



Detektion von Lichtblitzen an einer autonomen Detektorstation mithilfe einer Solarzelle

Bachelor Thesis
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science im Fach Physik

dem Fachbereich Physik
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Johannes Stracke

Abgabe:
04. Oktober 2013

Korrektur:
26. Dezember 2015

Betreuender Professor: Prof. Dr. K.-H. Kampert
Zweitkorrektor: Prof. Dr. Ch. Zeitnitz

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Grundlagen	5
2.1	Blitze	5
2.1.1	Teilblitze	6
2.1.2	Arten von Blitzen	7
2.1.3	Substruktur des Teilblitzes	9
2.2	Die Solarzelle	11
2.2.1	Funktionsweise und Betriebsarten	12
2.2.2	Absorptions- und Reflexionsspektrum	14
2.2.3	Reaktionsgeschwindigkeit und Kapazität	15
3	Messung der Kennlinie einer Solarzelle	17
3.1	Messaufbau und Durchführung	18
3.2	Ergebnisse und Beobachtungen	20
4	Reaktion einer Solarzelle auf Lichtpulse	23
4.1	Messaufbau	23
4.2	Signale im μs -Bereich	25
4.3	Abhängigkeit vom Lastwiderstand	25
4.4	Abhängigkeit zur Beleuchtungsstärke	29
4.5	Messung am Solarpanel	30
4.6	Zusammenfassung	32
5	Detektion von Blitzen mit einem Solarpanel	33
5.1	Messaufbau	33
5.2	Störungen	35
5.3	Messungen von Blitzen	37
6	Blitzmessungen an einer autonomen Detektorstation	40
6.1	Aufbau	40
6.2	Problematik und Lösungsansätze	41
7	Fazit	44
	Literaturverzeichnis	46
A	Anhang	46

1 Einleitung

Das Naturphänomen des Gewitterblitzes fasziniert schon seit jeher die Menschheit, sei es aus Furcht, Ehrfurcht oder aus rein wissenschaftlichem Interesse. Während es im Altertum vor allem als Zeichen der Götter gedeutet wurde, konnte nach der Entdeckung der Elektrizität eine Parallele zu elektrischen Entladungsvorgängen hergestellt werden [1]. Durch weitere Untersuchungen wurde ein genauerer Einblick in den zeitlichen Verlauf des Blitzes und dessen Eigenschaften sowie die Herstellung von künstlichen Blitzen möglich. Doch obwohl Gewitterblitze lange studiert wurden, sind die der natürlichen Blitzentstehung zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten bis heute noch nicht zweifelsfrei erforscht [2]. Dies zeigt insbesondere eine Messung aus dem Jahre 1995, bei der die Stärke des elektrischen Feldes innerhalb eines Gewitters vermessen wurde [3]. Überraschenderweise wurden während des Gewitters nur Felder von $1/10$ der Stärke erreicht, die im Labor für eine selbstständige Funkenentladung benötigt wird. Dieses Ergebnis, welches im Folgenden immer wieder bestätigt wurde, gab den Anstoß einer neuen Beurteilung der Entstehung von Blitzen.

Die zurzeit gängige Erklärung ist die Auslösung von Blitzen durch hochenergetische, kosmische Strahlung. Von diesen Strahlungen angeregte hochenergetische Elektronen werden im elektrischen Feld der Gewitterwolken weiter beschleunigt und können durch die Ionisation der Luftmoleküle weitere freie Elektronen erzeugen. Eine Elektronenlawine entsteht. Dieser Effekt wird auch *“runaway-breakdown-effect”* genannt. Auf der Spur dieser Elektronenlawine ist eine Entladung bei weitaus geringeren Spannungen möglich. Ein erstes Indiz, welches diese Theorie bestätigt, ist die Emission von Röntgenstrahlen bei Entstehung eines Blitzes. Es wird vermutet, dass diese aus der Bremsstrahlung der Wechselwirkung von beschleunigten Elektronen mit Luftmolekülen entstammen [4]. Für einen direkten Beleg zur Bestätigung der Theorie wird ein Nachweis einer zeitlichen und örtlichen Korrelation zwischen hochenergetischer Strahlung und Blitzen angestrebt.

Dies führt uns zum Thema dieser Arbeit und zu dem Großprojekt, unter dessen Schirmherrschaft diese Arbeit entstanden ist, dem *Pierre-Auger-Observatorium*. Dieses Observatorium ist ein internationales Großexperiment zur Detektion von hochenergetischer, kosmischer Strahlung. Durch den Nachweis der Sekundärteilchen, die durch die hochenergetische,

kosmische Strahlung erzeugt wurden, kann die Energie und Richtung des ursprünglichen Teilchens ermittelt werden. Hierfür werden sowohl *Fluoreszenzteleskope* als auch *Wasser-Cherenkov-Detektoren* auf einer Fläche von 3000 m^2 eingesetzt. Das Observatorium bietet die Möglichkeit einer zeitlich und örtlich präzisen Messung von kosmischer Strahlung. Durch die Erweiterung um ein zeit- und ortsauflösendes Blitzdetektionssystem kann eine Verbindung zwischen kosmischer Strahlung und Blitz bewiesen werden.

Diese Arbeit beruht auf der Untersuchung einer möglichen Detektionsmethode von Blitzen durch Solarzellen. Diese Detektionsmethode bietet sich an, da bei dem jetzigen Aufbau des Experimentes Solarzellen die Stromversorgung der Wasser-Cherenkov-Detektorstationen sicherstellen und daher schon vor Ort sind. Zudem ist durch die Aufstellung der Detektorstationen in einem Dreiecksmuster mit 1500 m Abstand voneinander sichergestellt, dass eine hinreichende Ortsauflösung gegeben ist.

Das Ziel der Arbeit ist zum einen der Aufbau und die Blitzmessung mithilfe einer Solarzelle und zum anderen eine Abschätzung, ob diese Methode der Detektion sich für den Einsatz in Argentinien eignet und ob die zeitliche Präzision ausreichend ist.

Die Struktur der Arbeit ist wie folgt: In Kapitel 2 wird das nötige Wissen erarbeitet, um die Ergebnisse aus den folgenden Versuchen qualitativ zu beurteilen. Insbesondere wird auf den zeitlichen Verlauf eines Blitzes eingegangen sowie die Physik einer Solarzelle erläutert. Die experimentellen Ausführungen werden in Kapitel 3 bis 6 besprochen. Kapitel 3 untersucht die Eigenschaften der Kennlinie einer Solarzelle. In Kapitel 4 wird die Reaktionsgeschwindigkeit einer Solarzelle auf Pulse unter Variation verschiedener Parameter untersucht. Kapitel 5 widmet sich der Messung von Blitzen mit einer Solarzelle, wobei auch auf Störeinflüsse eingegangen wird. In Kapitel 6 werden die durch die Wasser-Cherenkov-Detektorstationen hinzukommenden Elemente eingeführt und deren Einflüsse auf die Messung untersucht. Zudem werden Schaltungen zur Unterdrückung dieser Einflüsse diskutiert. Kapitel 7 gibt abschließend einen Überblick über die gewonnenen Erkenntnisse und einen Ausblick auf die Möglichkeit der Realisierung.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel soll die Basis für ein Verständnis der Abläufe und der physikalischen Vorgänge während einer Blitzentladung gelegt werden. Hierbei wird ein besonderes Augenmerk auf die zeitliche Entwicklung der Lichtstärke gelegt, damit der Einfluss auf das Signal bzw. die Reaktionszeit der Solarzelle abgeschätzt werden kann. Des Weiteren wird Aufbau und Funktionsweise einer Solarzelle sowie der Einfluss verschiedener Betriebsmodi diskutiert.

2.1 Blitze

Im Jahre 1749 machte Benjamin Franklin wohl den entscheidenden Schritt zum physikalischen Verständnis von Blitzen, indem er die Analogie zu einem elektrischen Funkenschlag erkannte [5]. Zur Bestätigung seiner Vermutung sollte die Elektrizität in der Luft nachgewiesen werden. Er schlug daher vor, einen langen, metallischen Stab auf einem erhöhten Punkt, isoliert vom Boden, aufzurichten. Während eines Gewitters sollte die Elektrizität der Luft den Stab polarisieren und bei Annäherung eines Menschen oder durch Verringerung des Abstandes zum Boden einen Funkenschlag auslösen. Jenes Experiment, erstmals 1752 in Marly-la-Ville nahe Paris durchgeführt, war die erste direkte Bestätigung der elektrischen Natur von Blitzen [1].

Das eindrucksvolle Experiment wurde in der folgenden Zeit wiederholt vorgeführt, bis es zu dem Unvermeidlichen kam: 1753 wurde der deutsch-baltische Physiker Georg Richman während der Durchführung von einem Blitz getroffen und starb. Bis zu diesem Zeitpunkt war ein direkter Blitzschlag nicht in Betracht gezogen worden.

Heutige Blitzuntersuchungen laufen unter großen Sicherheitsvorkehrungen ab. Durch Einsatz von *Boys-Kameras* (eine Kamera mit sich schnell bewegendem Fokus) sowie neuerdings von *High-Speed-* und *Streak-Kameras* konnte die zeitliche Entwicklung der Leuchtkraft eines Blitzes auf Basis von Mikrosekunden aufgezeichnet werden. Gleichzeitig konnte auch das Spektrum sowie der fließende Strom ermittelt werden [1] [6].

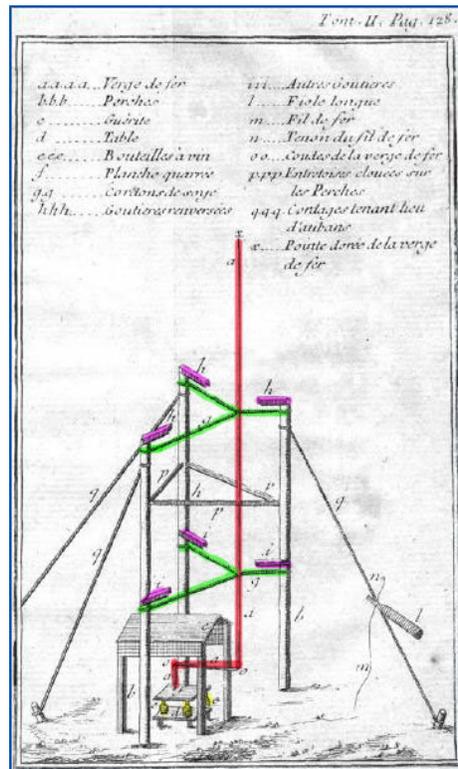


Abbildung 2.1: Aufbau des *Marly-la-Ville Experimentes*. In Rot ist die Metallstange eingezeichnet. Die Isolation am Boden wurde mithilfe von Weinflaschen hergestellt [7].

Eine deutliche Verbesserung der Messumstände bietet die Entwicklung des *rocket-triggered-lightnings*. Hierbei wird während eines Gewitters eine Rakete gezündet, die einen langen Draht hinter sich herzieht. Durch die gute Leitfähigkeit über die große Strecke des Stromleiters wird eine Blitzentladung ausgelöst, die zeitlich und örtlich relativ gut vorhersehbar ist und daher eine genaue Fokussierung der Messgeräte ermöglicht [8]. Im Folgenden wird der zeitliche Verlauf von Blitzen aus Daten von publizierten Messergebnissen erläutert.

