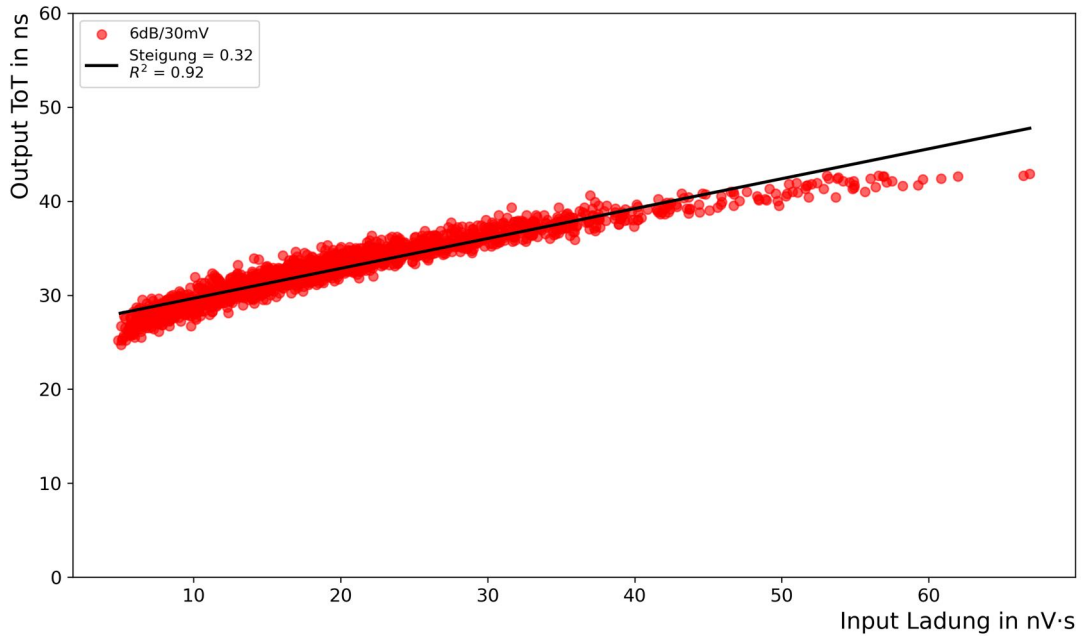
In [Abbildung 14](#) fällt auf, dass die rote Messreihe mit 6 dB Dämpfung und 30 mV Schwellenwert einen großen Teil der hohen Amplitudenwerte abdeckt und einen annähernd linearen Verlauf zeigt. Eine separate Darstellung dieses Bereichs ist in [Abbildung 17](#) gegeben.



**Abbildung 17:** Gezeigt ist die ToT–Amplitude-Kennlinie für eine Kapazität von  $C_S = 100$  pF. Die Messdaten sind mit einer Dämpfung von 6 dB und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 30 mV konfiguriert. Der lineare Fit erstreckt sich über das Intervall zwischen 60 mV und 330 mV und ergibt eine Steigung von 0,07 ns/mV bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,86$ .

Die lineare Anpassung ergibt eine Steigung von 0,07 ns/mV. Damit ist ein linearer Zusammenhang vorhanden, mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,86$ , was eine verhältnismäßig geringe Streuung impliziert. Es ist zu erkennen, dass der Fit in [Abbildung 17](#) die Messdaten im Intervall von 60 mV bis 200 mV besonders gut annähert. In diesem Intervall liegen auch fast alle Messpunkte. Wird die Form des Ausgangspulses betrachtet, linearisiert die A2ToTLC bei großen Eingangsamplituden die Abfallflanke mit einem gewissen Fehler linear.

Da die ToT-Methode letztlich zur Bestimmung der Pulsladung eingesetzt wird, ist in [Abbildung 18](#) der Zusammenhang zwischen ToT-Dauer und Ladung für die Messung mit einer Dämpfung von 6 dB und einem Schwellenwert von 30 mV dargestellt, also jene, die den linearen Bereich der großen Eingangsamplituden beschreibt.



**Abbildung 18:** Dargestellt ist der Fit der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ . Die Messdaten zeigen eine Dämpfung von 6 dB und einen am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 30 mV. Der Fit weist eine Steigung von  $0,32 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$  auf.

Wie erwartet ergibt sich ein linearer Verlauf mit einer Steigung von  $0,32 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$ . Dies stellt eine sehr gute Anpassung mit geringer Streuung dar.

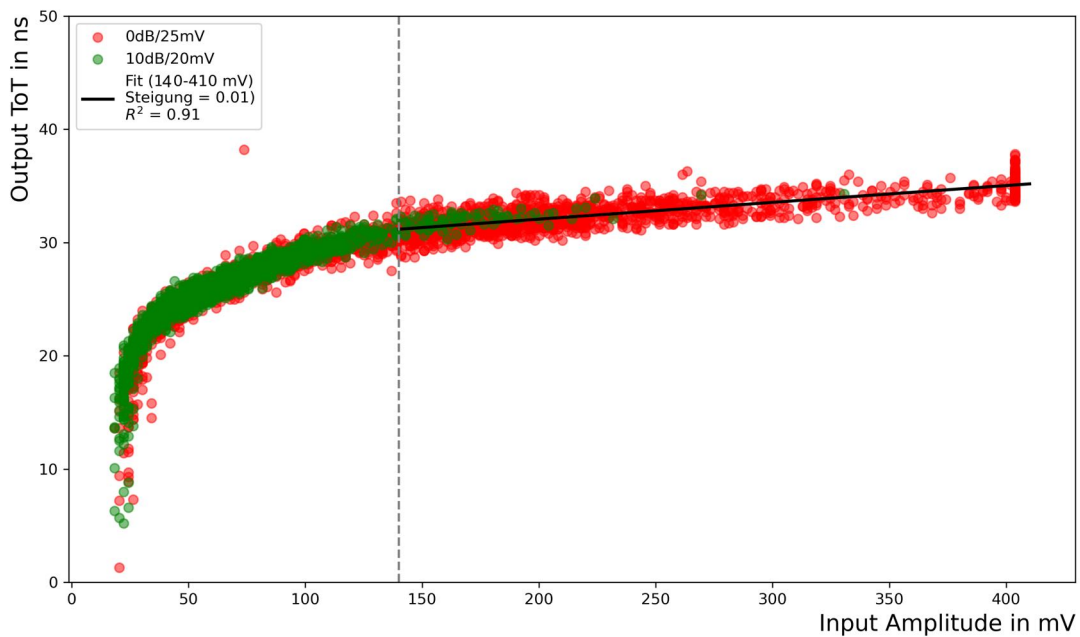
Im Anhang ist in [Abbildung 24](#) die Linearität zwischen Pulsladung und Eingangsamplitude dargestellt. Das Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,99$  belegt eine nahezu perfekte Korrelation, sodass die in [Gleichung 5](#) beschriebenen Zusammenhänge als bestätigt angesehen werden können.

Es lässt sich somit für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  festhalten, dass die Schaltung im unteren Amplitudenbereich keinen stabilen linearen Trend liefert, im Bereich hoher Amplituden jedoch eine gute Linearität mit geringer Steigung aufweist und eine große Spanne von Amplitudenwerten abdeckt. Außerdem stellt die Darstellung zwischen ToT und Ladung für hohe Eingangsamplituden eine Linearität mit einem Bestimmtheitsmaß von ( $R^2 = 0,92$ ) dar. Dies macht die Konfiguration des A2ToTLC mit einer Kapazität von 100 pF insbesondere für Anwendungen interessant, bei denen große Pulse bevorzugt analysiert werden.

### 5.3 Auswertung der Messung mit $C_S = 330 \text{ pF}$

Die Kapazität wird im nächsten Schritt auf  $C_S = 330 \text{ pF}$  erhöht. Nach [Gleichung 4](#) lässt dies eine höhere Steigung und damit eine bessere Auflösung erwarten.

Für die Messung werden drei Konfigurationen realisiert. Zunächst eine Aufnahme ohne Dämpfung bei einem eingestellten Schwellenwert am Oszilloskop von 25 mV und eine zweite Einstellung mit 10 dB Dämpfung und einem Schwellenwert von 20 mV. Eine weitere Messung wird mit 20 dB Dämpfung und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 10 mV konfiguriert, sodass auch kleine Amplitudenwerte der Eingangssignale betrachtet werden können. Es werden Dämpfungen mit deutlich unterschiedlichen Stufen eingesetzt, um den abgedeckten Amplitudenbereich zu maximieren. Der im Pythoncode verwendete Schwellenwert für die Ausgangsamplituden beträgt in allen Fällen 10 mV. Die Ergebnisse der ersten Messung sind in [Abbildung 19](#) dargestellt.

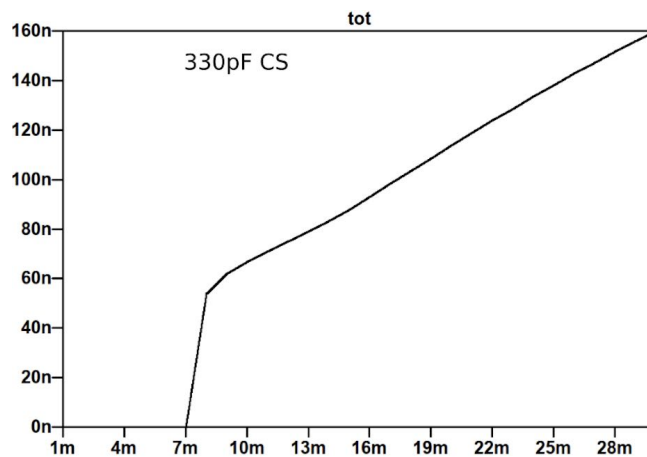


**Abbildung 19:** Dargestellt ist die ToT–Amplitude-Kennlinie für eine Kapazität von  $C_S = 330$  pF. Die Messdaten zeigen zwei Dämpfungsstufen, eine mit 0 dB und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 25 mV in rot dargestellt, sowie eine mit 10 dB und einem Schwellenwert von 20 mV in grün dargestellt. Der lineare Fit erstreckt sich über das Intervall zwischen 140 mV und 410 mV und ergibt eine Steigung von 0,01 ns/mV bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ .

Zunächst fällt auf, dass diese Messreihe ein sehr großes Amplitudenintervall von 10 mV bis 400 mV abdeckt. Die rote Messreihe ist ungedämpft und deckt den gesamten Messbereich ab Eingangsamplituden von 25 mV ab. Oberhalb von etwa 140 mV ist eine Linearität zu erkennen, die allerdings mit der geringen Steigung von 0,01 ns/mV nur eine sehr schlechte Auflösung ermöglicht. Die Messpunkte, vor allem die der grünen Messung (10 dB, 20 mV), verteilen sich auch im Bereich der kleinen Eingangsamplituden (zwischen 20 mV und 50 mV). Allerdings liegen dort zu wenige Ereignisse vor, um eine Quantifizierung der Linearität vorzunehmen. Für Amplitudenwerte unterhalb von 140 mV weist die Kurve zwei Trends auf. Einen Trend mit hoher Steigung, der sich auf ein sehr kleines Amplitudenintervall mit wenigen Ereignissen konzentriert und einen

weiteren linearen Trend mit geringerer Steigung, aber mit einer größeren Amplitudenspanne.