2.1.1 Teilblitze

Eine Blitzentladung kann aus mehreren Teilblitzentladungen bestehen. Allgemein fasst man Teilblitze, die am gleichen Ort innerhalb einer Zeit von einer bis anderthalb Sekunden gemessen werden, zu einem Blitzereignis zusammen [9]. Mit bloßem Auge ist dies nur bei weit entfernten Blitzen oder durch das Flackern der Reflexionen an Wolken sichtbar. Bei nahen Blitzen wird dies nicht wahrgenommen, da man für den Moment geblendet wird.

Zu der Anzahl der Teilblitze innerhalb einer Entladung gibt es vielerlei Statistiken, mit recht ähnlichen Ergebnissen. Abb. 2.2 stellt relativ neue Statistiken aus den Jahren 2004 und 2007 dar, die auf beiden Halbkugeln der Erde vergleichbare Ergebnisse zeigen.

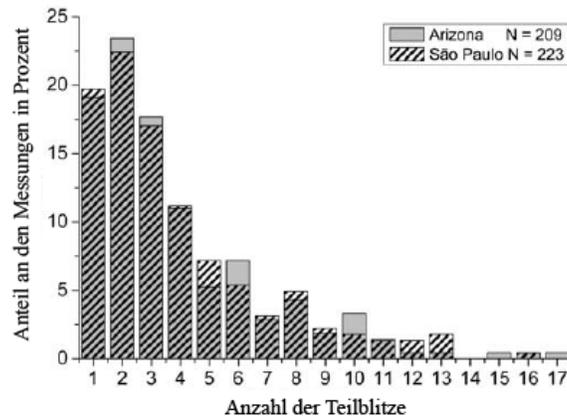


Abbildung 2.2: Verteilung der Anzahl der Teilentladungen während eines Blitzes [10]

Der Mittelwert liegt zwischen drei und vier Teilblitzen, am häufigsten kommt es jedoch zu 2 Teilblitzen. Die zeitlichen Abstände zwischen den Teilentladungen liegen mit starken Schwankungen um einen Mittelwert von 60 ms [1]. Dies ist insofern interessant, als dass nachzuprüfen ist, ob auch die Folgeblitze durch kosmische Strahlung injiziert werden. Die Detektionstotzeit ist in Abhängigkeit davon, ob Teilblitze erwünscht sind oder nicht, zu wählen.

Die Gefahr, dass aufgrund der Triggerschwelle die erste Entladung nicht wahrgenommen wird, scheint aufgrund von Daten aus [1] und Stromverläufen von Blitzen aus [6] als unwahrscheinlich, da die erste Entladung im Durchschnitt die weitaus Stärkste ist. Vor allem bei schnell aufeinanderfolgenden Teilblitzen ist die Amplitudenabnahme stark ausgeprägt.

2.1.2 Arten von Blitzen

Bevor wir nun auf die Substruktur der Teilblitze eingehen, muss ein Blick auf die Polarität und die verschiedenen Arten von Blitzen geworfen werden. Bei der Bildung der Gewitterwolke, der sogenannten *Cumulonimbus*, entstehen zwei geladene Bereiche. Auf die genaue Beschreibung der Entstehung der Ladungstrennung von Gewittern wird in dieser Arbeit verzichtet. Für genauere Informationen ist dies in [11] nachzulesen.

Allgemein gilt, dass ein positiv geladener oberer Teil und ein negativ geladener unterer Teil der Wolke entsteht. Durch Influenz wird der Erdboden zudem positiv geladen. Zu Entladungen kann es nun in vielerlei Form kommen:

- **Wolke-Wolke-Blitze:** Hier kommt es zu einer Entladung zwischen den beiden Schichten der Wolke.
- **Wolke-Luft-Blitze:** Diese Blitze verlaufen sich in der Luft. Infolgedessen kommt es zu keiner Hauptentladung, sodass diese Blitze ein geringeres Helligkeitsmaximum haben.

- **Wolke-zu-Erde-Blitze und Erde-zu-Wolke-Blitze:** Diese Blitze stellen eine Verbindung zwischen Wolke und Boden her. Sie bilden den Großteil aller Blitze und sind bisher am besten erforscht. Zu einer genaueren Klassifizierung werden sie weiter unterteilt in:
 - Negative Wolke-zu-Erde-Blitze
 - Positive Wolke-zu-Erde-Blitze
 - Negative Erde-zu-Wolke-Blitze
 - Positive Erde-zu-Wolke-Blitze

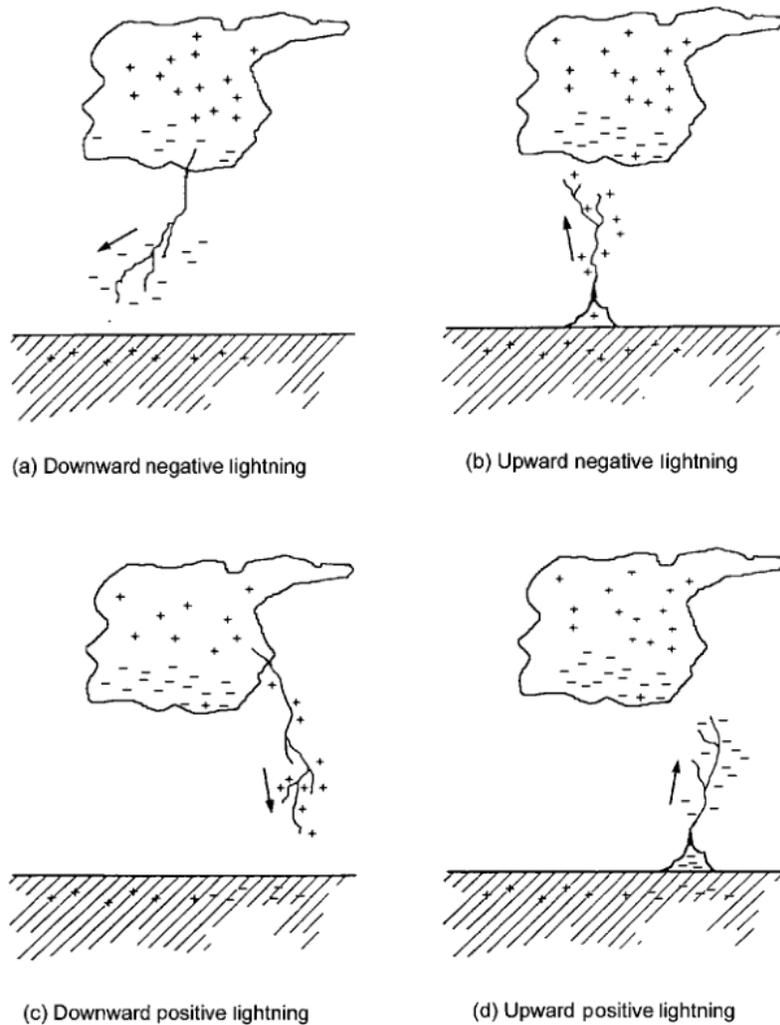


Abbildung 2.3: Schematische Zeichnung der verschiedenen Blitzarten zwischen Wolke und Erde [1]

Auf Basis der für diese Arbeit betrachteten Literatur (siehe Literaturverzeichnis) kann das Verhalten der Wolke-Wolke-Blitze und Wolke-Luft-Blitze auf Messungen an Blitzen zwischen Wolke und Boden zurückgeführt werden. Für beide Arten gilt, dass ihr Lichtsignal aufgrund ihrer größeren Distanz zur Messstation bzw. der geringeren Leuchtkraft weitaus kleiner sein sollte als Blitze zwischen Erde und Wolke. Bei einer Weiterführung dieser Arbeit könnte die Detektion sowie die Möglichkeit einer Differenzierung dieser Arten von Blitzen untersucht werden.

Die Unterteilung der Blitze zwischen Erde und Wolke ist bedingt durch die Richtung der ersten Ausbreitung sowie der Ladung des involvierten Wolkenteils. So wird bei positiven Blitzen der positive und bei negativen Blitzen der negative Teil der Wolke mit dem Boden verbunden. Abb. 2.3 zeigt den Verlauf der Ausbreitung des Blitzes der verschiedenen Erde-Wolke-Blitzarten.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es in gewissen Fällen auch zu bipolaren Blitzen kommen kann, in denen es sowohl zu positiven als auch zu negativen Teilblitzen kommt. Da der zeitliche Verlauf der Helligkeit auf die üblichen Entladungen zurückgeführt werden kann, wird diese Art nicht weiter diskutiert. Erde-zu-Wolke-Blitze treten praktisch nur von erhöhten Gebäuden oder Bergspitzen auf. Aufgrund des flachen Geländes in der argentinischen Pampa ist die Entstehungswahrscheinlichkeit eines solchen Blitzes sehr gering. Zudem ist ihr Leuchtverhalten dem abwärtsgerichteten Pendant ähnlich [1].

Der Fokus kann daher auf die abwärtsgerichteten Wolke-Erde-Blitze gelegt werden. Das Verhältnis des Auftretens von positiven zu negativen Wolke-zu-Erde-Blitzen liegt bei etwa 1:10. Aufgrund des Aufbaus der Wolke erreichen positive Blitze größere Dimensionen als ihre negativen Partner. Zudem ist die Dauer der Entladung sowie die Helligkeit bei positiven Blitzen im Schnitt größer. Dafür ist die Anzahl der Teilblitze weitaus geringer - meist bildet nur ein einziger Überschlag die gesamte Blitzentladung. [6]

Für die weiteren Versuche muss sowohl das Verhalten der negativen als auch der positiven Wolke-zu-Erde-Blitze berücksichtigt werden. Die weiteren Blitzarten treten selten auf, haben eine geringe Leuchtkraft oder leuchten in großer Höhe. Sie werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet. Es ist jedoch anzunehmen, dass ihre zeitliche Entwicklung der der negativen und positiven Wolke-zu-Erde-Blitze gleicht.

2.1.3 Substruktur des Teilblitzes

Die zeitliche Substruktur der Teilblitze ist ausschlaggebend für den Signalverlauf an der Solarzelle und daher von großer Bedeutung für spätere Messungen. In der Literatur werden drei verschiedene Entladungsabläufe innerhalb des Teilblitzes unterschieden:

- **der Leitblitz mit anschließender Hauptentladung**
- **der kontinuierliche Strom**
- **die M-Komponente**

Abb. 2.4 zeigt den schematischen Verlauf eines Teilblitzes. Der Leitblitz bildet den Beginn jedes Teilblitzes. Im Falle des ersten Teilblitzes innerhalb einer Blitzentladung wird erst ein Weg durch die schlecht leitende Luft gesucht. Hierbei kommt es zu einer stufenartigen Ausbreitung, deren einzelne Stufen zu etwa 50 Meter langen Erweiterungen des Blitzgebildes führen. Zwischen den einzelnen Stufen entstehen zeitliche Pausen von 20 bis 50 μs . Hierdurch ergibt sich eine Gesamtzeit des lichtschwachen Leitblitzes bei negativen Wolke-zu-Erde-Blitzen von etwa 35 ms. Für positive Blitze ist aufgrund der größeren Distanz von Wolkenregion und Erdboden eine längere Ausbreitungsdauer zu erwarten. Die eigentliche Hauptentladung dauert bei negativen Blitzen 80 μs , bei positiven Blitzen 200 μs und besitzt eine um ein Vielfaches größere Helligkeit als der Leitblitz.