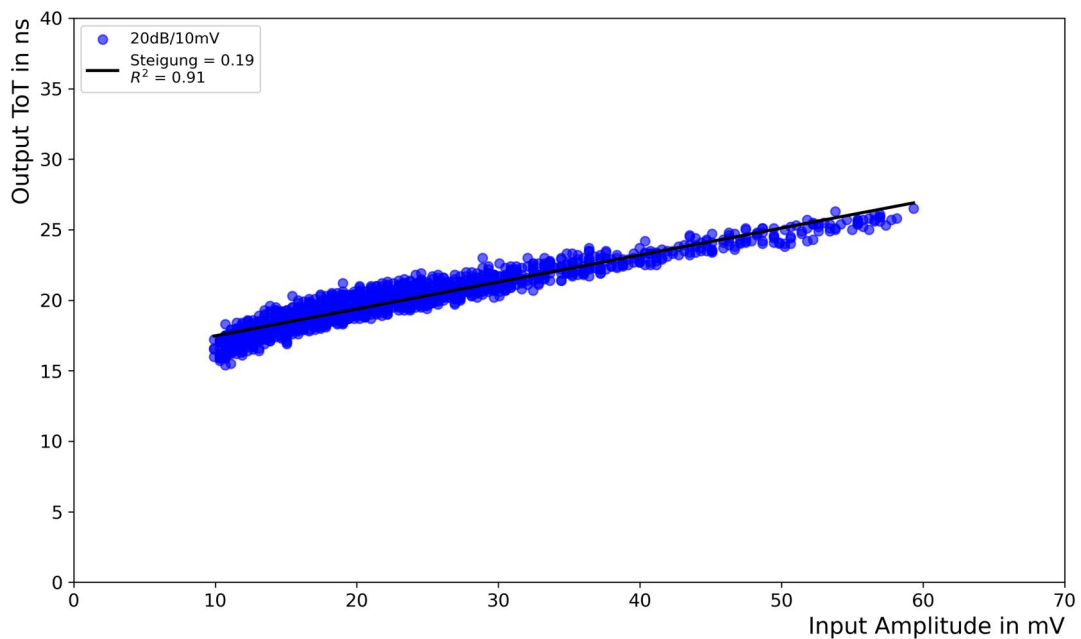
Der Vergleich mit der Simulation in [Abbildung 20](#) zeigt ebenfalls eine Trendänderung im Bereich kleiner Amplituden. Sehr große Amplituden, für die in den Messdaten eine Steigung von fast 0 ns/mV beobachtet wird, sind in der Simulation nicht berücksichtigt.



**Abbildung 20:** Dargestellt ist die Simulation der ToT-Dauer in Nanosekunden in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude in Millivolt bei einer Kapazität  $C_S = 330 \text{ pF}$  mit einer Steigung zwischen 8 mV und 30 mV von  $\approx 3,4 \text{ ns/mV}$ .

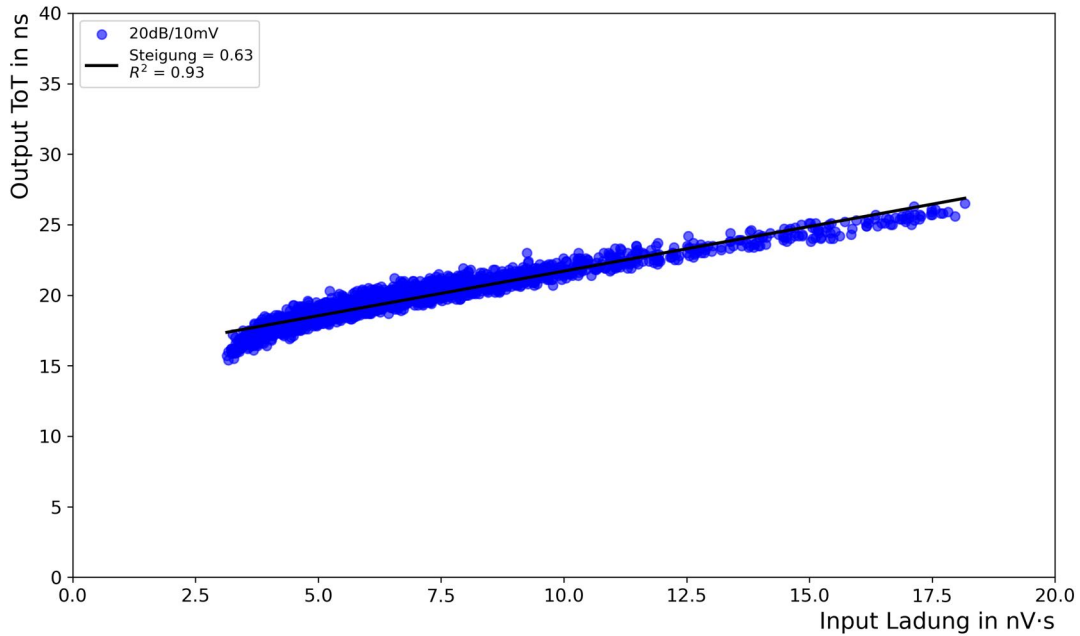
In der Simulation ergibt sich eine Steigung zwischen 8 mV und 30 mV von  $\approx 3,40 \text{ ns/mV}$ . Die Steigungswerte der Simulation sind nicht direkt mit den Steigungswerten aus den Messdaten vergleichbar. In der Simulation ergeben sich andere Quantitäten als in der realen Messung, da bestimmte physikalische Effekte nicht berücksichtigt werden.

Durch gezielte Konfiguration der Dämpfung und des Schwellenwerts soll eine weitere Messung, ebenfalls mit einer Kapazität von  $C_S = 330 \text{ pF}$ , möglichst alle Ereignisse in den Bereich unter 140 mV bündeln. Die Messung ist in [Abbildung 21](#) gezeigt und ist mit einer 20 dB Dämpfung und einem Schwellenwert der Eingangsamplituden von 10 mV versehen.



**Abbildung 21:** Dargestellt ist der Fit der ToT–Amplitude-Kennlinie im Bereich zwischen 10 mV und 60 mV. Die Messung erfolgt bei einer Dämpfung von 20 dB und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 10 mV. Der Fit ergibt eine Steigung von 0,19 ns/mV und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ .

Es ergibt sich ein klar linearer Zusammenhang mit einer gefitteten Steigung von 0,19 ns/mV und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ . Die Messung deckt einen Amplitudenbereich von 10 mV bis 60 mV ab, wobei kaum eine Krümmung zu erkennen ist. Für diese Messung wird in [Abbildung 22](#) der Zusammenhang zwischen der ToT-Dauer und der Ladung dargestellt.



**Abbildung 22:** Gezeigt ist der lineare Fit der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung bei einer Kapazität von  $C_S = 330 \text{ pF}$ . Die Messung hat eine Dämpfung von 20 dB und einen am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 10 mV. Der Fit ergibt eine Steigung von  $0,63 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,93$ .

Hier zeigt sich ein linearer Verlauf mit einer Steigung von  $0,63 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,93$ .

Die entsprechende Auswertung des Fits zwischen Pulsladung und Eingangsamplitude ist im Anhang in [Abbildung 25](#) dargestellt. Der lineare Fit weist mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 1,0$  eine nahezu perfekte Korrelation auf, womit die in [Gleichung 5](#) hergeleiteten Zusammenhänge bestätigt werden.

Dies unterstreicht, dass der A2ToTLC bei einer Kapazität von 330 pF für Eingangsamplituden von 10 mV bis 60 mV sowohl ein konsistentes lineares Verhalten zwischen ToT-Dauer und Pulsladung aufweist als auch eine gute Auflösung ermöglicht.

## 5.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Auswertung zeigt für die verschiedenen Kapazitäten unterschiedliche Messbereiche, die eine gute lineare Näherung des Zusammenhangs zwischen der Tot-Dauer und der Eingangsamplitude aufweisen. Durch geeignete Konfigurationen von Dämpfung und Schwellenwerteinstellungen am Oszilloskop für die Eingangssignale können die Messereignisse auf die gewünschten Bereiche konzentriert werden. Mit Hilfe des im Python-Code festgelegten Schwellenparameters wird festgelegt, auf welcher Höhe der transformierten Ausgangssignale die ToT-Dauer abgegriffen wird. Diese Einstellung ermöglicht es daher, den Einfluss der Kuppenform des Pulses, die sich im Trend des steilen Anstiegs zeigt, hervorzuheben.

Die simulierten Kurven für die drei Kapazitäten weisen qualitativ ein ähnliches Verhalten wie die gemessenen Daten auf. In allen Simulationen ist zunächst ein steiler Anstieg gefolgt von einem flacheren Verlauf zu beobachten, wie die Abbildungen 13, 15 und 20 zeigen. Dies bedeutet, dass auch in der Simulation reale Effekte, etwa die abgeflachte Pulsspitze, berücksichtigt werden. Da nicht alle physikalischen Einflüsse, wie Dämpfung oder spezifische Geräteeinstellungen, mit einbezogen sind, entspricht die Skalierung nicht den Messdaten. Zudem erfolgt in der Simulation keine Offline-Analyse, bei der ein separater Schwellenwert im Python-Code definiert wird, der die Abhängigkeit der ToT-Dauer von der Eingangsamplitude zusätzlich beeinflusst.

Bei einer Kapazität von  $C_S = 47 \text{ pF}$  zeigt die Messung im Verlauf der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude in Abbildung 11 ebenfalls eine deutliche Trendänderung. Dies deutet darauf hin, dass die Pulsform des Ausgangssignals selbst einen Übergang aufweist, der die flachere Pulskuppe vom restlichen Verlauf des Pulses trennt.

Wird eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  verwendet, zeigt die Darstellung der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Amplitude eine Krümmung zwischen den beiden linearen Bereichen, die sich über einen weiten Amplitudenbereich erstreckt (vgl. Abbildung 14). Dadurch ist es schwierig, zwei klar voneinander abgegrenzte Trends zu identifizieren und den Übergang eindeutig festzulegen. Diese Krümmung lässt auf eine Pulsform schließen, bei der ein großer Teil der Abfallflanke nicht vollständig durch den A2ToTLC linearisiert wird.

Bei der Verwendung einer Kapazität von  $C_S = 330 \text{ pF}$  wurde durch die Wahl von Dämpfung und Schwellenwert ein besonders großes Intervall an Eingangsamplituden aufgezeichnet. Die Spanne reicht von 10 mV bis 410 mV, wie in Abbildung 19 dargestellt. Der Verlauf der Kurve von der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude zeigt dabei drei Abschnitte mit unterschiedlicher Steigung. Zunächst gibt es einen Bereich mit starkem Anstieg, gefolgt von einer Krümmung und einem abgeflachten Verlauf, der einen potenziell linearen Bereich mit hoher Ereignisdichte darstellt. Ab einer Amplitude von etwa 140 mV ist ein weiterer Knick erkennbar, an den sich ein fast waagerechter Abschnitt mit einer Steigung nahe null anschließt. Dieser Verlauf wird in der Simulation nicht wiedergegeben. Dies liegt daran, dass der simulierte Amplitudenbereich eingeschränkt ist, während in den Messdaten ein deutlich größerer dynamischer Bereich abgedeckt wird. Daher lässt sich aus den Simulationen kein verlässlicher Schluss auf das Verhalten bei hohen Amplituden ziehen.

Eine quantitative, vergleichende Betrachtung der linearen Trends für die unterschiedlichen Messbereiche und Simulationen ist in Tabelle 2 dargestellt.