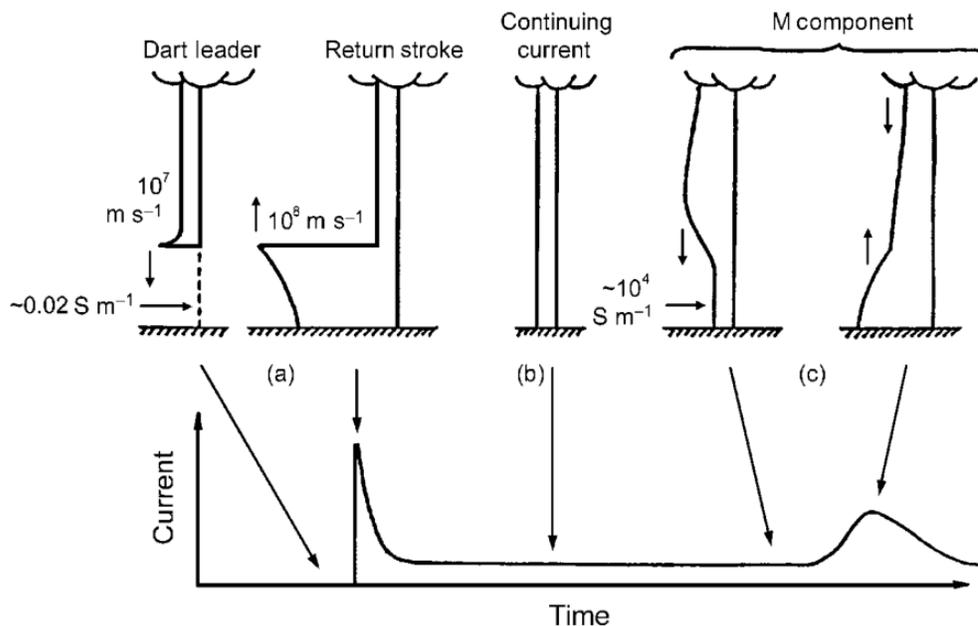


Abbildung 2.4: Schematischer Ablauf eines negativen Wolke-Erde-Teilblitzes mit allen drei Entladungsabläufen. Der obere Teil der Skizze zeigt die Entwicklung der Leitfähigkeit in S/m (S =Siemens) sowie die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Leitfähigkeitsfronten in m/s. Der untere Teil stellt den resultierenden Stromfluss dar. Diese Skizze ist zur Visualisierung der Abläufe und stellt den realen Vorgang nicht maßstabsgetreu dar [1].

Bei Folgeblitzen bzw. nachfolgenden Teilblitzen ist die Bahn bereits vorionisiert. Daher kommt es zu wesentlich schnelleren Ausbreitungszeiten, sodass der Leitblitz innerhalb von 1 - 2 ms anwächst. Auch die Hauptentladung ist durchschnittlich mit 30 bis 50 μs etwas kürzer. Dies ist jedoch vor allem auf die geringere Stärke und geringere Ladungsübertragung des Teilblitzes zurückzuführen.

Der anschließende kontinuierliche Strom kann bis zu 100 ms fließen. Währenddessen können weitere Pulsentladungen als M-Komponente auftreten. Diese benötigen aufgrund des noch

fließenden kontinuierlichen Stromes keinen Leitblitz. Ihre Helligkeit liegt unterhalb der einer Hauptentladung und die Dauer beträgt etwa eine Millisekunde.

In Tab. 2.1 sind die einzelnen Abläufe und ihre Eigenschaften von negativen Blitzen aufgelistet. Für positive Blitze werden etwas größere Zeiten und Stromstärken erwartet. Dies bestätigen Angaben zu der Hauptentladung von positiven Blitzen (s.o.). Zusätzlich wird die Maximalstromstärke angegeben, um eine grobe Abschätzung der Helligkeitsverhältnisse möglich zu machen [6].

Tabelle 2.1: Eigenschaften der Entladungsabläufe von negativen Wolke-Erde-Blitzen

Entladungsart	Dauer	Maximalstrom
1. Leitblitz	≈ 35 ms	≈ 1 kA
Leitblitze von folgenden Teilblitzen	1 – 2 ms	≈ 1 kA
1. Hauptentladung	80 μ s	30 kA
Hauptentladungen von folgenden Teilblitzen	30 – 40 μ s	10 – 15 kA
kontinuierlicher Strom	≤ 100 ms	100 – 200 A
M-Komponente	≈ 1 ms	100 – 200 A + kontinuierlicher Strom

Für die Messung an einer Solaranlage wird erwartet, dass erst die 1. Hauptentladung die Messschwelle übersteigt. Damit entsteht ein zeitlicher Fehler in einer Größenordnung von 35 ms. Diese Verzögerung muss in den weiteren Untersuchungen mit einbezogen werden und kann wegen der starken Abhängigkeit von der Polarisierung, der Wolkenlage sowie weiteren Einflüssen nicht als konstant betrachtet werden.

2.2 Die Solarzelle

Eine Solarzelle ist ein elektrisches Halbleiterbauelement, welches elektromagnetische Strahlungsenergie in elektrische Energie umwandelt. Der Aufbau gleicht dem einer *Photodiode*, bestehend aus einem *pn-* oder einem *pin-Übergang*. Hierbei steht p für ein positiv dotiertes Gebiet, in dem durch Injizierung von bestimmten *Akzeptor-Atomen* ein Überschuss an freien positiven Ladungsträgern (Elektronenlöcher) erzeugt wird. Dementsprechend steht das n für ein negativ dotiertes Gebiet, in dem *Donator-Atome* für zusätzliche freie Elektronen sorgen. Durch das Zusammenführen der beiden Gebiete kommt es zu Diffusionsströmen, Ladungsaustausch und Aufbau einer sogenannten *Raumladungszone* in der ein elektrisches Feld herrscht.

Bei einem *pin-Übergang* wird die Breite der Raumladungszone durch die Einführung eines undotierten „intrinsischen“ Gebietes zwischen p- und n-Schicht vergrößert. Abb. 2.5 zeigt den schematischen Aufbau einer *pin-Solarzelle*. Für einen genaueren Einblick ist das Lehrbuch von H. Göbel zu empfehlen [12].

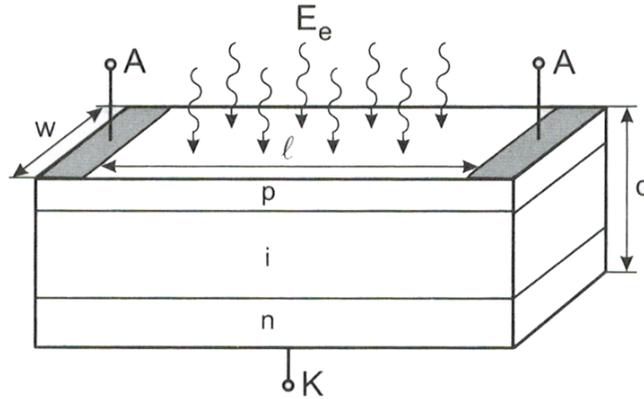


Abbildung 2.5: Aufbau einer pin-Solarzelle [12]

2.2.1 Funktionsweise und Betriebsarten

Wird eine Solarzelle nicht beleuchtet, so gleicht ihr Verhalten dem einer Diode. Die Diodenstromstärke I_D lässt sich in diesem Fall über die Diodengleichung bestimmen:

$$I_D(U_{pn}) = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{e}{k_B T} \cdot U_{pn}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Hierbei ist I_S eine materialabhängige Konstante, e die Elementarladung, k_B die Boltzmann-Konstante und T die Temperatur des Bauteils. U_{pn} ist die angelegte Spannung über der Diode. Wird die Solarzelle zusätzlich beleuchtet, so addiert sich ein spannungsunabhängiger Photostrom I_{ph} hinzu:

$$I_{Solarzelle}(U_{pn}) = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{e}{k_B T} \cdot U_{pn}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (2.2)$$

Durch die Absorption der Photonen werden Elektronen angeregt und gelangen ins Leitungsband des Halbleiters. Überschüssige Energie wird durch Stöße mit dem Halbleitergitter in Phononen umgewandelt. Dieser Effekt, bei dem sowohl ein freies Elektron als auch ein Elektronenloch entstehen, wird *innerer Photoeffekt* genannt. Innerhalb der Raumladungszone, in der ein elektrisches Feld herrscht, werden die freien Ladungsträger beschleunigt und es kommt zu einem Stromfluss.

Das Gegenstück zum inneren Photoeffekt ist die *Rekombination* von freien Elektronen und Löchern. Dieser Effekt, welcher bei hohen Lichtintensitäten verstärkt auftritt, wirkt dem Stromfluss entgegen. Um dies zu unterbinden wird die Aufenthaltsdauer der freien Ladungsträger durch möglichst dünne p- und n-Schichten reduziert. Aufgrund der kurzen Dauer und der relativ geringen Lichtintensität von Blitzen wird dieser Effekt im Folgendem vernachlässigt.

Damit ergibt sich der Photostrom aus Absorptionsrate mal Elementarladung. Bei konstantem Spektrum und in dem für uns relevanten Intensitätsbereich ist der Lichtstrom Φ_{ph} proportional zur Absorptionsrate und daher proportional zum Photostrom: $\Rightarrow I_{\text{ph}} \sim \Phi_{\text{ph}}$.

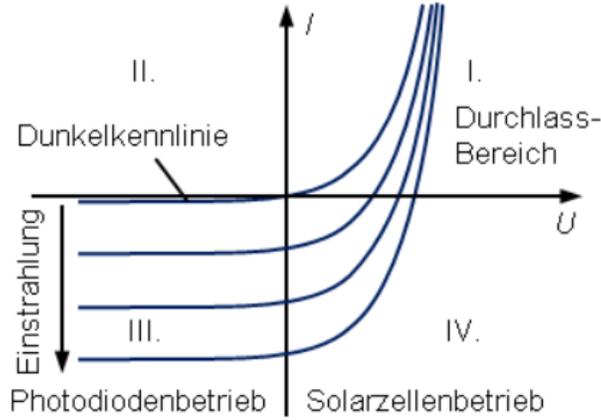


Abbildung 2.6: Kennlinie einer Solarzelle für verschiedene Belichtungsstärken [13]

Abb. 2.6 zeigt den Verlauf der *Strom-Spannungs-Kennlinie* für verschiedene Belichtungsstärken. Photodioden werden mit Spannung in Sperrrichtung betrieben oder über einen sehr kleinen Widerstand ausgelesen. Dadurch ist die Stromstärke über einen großen Bereich proportional zu der einfallenden Lichtstärke. Solarzellen dagegen sollen elektrische Energie produzieren. Es wird daher eine Last angeschlossen. Im einfachsten Fall eines ohmschen Widerstandes R ergibt sich damit für die Spannung in Abhängigkeit des Photostromes I_{ph} :

$$U_{pn}(I_{ph}) = R \cdot \left\{ I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{e}{k_B T} \cdot U_{pn}(I_{ph})\right) - 1 \right] - I_{ph} \right\} \quad (2.3)$$

Diese Gleichung besitzt keine triviale Lösung. Im Spezialfall $R \rightarrow \infty$ geht die Gesamtstromstärke gegen 0.

$$0 = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{e}{k_B T} \cdot U_{pn}\right) - 1 \right] - I_{ph} \quad (2.4)$$

und nach Umrechnung ergibt sich

$$U_{pn} = \frac{k_B T}{e} \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right] \quad (2.5)$$

Dies ist die *Maximalspannung*, die bei steigendem Photostrom logarithmisch zunimmt. Sie entspricht dem x-Achsenabschnitt in Abb. 2.6. Bei den meisten Solarzellen liegt der *Arbeitspunkt* nahe der Maximalspannung. Dementsprechend ist die Spannungs-Photonenstromabhängigkeit logarithmusähnlich. Für die Detektion von Blitzen bedeutet dies, dass bei Umgebungslicht deutlich geringere Amplituden zu erwarten sind. Aufgrund der Dunkelheit während eines Gewitters sollte dies jedoch keine größeren Auswirkungen haben.