**Tabelle 2:** Aufgelistet sind die Steigungen der gemessenen ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude für die drei Kapazitäten sowie die entsprechenden Steigungen aus den Simulationen in den abgeflachten Bereichen. Bei den Messdaten wird zwischen dem Bereich mit starkem Anstieg und dem mit geringer Steigung unterschieden.

Kapazität $C_S$	Messdaten starker Anstieg	Messdaten flacher Anstieg	Simulation flacher Anstieg
47 pF	0,66 ns/mV	0,06 ns/mV	$\approx 0,64$ ns/mV
100 pF	0,68 ns/mV	0,07 ns/mV	$\approx 1,73$ ns/mV
330 pF	keine Auswertung möglich	0,19 ns/mV	$\approx 3,40$ ns/mV

Die aus den Simulationen ermittelten Steigungen bestätigen die in [Gleichung 4](#) dargestellte theoretische Beziehung, wonach eine höhere Kapazität zu einer größeren Steigung führt. Die Messdaten zeigen ebenfalls eine Zunahme der Steigungswerte mit steigender Kapazität, jedoch in deutlich geringerer Skalierung als in den Simulationen. Wie in [Tabelle 2](#) zu erkennen ist, erhöht sich die Steigung im abgeflachten Bereich der Messkurven zwischen den Kapazitäten  $C_S = 47$  pF und  $C_S = 100$  pF lediglich um 0,01 ns/mV. Dies entspricht einer Zunahme von etwa 17%. Im Vergleich der Steigungen im abgeflachten Bereich von einer Kapazität von  $C_S = 100$  pF und einer Kapazität von  $C_S = 330$  pF ergibt sich eine Differenz von 0,12 ns/mV und damit ein Anstieg um etwa 171%. Dabei ist der dritte, nahezu horizontale Abschnitt mit einer Steigung von 0,01 ns/mV nicht berücksichtigt. In diesem Abschnitt treten die meisten Ereignisse bei Amplituden auf, die außerhalb des Wertebereichs liegen, der für die Kapazitäten  $C_S = 47$  pF und  $C_S = 100$  pF erfasst wurde. Ein direkter Vergleich der Steigungen zwischen den Kapazitäten ist daher nicht möglich, darüber hinaus hat dieser Bereich keine Entsprechung in der Simulation.

Die Bereiche des steilen Anstiegs lassen sich mit den theoretischen Vorhersagen nicht erfassen. In [Abschnitt 4.3](#) wird erläutert, dass der steile Anstieg durch die Abweichung der realen Pulskuppe von der idealisierten Pulsform entsteht. Daher ist [Gleichung 4](#) nicht geeignet, um die Unterschiede in der Steigung zu erklären. In [Tabelle 2](#) sind für die Kapazitäten  $C_S = 47$  pF und  $C_S = 100$  pF Steigungswerte im Bereich des starken Anstiegs angegeben, die eine Zunahme um 0,02 ns/mV zeigen. Eine Quantifizierung der Steigung bei  $C_S = 330$  pF ist in diesem Bereich jedoch nicht möglich, da dort zu wenige Ereignisse vorliegen und die Auflösung nicht ausreicht, um eine numerische Steigung zuverlässig zu bestimmen.

Obwohl die in [Tabelle 2](#) aufgeführten Steigungen für die flacheren Trends grundsätzlich mit der Theorie übereinstimmen, sind einige Werte nur eingeschränkt aussagekräftig, da der Fitfehler teils beträchtlich ist. Bei genauerer Betrachtung der Kurve im Bereich kleiner Amplituden für  $C_S = 100$  pF zeigt sich, dass keine gute Linearität vorliegt. Zwar weist [Abbildung 16](#) einen linearen Fit für niedrige Amplituden auf, jedoch ist die Auflösung dort sehr gering und der Fitfehler ist deutlich erkennbar.

Auch für  $C_S = 47$  pF zeigt [Abbildung 11](#) im abgeflachten Bereich eine erhebliche Streuung und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,75$ , was auf eine unzureichende Linearität hinweist. Darüber hinaus zeigt der Fit in [Abbildung 12](#) eine unregelmäßige Verteilung der Messpunkte mit demselben Bestimmtheitsmaß. Bei dieser Messung mit Dämpfungen von 10 dB und 20 dB liegen die meisten Ereignisse im Bereich des steilen Anstiegs,

wodurch der flache Abschnitt nur begrenzt aussagekräftig ist.

Eine deutlich bessere Linearität zeigt sich im Bereich der abgeflachten Steigung für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ , wie in [Abbildung 17](#) dargestellt ist. Diese Messung wurde mit einer Dämpfung von 6 dB und einem Oszilloskop-Schwellenwert von 30 mV durchgeführt. Der lineare Fit ergibt ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,86$  und deckt einen Amplitudenbereich von 60 mV bis 330 mV ab. Die Darstellung der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung zeigt eine ausgeprägte Linearität (vgl. [Abbildung 18](#)). Hier beträgt die Steigung  $0,32 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$ , was auf eine geringe Streuung hinweist. Da bei der untersuchten Methode des A2ToTLC über die ToT-Dauer Rückschlüsse auf die Pulsladung gezogen werden sollen, ist dieses Ergebnis als sehr positiv zu bewerten. Damit erweist sich die Konfiguration des A2ToTLC mit einer Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ , einer Dämpfung von 6 dB und einem Schwellenwert von 30 mV am Oszilloskop als besonders geeignet zur Analyse von Pulsen mit größeren Amplituden.

Für eine Kapazität von  $C_S = 330 \text{ pF}$  zeigt [Abbildung 19](#) im sehr flachen Bereich zwischen 140 mV und 410 mV ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ , was eine gute lineare Annäherung darstellt. Allerdings ist die Steigung in diesem Bereich mit  $0,01 \text{ ns/mV}$  so gering, dass die Auflösung unzureichend ist und sich dieser Bereich daher kaum für experimentelle Anwendungen eignet. Werden die Konfigurationen mit einer Dämpfung von 20 dB und einem Oszilloskop-Schwellenwert von 10 mV hingegen so angepasst, dass die Ereignisse in den Amplitudenbereich zwischen 10 mV und 60 mV fallen, ergibt sich eine gute Linearität (vgl. [Abbildung 21](#)) mit einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$  zwischen ToT-Dauer und Eingangsamplitude. Die höhere Steigung von  $0,19 \text{ ns/mV}$  führt zu einer geeigneten Auflösung für die experimentelle Anwendung. Die Darstellung der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung zeigt für diese Konfiguration ebenfalls eine klare lineare Beziehung mit einer Steigung von  $0,63 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,93$ . Diese Kalibrierung eignet sich somit besonders gut, um über die ToT-Dauer Rückschlüsse auf die Pulsladung im Bereich kleiner Amplituden zu ziehen.

## 6 Fazit

Diese Arbeit widmete sich der experimentellen Charakterisierung des A2ToTLC und der Analyse, wie verschiedene Konfigurationen die Linearität zwischen Eingangsamplitude und ToT-Dauer beeinflussen, um daraus Rückschlüsse auf die Pulsladung zu ziehen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Kapazität  $C_S$  einen entscheidenden Einfluss auf das Messverhalten des A2ToTLC hat. Sowohl die Ausdehnung des linearen Bereichs als auch die erreichbare Auflösung hängen direkt davon ab. Bei geeigneter Einstellung stellt der A2ToTLC einen ausgewogenen Kompromiss zwischen hoher Auflösung und großem Dynamikbereich dar, der sich über die Wahl von  $C_S$  gezielt steuern lässt.

Für die Kapazität von  $C_S = 47 \text{ pF}$  zeigt sich, dass die Messdaten eine deutliche Streuung aufweisen und sowohl im Bereich des steilen als auch des flachen Anstiegs keine stabile Linearität erzielen. Die ermittelten Fits weisen für beide Bereiche ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,75$  auf, was auf eine unzureichende Korrelation zwischen ToT-Dauer und Eingangsamplitude hinweist. Diese Konfiguration ist daher für präzise quantitative

Analysen nicht geeignet.

Bei einer Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  ergibt sich dagegen ein deutlich linearerer Zusammenhang. Mit einer Dämpfung von 6 dB und einem Schwellenwert von 30 mV wird im Bereich großer Amplituden ein Fit mit einer Steigung von  $0,07 \text{ ns/mV}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,86$  erzielt. Die zusätzliche Betrachtung der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung liefert eine noch bessere Linearität mit einer Steigung von  $0,32 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,92$ . Die Kombination aus breitem linearem Bereich und geringer Streuung macht diese Konfiguration des A2ToTLC mit einer Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$  zu einer geeigneten Einstellung für mittlere bis hohe Amplitudenwerte und bietet eine verlässliche Grundlage für Rückschlüsse auf die deponierte Energie.

Für die Kapazität  $C_S = 330 \text{ pF}$  zeigt sich, dass die Messdaten besonders gut für den Bereich kleiner Eingangsamplituden geeignet sind. Bei einer Dämpfung von 20 dB und einem Oszilloskop-Schwellenwert von 10 mV ergibt sich eine Steigung von  $0,19 \text{ ns/mV}$  bei einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,91$ . Auch die Darstellung der ToT-Dauer in Abhängigkeit von der Pulsladung bestätigt diesen linearen Zusammenhang mit einer Steigung von  $0,63 \frac{\text{ns}}{\text{nV}\cdot\text{s}}$  und einem Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,93$ . Diese Konfiguration ist daher besonders für Anwendungen geeignet, bei denen niedrige Amplituden präzise erfasst werden sollen. Gleichzeitig weist sie eine hohe Sensitivität auf, was eine präzise Bestimmung der Pulsladung ermöglicht.

Die durchgeführten Untersuchungen verdeutlichen, dass der A2ToTLC in seiner Grundfunktion eine effiziente und kostengünstige Methode darstellt, um Amplitudeninformationen über die ToT-Dauer in eine messbare Größe zu überführen und damit indirekt auf die Pulsladung zu schließen. Die Wahl der Kapazität bestimmt dabei maßgeblich, in welchem Amplitudenbereich eine zuverlässige Linearität erzielt werden kann. Während die Kapazität  $C_S = 47 \text{ pF}$  aufgrund der geringen Stabilität des linearen Bereichs nicht für präzise Anwendungen geeignet ist, zeigt die Kapazität  $C_S = 100 \text{ pF}$  eine stabile Linearität für hohe Amplituden. Die Kapazität  $C_S = 330 \text{ pF}$  zeigt eine deutlich verbesserte Linearität im Bereich kleiner Amplituden und ermöglicht dort eine höhere Auflösung. Für Anwendungen an Szintillationsdetektoren mit einem breiten Spektrum an Eingangssignalen bietet daher die Kombination der Kapazitäten  $C_S = 100 \text{ pF}$  und  $C_S = 330 \text{ pF}$  eine praktikable Lösung, da sie zusammen einen großen Amplitudenbereich abdecken und somit eine konsistente lineare Abbildung der Eingangssignale über einen weiten Dynamikbereich ermöglichen.