2.2.2 Absorptions- und Reflexionsspektrum

Die Anzahl der Umwandlung von einfallenden Photonen in freie Ladungsträger ist sowohl vom Reflexionsgrad des Bauteils als auch von dessen Absorption bzw. Empfindlichkeit abhängig. Leider blieben Anfragen nach den Reflexionsspektren der für die Versuche verwendeten Zellen von Seiten der Hersteller unbeantwortet. Aus diesem Grund kann hier nur auf Messungen an ähnlichen Zellen zurückgegriffen werden. Für das spektrale Absorptionsverhalten konnten Werte aus der Literatur herangezogen werden.

Ein Versuch der eigenen Messung der spektralen Empfindlichkeit scheiterte an Störungen des Signalverlaufs. Dies wurde auf die schlechte Leitfähigkeit an der Oberfläche der Zellen bei den verwendeten, kleinen Lichtintensitäten zurückgeführt. Da Solarzellen darauf ausgelegt sind, bei hellem Tageslicht Energie zu produzieren, wird auf Funktionstüchtigkeit bei geringen Lichtstärken kein Wert gelegt. Erst bei einer gewissen Lichteinstrahlung wird die Oberfläche der Zelle leitend und ein störungsfreies Signal ist möglich. Für eine Messung bei höheren Intensitäten war jedoch die vorhandene Apparatur nicht konzipiert.

Abb. 2.7 zeigt die der Literatur entnommenen Daten zur spektralen Empfindlichkeit und Reflexion von Silizium. Zusätzlich ist der Einfluss zweier Antireflexbeschichtungen eingezeichnet. Es sei darauf hingewiesen, dass die Empfindlichkeit immer in Relation zur Dicke des Materials gesehen werden muss. Nach dem Beer'schen Absorptionsgesetz nimmt die Intensität von Strahlung in Materie exponentiell ab. Eine größere Absorptionsstrecke führt daher auch zu mehr Absorption.

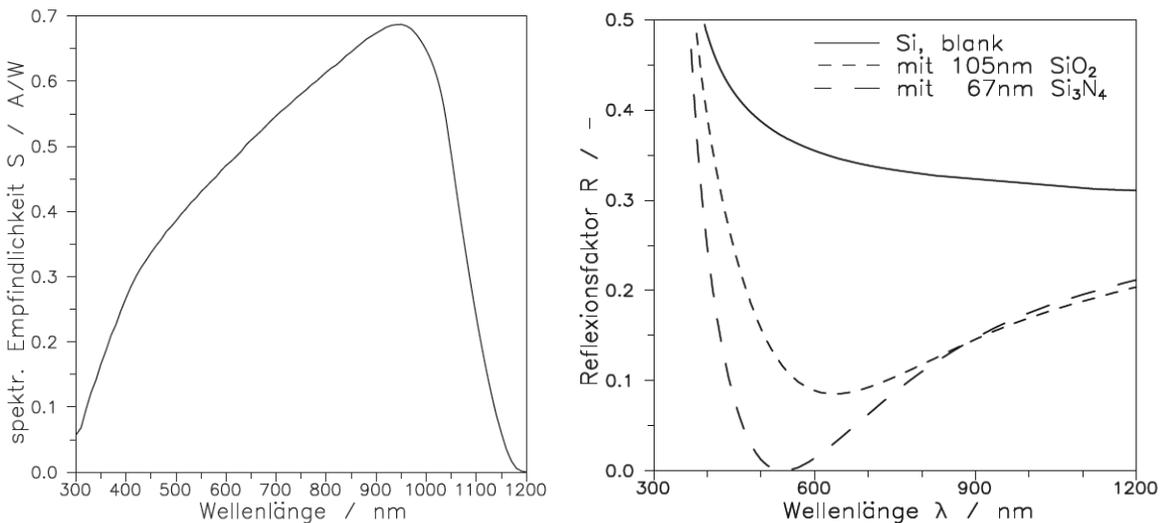


Abbildung 2.7: Spektrale Empfindlichkeit einer Siliziumzelle sowie Reflexionsspektrum bei verschiedenen Beschichtungen [14]

In einem Bereich von etwa 400 nm bis 1100 nm hat die Siliziumzellen eine große Empfindlichkeit. Bei guter Antireflexbeschichtung wird ein Bereich von 500 nm bis 1000 nm optimal ausgenutzt. Ein Vergleich mit Blitzspektren (siehe Abb. 2.8), deren Maxima bei

der 656 nm H_α -Linie liegen, ergibt eine gute Übereinstimmung. Ein schlechtes Signal eines Blitzes aufgrund von schlechtem Absorptionsverhalten der Zelle kann daher ausgeschlossen werden.

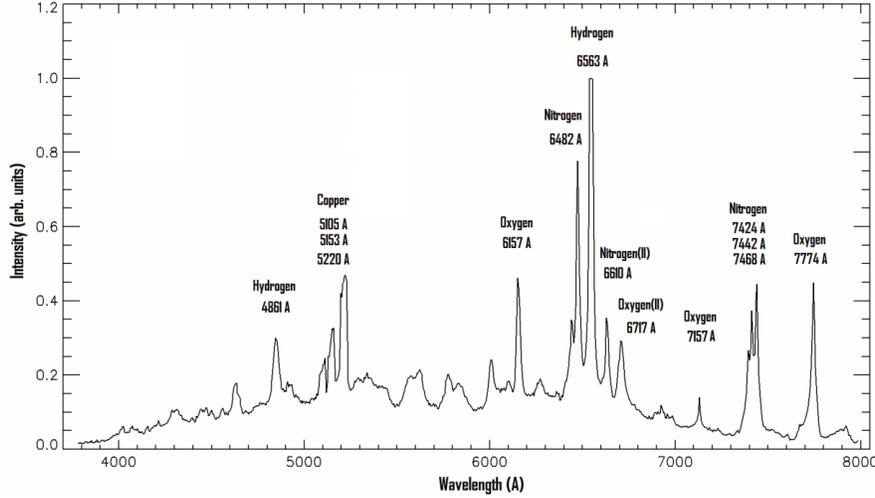


Abbildung 2.8: Sichtbares Spektrum eines Blitzes [15]

2.2.3 Reaktionsgeschwindigkeit und Kapazität

Eine wichtige Größe zur Bestimmung der zeitlichen Auflösung des Blitzereignisses ist die Reaktionszeit der Solarzelle bzw. die Anstiegszeit der Spannung. So wie bei der Diode kommt es auch bei der Solarzelle bei Veränderungen der Spannung sowohl zu einer Vergrößerung/Verkleinerung der Raumladungszone als auch zu einer Vergrößerung/Verkleinerung der Ladung an den Rändern der Raumladungszone. Dieses Verhalten kann in erster Näherung durch eine Kapazität beschrieben werden. Wie bei einer Kapazität kommt es zu einer Aufladung bzw. Entladung, die zu einer Verzögerung des Signals führt.

Die Gesamtkapazität der Zelle setzt sich aus *Sperrschichtkapazität* C_j (Veränderung der Größe der Raumladungszone) und *Diffusionskapazität* C_d (Ladungen am Rande der Raumladungszone) zusammen. Da die Kapazität nicht an jedem Arbeitspunkt gleich groß ist, führt man die differentielle Kapazität gemäß

$$C = \frac{\partial Q_j}{\partial U_{pn}} \quad (2.6)$$

ein. Die Kapazitäten lassen sich zu

$$C_j = \frac{A\epsilon_0\epsilon_r}{\sqrt{\frac{2\epsilon_0\epsilon_r}{q} \left[\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right]}} \cdot (\Phi_i - U_{pn})^{-M}; M \approx -1/2 \quad (2.7)$$

und

$$C_d = \tau_T \frac{q}{k_B T} I_S \cdot \exp\left(\frac{q}{k_B T} \cdot U_{pn}\right) \quad (2.8)$$

bestimmen. Es wird hier auf eine genauere Betrachtung der Formeln verzichtet. Entscheidend für das Experiment ist die starke Zunahme der Gesamtkapazität in Durchlassrichtung, welche zu einer Vergrößerung der Reaktionszeit führt.

In Sperrichtung betriebene Photodioden können zur Auswertung von elektromagnetischen Lichtsignalen im Nanosekundenbereich verwendet werden. Durch die Zunahme der Kapazität mit der anliegenden Spannung können diese kurzen Reaktionszeiten jedoch bei Solarzellen im Betrieb nicht erwartet werden. Aus diesem Grund musste eine direkte Messung der Reaktionszeiten von Solarzellen erfolgen, welche in Abschn. 4 und 5 dargestellt ist.

Formeln und Hintergrundwissen dieses Abschnittes wurden aus dem Buch „Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik“ von H. Göbel entnommen [12].

3 Messung der Kennlinie einer Solarzelle

Dieses Kapitel beschreibt die Anfänge der Bachelorarbeit sowie die ersten Messungen zur Bestimmung der Abhängigkeit von Strom und Spannung bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken an einer Solarzelle. Ergänzend wird der Einfluss der Farbe des Lichtes auf die Kennlinie untersucht.

Zu Beginn der Bachelorarbeit wurde geplant, ein Solarzellensystem ähnlich dem der Detektorstationen in Argentinien an der Bergischen Universität aufzubauen, um unter gleichen Rahmenbedingungen die Möglichkeit der Blitzdetektion zu untersuchen. Hierfür wurde neben einer großen 150-Watt-Solarzelle auch eine Batterie und ein dazwischengeschalteter „Charge-Controller“ benötigt, welcher den Lade- bzw. Entladevorgang der Batterie regelt. Die für den Wuppertaler Versuchsaufbau erworbenen Produkte weichen leicht von denen in Argentinien ab. So war das Solarpanel nur noch in einer modifizierten Version zu kaufen. Anstatt des in Argentinien eingesetzten Charge-Controllers wurde für den Wuppertaler Versuchsaufbau das Produkt eines anderen Herstellers gewählt. Ebenso verhält es sich mit der Blei-Batterie, da die in Argentinien verwendete in Größe, Masse und Kosten unsere Möglichkeiten überstieg. Auf die resultierenden Unterschiede wird noch an gegebener Stelle eingegangen.

Die Messung der Solarzellenkennlinie bei unterschiedlichen Belichtungsstärken ermöglicht die Abschätzung der Spannungsamplitude von Blitzen in Abhängigkeit von Last und Umgebungslicht. Für den Versuch stand zu Anfang noch nicht das Solarpanel zu Verfügung. Es wurde daher auf eine 5 cm × 2 cm große Siliziumzelle aus einem Kosmos-Solarbaukasten ausgewichen. Diese Zelle ließ sich aufgrund ihrer Größe weitaus einfacher als das im Original verwendete Bauteil in die bestehenden Messapparaturen einbinden. Basierend auf den Herleitungen in Kapitel 2.2.1 ist ein Unterschied der Kennlinien beider Solarzellen nur aufgrund von unterschiedlich starken Dotierungen der p- und n-Schichten zu erwarten. Aus diesem Grund sind die folgenden Messungen und Ergebnisse in erster Näherung auch für die große Solarzelle gültig.