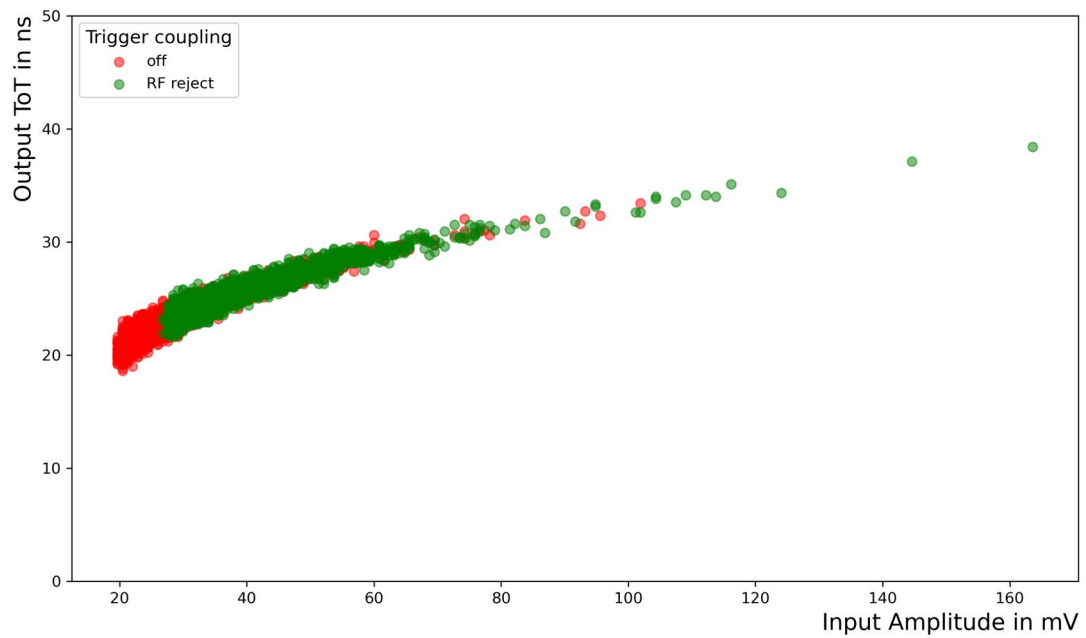
Abschließend lässt sich festhalten, dass das Konzept des A2ToTLC ein vielversprechender Ansatz für den Einsatz in großskaligen Detektorsystemen wie CBM oder HADES ist. Die Schaltung verbindet eine solide Messgenauigkeit mit einem vergleichsweise geringen Energieverbrauch und einem einfachen Aufbau, was sie besonders für Anwendungen mit vielen Kanälen und hohen Ereignisraten interessant macht. Langfristig bietet der A2ToTLC das Potenzial, in Hochratenexperimenten als energieeffiziente und zugleich präzise Ausleseschaltung eingesetzt zu werden, wodurch sich der technische Aufwand und das erzeugte Datenvolumen deutlich reduzieren ließen.

## Literatur

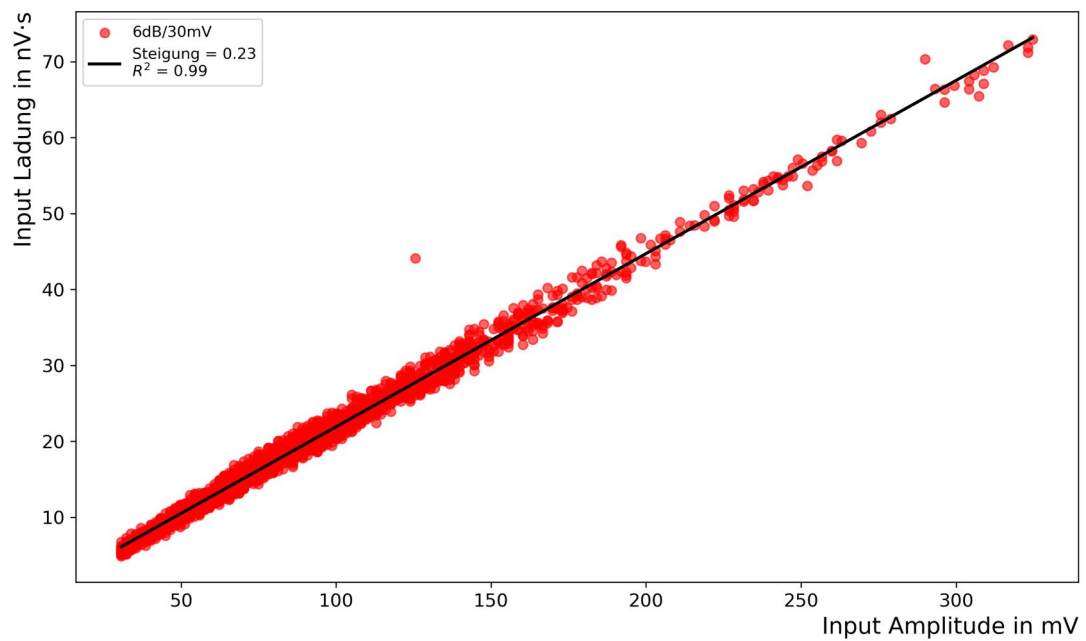
- [1] Wikimedia Commons  
*Offizielles Logo der Bergischen Universität Wuppertal*  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BUW\\_Logo.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:BUW_Logo.svg),  
Autor: Bergische Universität Wuppertal, Grafikdesign der Wissenschaftstransferstelle, Design von Klaus Winterhager  
(zuletzt geändert: 23.10.2023)
- [2] Wissenschaftlicher Artikel  
*Shaping circuit for improving linearity, dynamic range, and bandwidth of particle detector readouts based on Time-over-Threshold.*  
Autoren: J. Peña-Rodríguez, J. Förtsch, C. Pauly, K.-H. Kampert  
<https://arxiv.org/abs/2508.00739>  
(zuletzt geändert: 05.06.2025)
- [3] Wikipedia  
*Photomultiplier*  
<https://de.wikipedia.org/wiki/Photomultiplier>,  
(entnommen am 07.06.2025)
- [4] Datenblatt  
*BC-400,BC-404,BC-408,BC-412,BC-416 Premium Plastic Scintillators*  
Autor: Luxium Solutions  
[https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2023-08/146337\\_Luxium\\_SGC%20BC400%20404%20408%20412%20416\\_FIN.pdf](https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2023-08/146337_Luxium_SGC%20BC400%20404%20408%20412%20416_FIN.pdf),  
(entnommen am 28.07.2025)
- [5] Datenblatt  
*photomultiplier tubes XP2020*  
[https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2023-08/146337\\_Luxium\\_SGC%20BC400%20404%20408%20412%20416\\_FIN.pdf](https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2023-08/146337_Luxium_SGC%20BC400%20404%20408%20412%20416_FIN.pdf),  
(entnommen am 28.07.2025)
- [6] Wikipedia  
*Bel (Einheit)*  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Bel\\_\(Einheit\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Bel_(Einheit)),  
(entnommen am 07.06.2025)
- [7] Datenblatt  
*Spannungsversorgung der Verstärkung*  
<https://www.farnell.com/datasheets/27742.pdf>,  
(entnommen am 24.06.2025)
- [8] Datenblatt  
*Hochspannungsversorgung des PMT*  
[https://iseg-hv.com/download/AC\\_DC/SHR/iseg\\_manual\\_SHR\\_en.pdf](https://iseg-hv.com/download/AC_DC/SHR/iseg_manual_SHR_en.pdf),  
(entnommen am 24.06.2025)