3.1 Messaufbau und Durchführung

Der Versuch wurde in einem verschließbaren Dunkelkasten (siehe Abb. 3.1) durchgeführt, welcher ursprünglich als Teststand für Photomultiplier gebaut wurde. Dieser besteht aus einer 2 Meter langen lichtundurchlässigen Holzkiste, deren Innenwände zur Verhinderung von Reflexionen schwarz gestrichen sind. Über Anschlüsse an den Innenseiten ist eine direkte Steuerung von außen möglich. Daneben können bei Bedarf weitere Leitungen über kleine Lücken an den Ecken des Kastens herausgeführt werden, ohne die Lichtabschirmung zu beeinträchtigen.

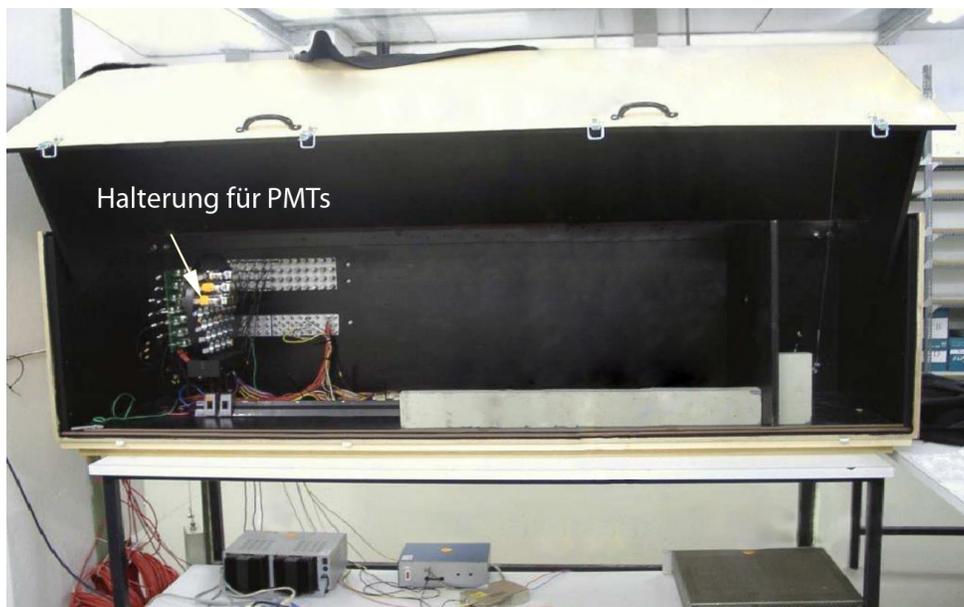


Abbildung 3.1: Der Dunkelkasten

Zur Bestimmung der Kennlinien wurde ein Potentiometer an die Solarzelle angeschlossen und diese bei verschiedenen Helligkeitsstufen beleuchtet. Nun konnte durch die Veränderung des Lastwiderstandes die Spannung und Stromstärke an der Solarzelle verändert werden. Der verwendete Schaltplan ist in Abb. 3.2 zu sehen.

Zur Beleuchtung der Solarzelle wurden LEDs eingesetzt, welche von einer einstellbaren Gleichspannungsquelle gespeist wurden. Im Falle der blauen LED war eine System mit Vorwiderstand auf einer Platine vorhanden (siehe Abb. 3.3); die übrigen LEDs wurden ohne Vorwiderstand direkt an die Stromquelle angeschlossen. Aufgrund dieses Fehlens der Vorwiderstände war die Einstellung der Gleichspannungsquelle empfindlich und es kam zu langen Einschwingzeiten der Stromstärke. Nach Veränderung der Helligkeit der LEDs musste daher einige Minuten gewartet werden, bevor eine Messung beginnen konnte. Die direkte Verwendung von Vorwiderstand-LED-Schaltungen hätte dieses Problem verhindert. Die LED und die Solarzelle wurden in einem Abstand von $10.0 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ voneinander auf einer optischen Bank befestigt (siehe Abb. 3.3), die Anschlüsse aus dem Dunkelkasten

herausgeführt und die übrige Schaltung dem Schaltbild entsprechend realisiert. Als Widerstände wurden Potentiometer des EloTrain Baukastensystems verwendet, als Amperemeter das Metex M-3800 und als Voltmeter das Voltcraft VC840.

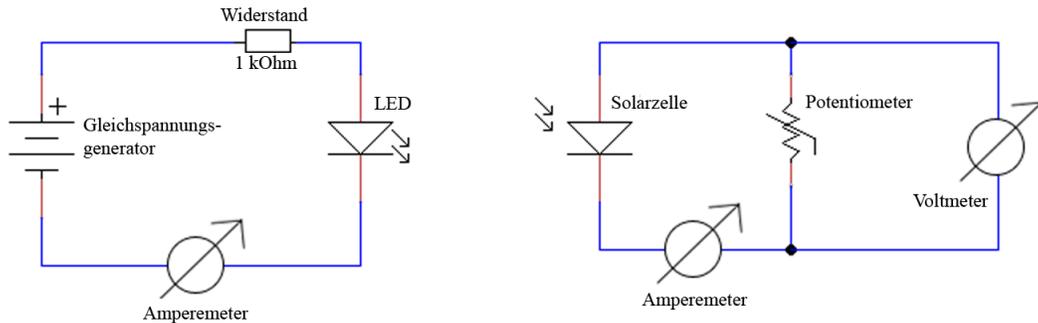


Abbildung 3.2: Schaltbild des Messaufbaus zu Bestimmung der Kennlinie. Der Vorwiderstand wurde nur bei der blauen LED verwendet.

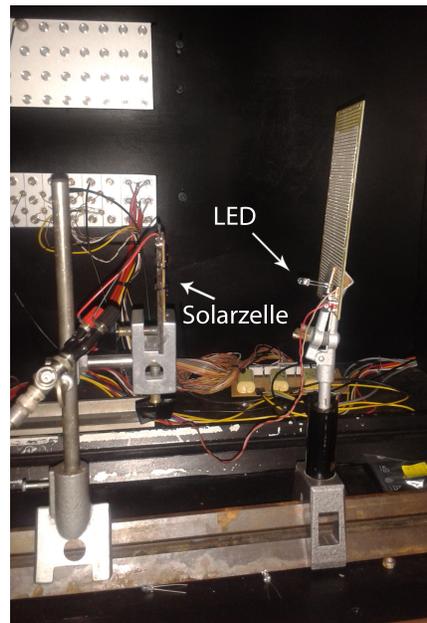


Abbildung 3.3: Messaufbau innerhalb des Dunkelkastens

Die LED und die Solarzelle wurden in einem Abstand von $10.0 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ voneinander auf einer optischen Bank befestigt (siehe Abb. 3.3), die Anschlüsse aus dem Dunkelkasten herausgeführt und die übrige Schaltung dem Schaltbild entsprechend realisiert. Als Widerstände wurden Potentiometer des EloTrain Baukastensystems verwendet, als Amperemeter das Metex M-3800 und als Voltmeter das Voltcraft VC840.

Durch Veränderung des Lastwiderstandes wurde die Strom-Spannungslinie in 15 mV bzw. 25 mV Schritten aufgenommen. Damit ein großer Bereich bequem einstellbar war, wurden verschiedene Potentiometer für die einzelnen Widerstandsbereiche genutzt. Dadurch war ein Bereich von $30\ \Omega$ bis $5\ \text{M}\Omega$ stufenlos einstellbar ($30\ \Omega$ entsprechen dem Innenwiderstand des Amperemeters).

Während der Messung wurde versucht, die Schwankungen der Stromstärke an der LED möglichst gering zu halten. Ein geringer Drift war jedoch nicht verhinderbar und wurde in der Fehlerkalkulation berücksichtigt.

Im ersten Anlauf wurde die Kennlinie von 4 unterschiedlichen LEDs mit unterschiedlichen Farbspektren und jeweils 5 verschiedenen LED-Stromstärken aufgenommen. Ziel war unter anderem der direkte Vergleich bei verschiedenen Beleuchtungsfarben. Dieser Vergleich war jedoch nicht möglich, da die Lichtintensität bei gleicher Stromstärke von der verwendeten LED abhing. Dies ist zum einen auf die spektrale Empfindlichkeit und Reflexion der Solarzelle zurückzuführen, zum anderen auf die unterschiedliche Strahlcharakteristik der LEDs.

Im zweiten Anlauf wurde daher nicht die Stromstärke I_{LED} als Referenz gewählt, sondern die Stromstärke der Solarzelle I_{Solar} bei konstantem Widerstand., wodurch ein Vergleich des Kennlinienverlaufs möglich ist.

3.2 Ergebnisse und Beobachtungen

Abb. 3.4 zeigt die Kennlinien der grünen LED bei unterschiedlichen Strahlungsstärken. Das Stromsignal bei niedrigen Spannungen (bzw. bei niedrigem Widerstand) ist bis zu einem gewissen Grade proportional zum LED-Strom. Dies steht im Einklang zu den Herleitungen in Abschn. 2.2.1. Nach diesen nähert sich mit abnehmendem Widerstand bzw. abnehmender Spannung U_{pn} die Abhängigkeit der Stromstärke zu dem einfallenden Photostrom der Proportionalität an. Oberhalb von 75 mV zeigt die Messung jedoch einen Einbruch dieser Linearität. Gründe für dieses Verhalten sind auf die Grenzen der LEDs zurückzuführen. Diese sind für Dauerströme von 20 mA konzipiert. Bei zu hohen Stromstärken ist eine zeitliche Abnahme der Helligkeit sowie eine Veränderung der Farbe festzustellen. Dieses langsame Verdunkeln ist wohl auch der Grund für das Konvergieren der Kennlinien von 100 mA und 75 mA bei hohen Spannungen.

Der Verlauf der Kennlinien entspricht den theoretischen Erwartungen. Es wird deutlich, dass bei höherer Bestrahlungsintensität die Ausprägung des „Buckels“ stärker wird. Dies ist ein Zeichen für die Ausbildung einer Sättigungsspannung, die im Hinblick auf die Blitzdetektion zu einer starken Abnahme der Amplitude bei Hintergrundbeleuchtung z.B. durch diffuses Licht oder durch Sonnenstrahlen führt. Eine deutliche Visualisierung dieses Effektes wird durch die Betrachtung der U-R-Verläufe bei unterschiedlichen Belichtungsstärken erreicht (siehe Abb. 3.5). Die Werte des Lastwiderstandes wurden hierfür über die ohmsche Regel $U_{\text{Solar}} = R \cdot I_{\text{Solar}}$ berechnet.