- [9] Datenblatt  
*Oszilloskop*  
<https://assets-us-01.kc-usercontent.com/ecb176a6-5a2e-0000-8943-84491e5fc8d1/8b9ba28b-306d-44f0-80cc-797a74e9bb78/Rohde%20%26%20Schwarz%20RT01044%20Data%20Sheet.pdf>,  
(entnommen am 24.06.2025)
- [10] Particle Data Group (PDG)  
*Review of Particle Physics – Cosmic Rays at the Surface: Muons*  
Autor: R. L. Workman et al. (Particle Data Group)  
<https://pdg.lbl.gov/2023/reviews/rpp2023-rev-cosmic-rays.pdf>,  
(entnommen am 28.07.2025)

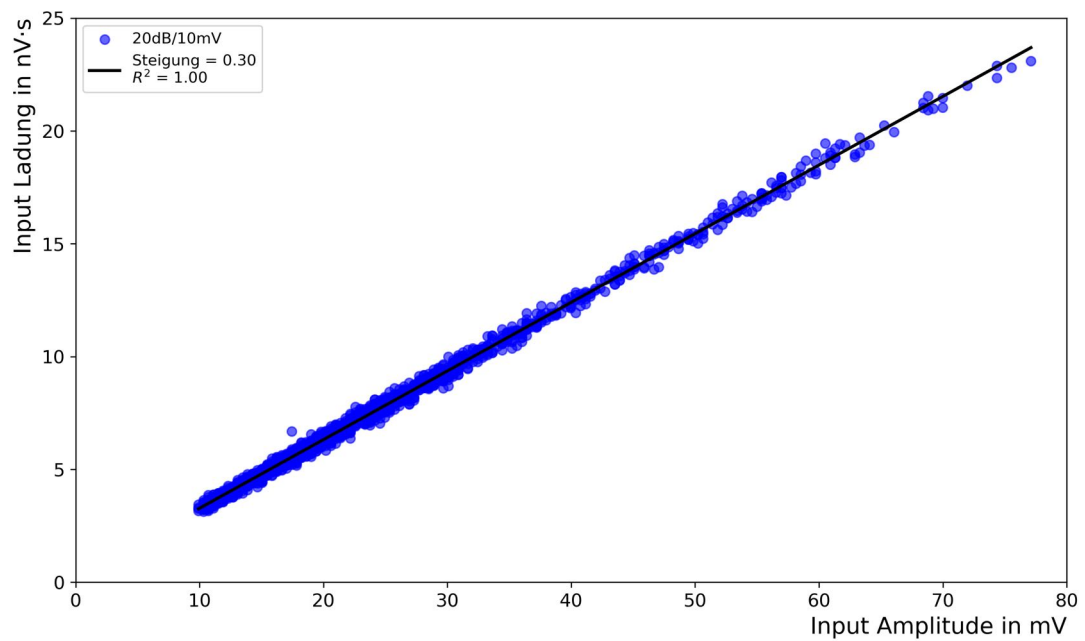
## 7 Anhang



**Abbildung 23:** Vergleich ToT-Dauern in Abhängigkeit der Eingangsamplituden bei aktiviertem „Trigger Coupling = RF Reject“ in grün und deaktiviertem Trigger Coupling in rot.



**Abbildung 24:** Dargestellt ist der Fit der Pulsladung in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude für eine Kapazität von  $C_S = 100 \text{ pF}$ , einer Dämpfung von 6 dB und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 30 mV. Die lineare Anpassung ergibt eine Steigung von  $0,23 \frac{\text{nV} \cdot \text{s}}{\text{mV}}$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 0,99$ .



**Abbildung 25:** Fit der Pulsladung in Abhängigkeit von der Eingangsamplitude für eine Kapazität von  $C_S = 330 \text{ pF}$ , einer Dämpfung von 20 dB und einem am Oszilloskop eingestellten Schwellenwert von 10 mV. Die lineare Anpassung ergibt eine Steigung von  $0,30 \frac{\text{nV} \cdot \text{s}}{\text{mV}}$  und ein Bestimmtheitsmaß von  $R^2 = 1,0$ .



Name, Vorname: Lippert, Paula

### Erklärung

gem. § 15 Abs. 6 der Prüfungsordnung vom 25.11.2019

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelor-Thesis selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

13.10.2025  
Datum

P. Lippert  
Unterschrift

### Erklärung

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit (Bachelor-Thesis) wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen und im Rahmen von externen Qualitätssicherungsmaßnahmen des Studienganges zur Einsichtnahme zur Verfügung gestellt werden kann.

Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

13.10.2025  
Datum

P. Lippert  
Unterschrift