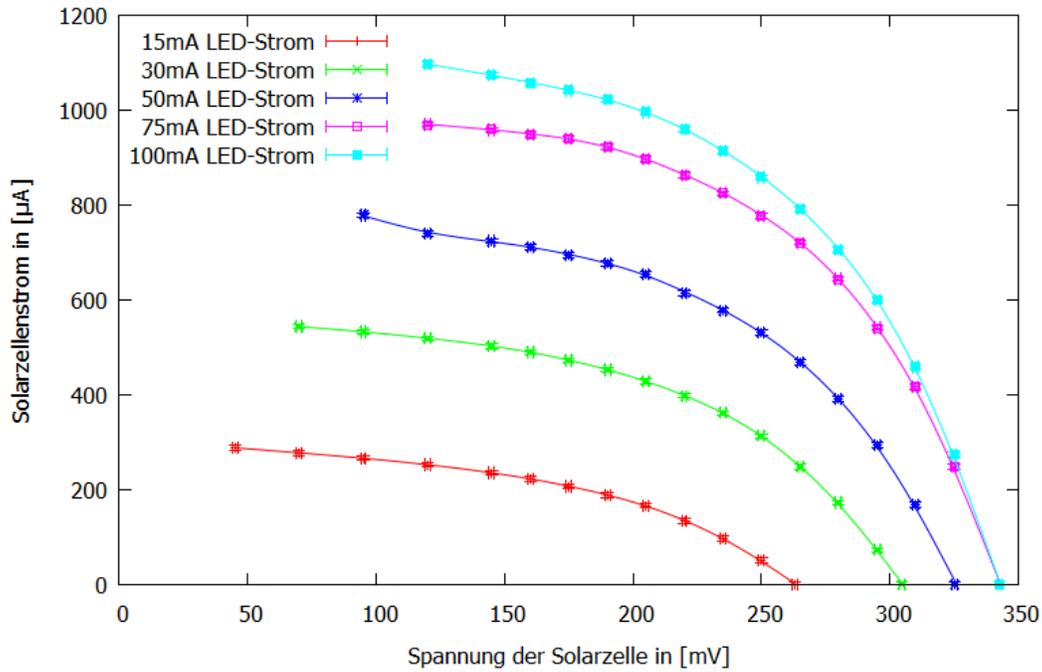


Abbildung 3.4: Ergebnis der Strom-Spannungs-Kennlinie bei Beleuchtung durch eine grüne LED

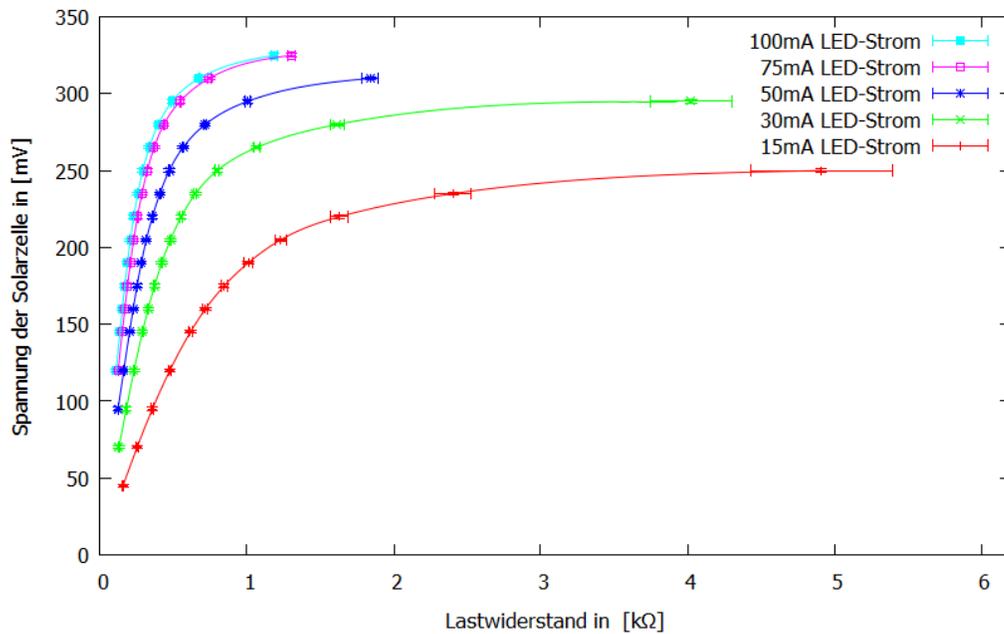


Abbildung 3.5: Spannungssättigung in Abhängigkeit des Lastwiderstands bei unterschiedlichen Bestrahlungsstärken

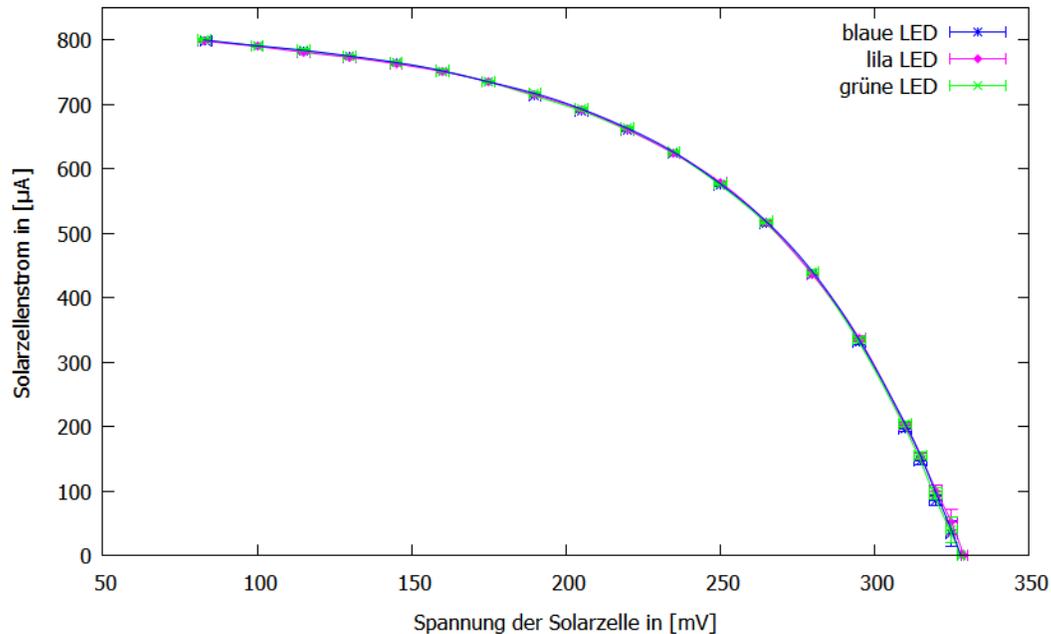


Abbildung 3.6: Vergleich der Kennlinien bei unterschiedlichen Beleuchtungsspektren

In erster Näherung ist davon auszugehen, dass die Last des Solarpanels zeitlich konstant ist. Dementsprechend muss die Spannungsamplitude der unterschiedlichen Belichtungsstärken bei einem konstanten Widerstandswert untersucht werden. Die Abb. 3.5 zeigt, dass die Abstände der Spannungsamplituden mit zunehmender Intensität stark abnehmen. Dieser Effekt ist bei hohen Widerständen stark ausgeprägt, tritt aber auch bei kleinen Lastwiderständen auf.

Der Vergleich der Kennlinien verschiedener Belichtungsfarben ist in Abb. 3.6 dargestellt. Deutlich ist zu sehen, dass die unterschiedlichen Spektren keinen Einfluss auf den Verlauf der Kennlinie haben. Dies deckt sich mit dem Verständnis, dass die überschüssige Energie durch die Absorption der Photonen an Gitterschwingungen abgegeben wird [12].

Für die weiteren Betrachtungen können wir daher einfarbiges Licht als Referenz für das gesamte Frequenzspektrum verwenden. Im Anhang ist ein weiterer Graph (Abb. A.1) basierend auf den gemessenen Daten dargestellt. Dort ist die Leistung $P = U_{\text{Solar}} \cdot I_{\text{Solar}}$ gegen die Last R aufgetragen. Der hier zu beobachtende Effekt ist für die Blitzdetektion nicht relevant, doch zeigt er eine große Problematik von Solarzellen: Der Widerstand für eine optimale Leistungsausbeute ist abhängig von der Beleuchtungsstärke.

Die Messungen bestätigten die theoretischen Erwartungen bezüglich der Kennlinie und der Frequenzunabhängigkeit. Zudem wurde eine starke Spannungssättigung festgestellt, welche unabhängig vom Lastwiderstand auftrat. Für eine genaue Abschätzung des Einflusses der Spannungssättigung auf die Blitzdetektion fehlen Daten über den Lichtstrom von Blitzen und über das Umgebungslicht während eines Gewitters. Es bleibt als Erkenntnis, dass die Reichweite der Blitzdetektion durch Umgebungslicht stark eingeschränkt wird.

4 Reaktion einer Solarzelle auf Lichtpulse

In diesem Kapitel wird das Signal einer Solarzelle auf scharfe Lichtpulse untersucht. Der Einfluss von Lastwiderstand, Bestrahlungsstärke sowie einer Hintergrundstrahlung soll bestimmt werden, um Rückschlüsse auf die Reaktionszeit, die zeitliche Ungenauigkeit der Detektion sowie die minimal detektierbare Pulslänge zu erhalten.

4.1 Messaufbau

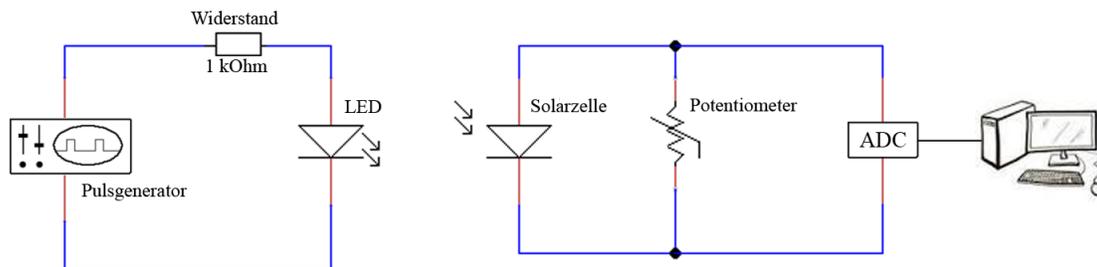


Abbildung 4.1: Schaltbild des Aufbaus für die Messung von Lichtpulsen

Zur Abschirmung gegen Umgebungslicht wurde erneut der Dunkelkasten (siehe Abschn. 3) verwendet. Darüber hinaus konnten viele weitere Komponenten des Photomultipliertests übernommen werden. Diese beinhalten ein System, welches die Möglichkeit bietet, einen LED-Lichtpuls auszulösen und zeitlich auf dieses Ereignis abgestimmt das Signal an einem ADC auszulesen. Für die Untersuchung der Reaktion auf Lichtpulse eignet sich dies optimal.

Das System wird über einen angeschlossenen PC gesteuert, an dem ein für diese Aufgabe entwickeltes Programm bereitgestellt wurde. Das Programm sendet Triggersignale an den HP 214B Pulsgenerator und startet über den SIS3300 ADC das Auslesen der Daten. Ersterer ist ein schneller Hochleistungs-Pulsgenerator, der über eine große Bandbreite von

Pulshöhen und Pulsbreiten variierbar ist. Die Anstiegszeit seiner Pulse ist mit 15 ns sehr klein und wirkt sich daher nicht negativ auf die Messung aus [16]. Der Pulsgenerator ist mit der bereits erwähnten blauen LED über den 1 k Ω großen Vorwiderstand verbunden. Empfängt der Pulsgenerator ein Triggersignal, so wird am Spannungsausgang ein Puls emittiert, welcher ein Lichtsignal an der LED auslöst. Übliche LEDs haben Anstiegszeiten im Nanosekundenbereich [17], folglich liegt auch die Anstiegszeit des Gesamtsystems von Pulserzeuger und LED in dieser Größenordnung.

Wie schon im vorherigen Versuch ist die Solarzelle in einem Abstand von 10 cm zur LED durch eine optische Bank (siehe Abb. 3.3) fixiert. Die Zelle ist direkt mit dem ADC verbunden. Ein parallelgeschaltetes Potentiometer sorgt für die Möglichkeit einer Veränderung des Lastwiderstandes. Der ADC arbeitet mit einer 100 MHz Taktung und 12 Bit Auflösung und kann daher auch schnelle Schwankungen des Signals aufzeichnen. Durch das Triggersignal wird die Übermittlung der Daten an den PC ausgelöst. Der Zeitraum der Datenaufnahme ist jedoch begrenzt. Durch geschickte Einstellung der Verzögerungszeit von Puls und Datenakquisition wird erreicht, dass das Signal des Pulses in dem Auslesefenster erscheint. Die Position ist hierbei immer konstant, weshalb eine Rauschreduzierung durch die Mittelungen über viele Messungen erreicht werden kann. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der eigentliche Aufbau des Systems um einiges komplexer und vielfältiger ist. Da für diesen Versuch jedoch nur diese Grundlagen von Bedeutung sind, wurde auf eine genauere Beschreibung verzichtet. Ein Schaltbild dieses vereinfachten Messaufbaus ist in Abb. 4.1 dargestellt.

Zu Beginn musste der Aufbau neu eingerichtet werden, da dieser schon länger nicht genutzt worden war. Zudem mussten gewisse Modifikationen an dem Ausleseprogramm gemacht werden. So stellte es sich z.B. als relativ schwierig heraus, die Auslesezeit am ADC zu vergrößern. Die digitale Auswertung der Daten erfolgte mittels ROOT.

Bei der Durchführung der Messungen wurde die jeweilige Pulshöhe und Pulsbreite des Signals am HP 412B Pulsgenerator eingestellt und der Widerstand des Potentiometers bestimmt. Anschließend wurde per Knopfdruck eine Messung von 100 Pulsen gestartet. Hierbei kam es zum Teil zu Fehlern während der Aufzeichnung, sodass die gesamte Messung nicht brauchbar war und wiederholt werden musste. Über ein ROOT-Programm, welches auf Basis einer schon genutzten Vorlage entwickelt wurde, konnten die Daten über mehrere Messungen gemittelt werden. Es stellte sich schnell heraus, dass aufgrund der Programmstruktur der Datenakquisition und dem Zeitaufwand eine Anzahl von 100 Mittelungen am probatesten war. An die gemittelten Daten legte das Programm einen Fit an die Anstiegs- und Abfallkurve des Pulses zur Bestimmung der Zeitkonstante und der Sättigungsspannung. Sowohl gemittelte Daten als auch der Verlauf des Fits wurden anschließend graphisch ausgegeben.

Die Ergebnisse der Messungen sind im Folgenden beschrieben:

4.2 Signale im μs -Bereich

In der ersten Messung wurde untersucht, bis zu welchen Pulslängen Signale noch sichtbar bzw. detektierbar sind. Bei Mittelung über 100 Pulse konnte ein Pulsverhalten bis hinab zu 100 ns beobachtet werden. Darunter wurde die Stärke des LED-Signals über die Zeit zu gering, sodass das Signal nicht mehr von dem (durch Mittelungen reduzierten) Rauschen unterscheidbar war. Die Messungen wurden bei einem Lastwiderstand von $6.3\text{ k}\Omega$ durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Detektion von sehr kurzen Pulsen prinzipiell kein Problem darstellt, jedoch aufgrund des langsamen Spannungsanstiegs der Solarzelle die Signalgröße bei gleicher Lichtpulsstärke bei kürzeren Pulsdauern abnimmt. Die Detektion von μs Abläufen ist von daher kein generelles Problem, das Lichtsignal muss nur groß genug sein.

Abb. 4.2 zeigt das Signal eines solchen kurzen Pulses. Wie man sieht ist zwar der Lichtimpuls zu sehen, jedoch bildet sich kein Plateau einer Sättigungsspannung aufgrund der im Verhältnis langen Anstiegszeit der Solarzelle. Das es hierbei zu kapazitiven Effekten kommt, sieht man an der exponentiellen Abnahme des Signals, die sich durch die Entladung der Raumladungszone über Widerstand und ADC bildet.

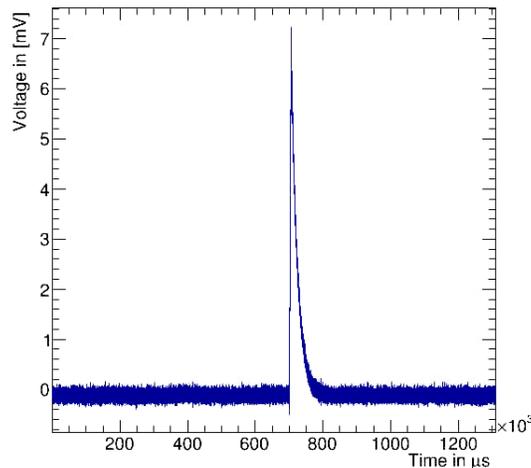


Abbildung 4.2: Signal eines $5\ \mu\text{s}$ langen LED-Pulses

4.3 Abhängigkeit vom Lastwiderstand

Zur Messung des Einflusses des Lastwiderstandes wurde das in ROOT entwickelte Programm genutzt. Dabei wurde sowohl von einem exponentiellen Anstieg als auch von einem exponentiellen Abfall ausgegangen. Damit das Signal genügend Zeit hat, um in die Sättigung zu gehen, wurden Pulse von $500\ \mu\text{s}$ Länge verwendet. Auch hier wurde die Methode der Mittelung über 100 Messungen eingesetzt, um Rauschen zu reduzieren. Ein typisches Beispiel eines Signales mit Fit ist in Abb. 4.3 zu sehen. Die zusätzlichen Plots von vergrößerten Abschnitten wurden durch das Programm generiert. Sie lassen eine Überprüfung

der Übereinstimmung des Fittes mit den Daten an kritischen Punkten zu. Das gesamte aufgezeichnete Messsignal des Pulses ist im Bild oben in der Mitte abgebildet.

Messungen bei unterschiedlichen Lastwiderständen zeigen bis auf unterschiedliche Sättigungsspannungen und abweichende Zeitkonstanten die gleichen Verläufe. Sowohl der Signalanstieg als auch der Abstieg werden durch ein hochfrequentes Schwingen eingeleitet. Dies kann auf Überschwingungen durch den elektrischen Impuls an der LED zurückgeführt werden, die durch induktive Kopplung das Signal der Solarzelle beeinflussen. Der Versuch, die Kabel von Solarzelle und LED voneinander zu distanzieren, brachte eine geringe Verminderung der Amplitude des Anschwingens. Dies ist ein klares Indiz für die induktive Kopplung und zeigt somit, dass der Puls in der LED zu dem Puls in der Solarzelle keine Zeitverschiebung hat.

Der exponentielle Anstieg und Abfall des Signals ist deutlich nachzuvollziehen und stimmt gut mit dem Fit überein. Die absteigende Flanke weicht gegen Ende leicht vom Fit ab. Grund hierfür könnte das Rauschen sein, welches einen Abfall auf genau Null verhindert und hierdurch zu Fehlern in der Fitprozedur führt. Diese Abweichungen spiegeln sich auch in den Fehlern der Zeitkonstanten wieder.

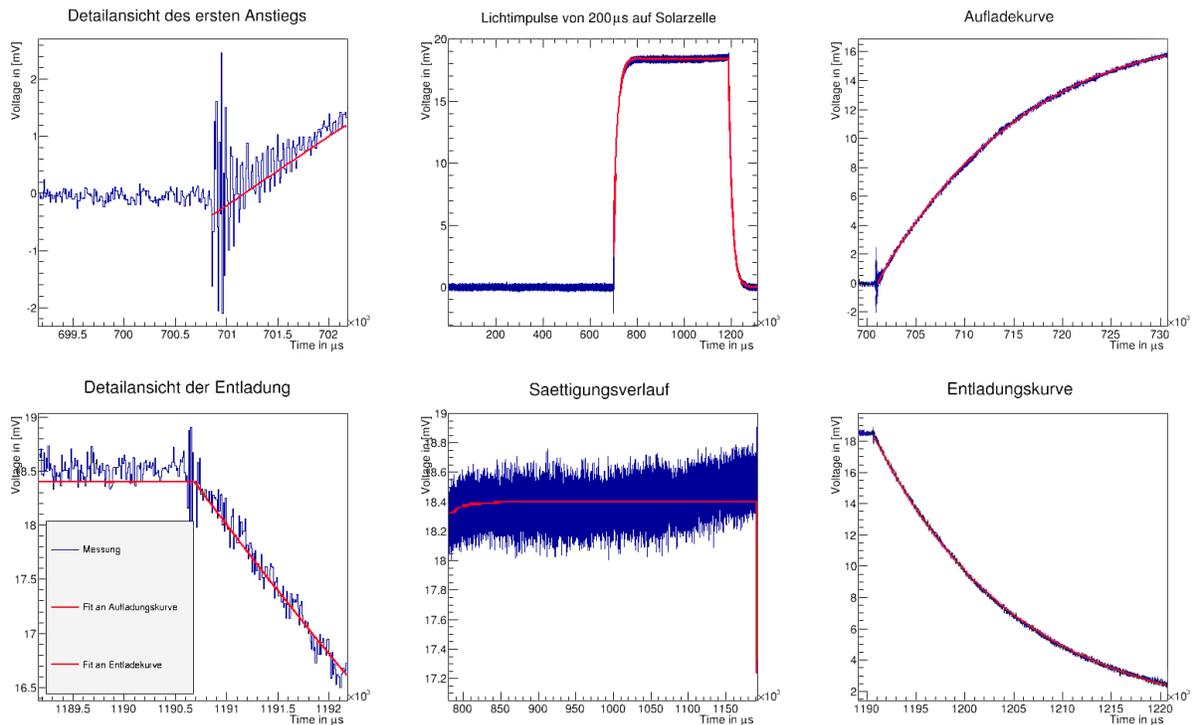


Abbildung 4.3: Signal eines $500 \mu\text{s}$ langen Pulses bei $193.9 \Omega \pm 6.3 \Omega$ Lastwiderstand

Eine weitere geringe Abweichung vom Fit ist in Abb. 4.3 im mittleren Bild der unteren Reihe zu sehen. Kurz vor Beginn des Abfalls kommt es zu einem leichten Anstieg der Signalamplitude. Da eine kontinuierliche Signalzunahme nur durch Zunahme des Lichtsi-

gnals ausgelöst werden kann, ist die Ursache in der Signalamplitude des Pulsengenerators zu suchen.

Tabelle 4.1: Zeitkonstanten und Maximalspannungen des Signals des Pulses in Abhängigkeit vom Lastwiderstand

Widerstand in Ω ($\pm 3\%$)	Zeitkonstante τ in μs		Sättigungsspannung in mV
	der steigenden Flanke	der fallenden Flanke	
0.4	-	-	-
49.6	9.47 ± 0.15	9.12 ± 0.12	12.28 ± 0.02
98.4	12.34 ± 0.17	12.45 ± 0.16	15.04 ± 0.02
193.9	14.92 ± 0.16	14.60 ± 0.17	18.04 ± 0.02
286.4	16.03 ± 0.15	15.85 ± 0.18	20.46 ± 0.02
463.2	16.67 ± 0.14	16.64 ± 0.19	21.51 ± 0.02
863.0	17.18 ± 0.15	17.15 ± 0.21	20.08 ± 0.02
3865.0	18.14 ± 0.16	17.54 ± 0.22	21.46 ± 0.02
5926.6	18.90 ± 0.14	18.52 ± 0.24	22.58 ± 0.02
6260.6	18.21 ± 0.17	18.12 ± 0.23	21.76 ± 0.02

In Hinblick auf das Verhalten bei unterschiedlichen Lastwiderständen ist zu vermuten, dass die Zeitkonstante τ sich gemäß $\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R \cdot C}$ verhält. Da die Kapazität der Solarzelle sich bei diesen schwachen Pulsen nicht stark ändern sollte, ist eine proportionale Abhängigkeit der Zeitkonstanten zum Widerstand zu erwarten. Die Sättigungsspannung sollte zu den selben Ergebnissen wie die kontinuierlicher Bestrahlung führen, dementsprechend ist ein ähnlicher Verlauf zu Abb. 3.5 zu vermuten. Die Ergebnisse der Messungen sind im Tab. 4.1 aufgelistet.

Das Verhältnis von Zeitkonstante und Widerstand weicht stark von der erwarteten Proportionalität ab. Zum Verständnis dieser Abhängigkeit bietet sich an, die reziproke Zeitkonstante gegen den Widerstand aufzutragen (siehe Abb. 4.4). Ein Fit ist mithilfe der Addition einer Offsetkonstante möglich. Physikalisch ist dies über das Ersatzschaltbild der Solarzelle aus parallelgeschalteter Kapazität und Stromquelle zu erklären. Über die Stromquelle ist eine vom Widerstand unabhängige Ladung der Kapazität möglich, was sich in dem konstantem Offset widerspiegelt. Aus der Auswertung folgt, dass eine Solarzelle, wie auch immer sie beschaltet ist, eine nicht überschreitbare maximale Zeitkonstante besitzt. Die Reduktion der Zeitkonstante wiederum setzt erst unterhalb von Widerständen von 300Ω ein. Die gute Übereinstimmung des Fits zeigt zudem, dass die reziproke Abhängigkeit von Widerstand und Zeitkonstante nach Erweiterung durch eine Konstantenaddition auch hier seine Berechtigung hat. Aus dem Fit kann daher auf die Kapazität der Solarzelle geschlossen werden. Diese ergibt sich zu $387.5 \text{ nF} \pm 7.2 \text{ nF}$.

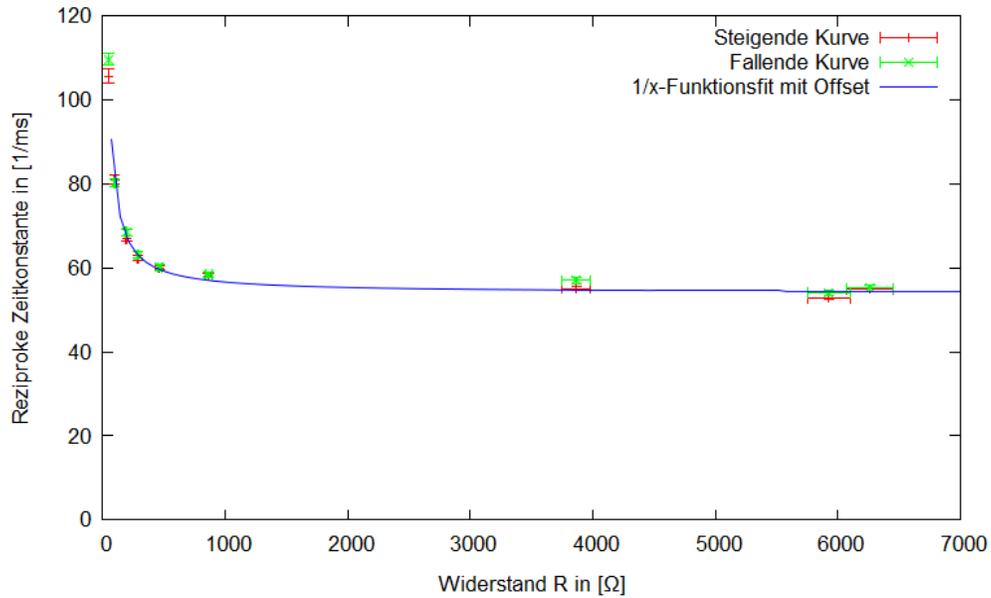


Abbildung 4.4: Fitwerte der Zeitkonstanten für die steigende und fallende Flanke in Abhängigkeit des Lastwiderstandes

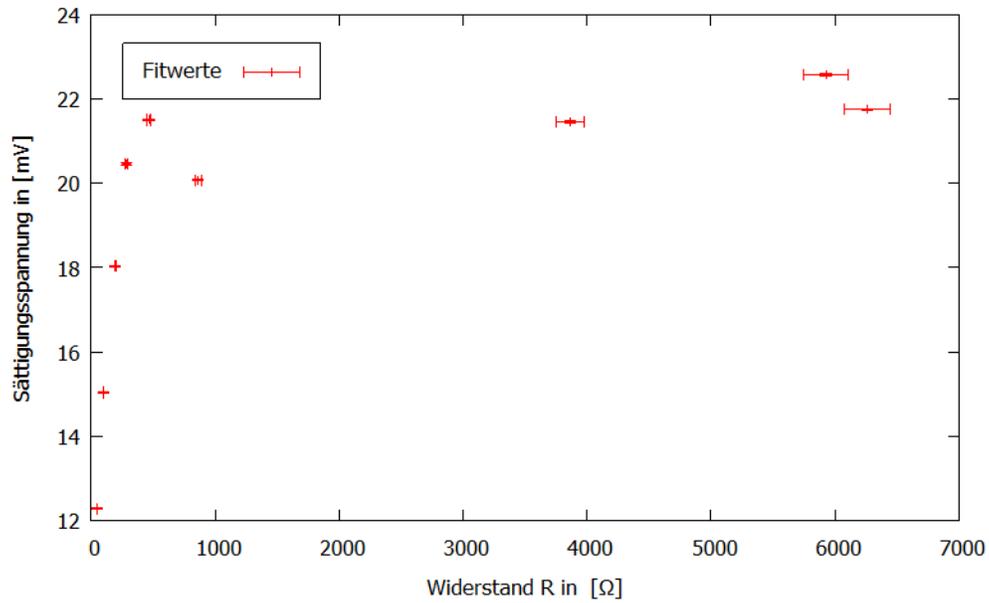


Abbildung 4.5: Aufgetragene Fitwerte für die Sättigungsspannung in Abhängigkeit des Lastwiderstandes

Die Abhängigkeit von Widerstand und Sättigungsamplitude ist in Abb. 4.5 dargestellt. Der Vergleich mit Daten aus der kontinuierlicher Bestrahlung (siehe Abb. 3.5) zeigt ein ähnliches Verhalten. Beide Messungen weisen einen starken Anstieg bis 300Ω auf mit

einem anschließenden, abrupten Übergang in ein Plateau mit einer geringen, verbleibenden Steigung.

Abweichend zeigen sich große Schwankungen, die vor allem innerhalb des Plateaus deutlich zu erkennen sind und höchstwahrscheinlich auf Schwankungen der LED-Helligkeit basieren. Der Umstand, dass der HP Pulsgenerator während der Messung wiederholt durch eine schlechte Spannungskalibrierung auffiel, bekräftigt diese Vermutung (siehe Abschn. 4.4). Die Auswertungen der Zeitkonstanten sind aufgrund des marginalen Einflusses der Lichtintensität von diesen Einwirkungen nicht betroffen.

Eine kleine Bemerkung zu diesem Versuch sei hier noch eingeschoben: Entgegen erster Vermutungen liegt der Innenwiderstand des SIS3300 ADC nicht im Megaohm- sondern im Kiloohmbereich. Da dies leicht übersehen wird, kommt es schnell zu Fehlkalkulationen.

4.4 Abhängigkeit zur Beleuchtungsstärke

In diesem Versuchsteil wurde bei einem konstanten Lastwiderstand von $6.3 \text{ k}\Omega$ die Pulsgegeneratorspannung Schritt für Schritt angehoben. Die Pulslänge lag während dieser Messung bei $200 \mu\text{s}$, wodurch sowohl die gesamte Auf- als auch Entladekurve in dem Messzeitraum abgebildet wurde. Aufgrund des ähnlichen Verlaufs der Signalamplitude im Vergleich zu vorherigen Messungen (siehe Abb. 4.3) wurde auf eine Abbildung des Messsignals verzichtet. Die Ergebnisse des Versuches sind in Tab. 4.2 aufgelistet.

Tabelle 4.2: Zeitkonstanten und Maximalspannung des Signals des Pulses in Abhängigkeit von der LED-Spannung

Spannung an LED in V ($\pm 0.1\text{V}$)	Zeitkonstante τ in μs		Sättigungsamplitude in mV
	der steigenden Flanke	der fallenden Flanke	
0.5	-	-	-
1.0	19.53 ± 0.31	18.38 ± 0.20	8.54 ± 0.03
1.5	18.38 ± 0.17	18.21 ± 0.13	20.18 ± 0.04
2.0	18.42 ± 0.17	18.24 ± 0.10	28.39 ± 0.05
2.5	18.34 ± 0.13	18.24 ± 0.10	36.02 ± 0.05
3.0	18.24 ± 0.13	18.24 ± 0.10	45.55 ± 0.06
3.5	18.34 ± 0.10	18.28 ± 0.07	54.03 ± 0.06
4.0	18.31 ± 0.10	18.31 ± 0.07	60.81 ± 0.07
4.5	18.38 ± 0.10	18.31 ± 0.07	65.99 ± 0.07
5.0	18.31 ± 0.10	18.34 ± 0.07	70.57 ± 0.07
5.5	18.24 ± 0.10	18.34 ± 0.07	74.56 ± 0.07
6.0	18.24 ± 0.10	18.52 ± 0.07	78.28 ± 0.08

Wie im letzten Abschnitt erwähnt, besitzt der HP Pulsgenerator eine schlechte Spannungskalibrierung. Deutlich wird dies, wenn man sich vor Augen führt, dass für die Emission der verwendeten blauen Strahlung mindestens 2.5 V benötigt wird, Spannungssignale an der

Solarzelle jedoch schon bei einer eingestellten Pulsgeneratoramplitude von 1 V auftreten. Eine direkte Messung der Pulshöhen am Oszilloskop legt den Schluss nahe, dass die am Generator festgelegten Amplituden in etwa mit dem Faktor 4 multipliziert werden müssen, um die reale Pulshöhe zu ermitteln. Ein abschließender Widerstand kann dieses Verhältnis jedoch ändern. Für die weiteren Versuche wurde daher lediglich von einem proportionalen Zusammenhang zwischen realer und eingestellter Amplitude ausgegangen und die Größenordnung der Spannungen nicht in die Betrachtungen mit einbezogen.

Die Tabelle zeigt deutlich, dass die Helligkeit der LED keinen Einfluss auf die Zeitkonstante von steigender und fallender Flanke hat. Dies ist eine sehr wichtige Information zur Beurteilung der Anstiegsgeschwindigkeit bei Lichtimpulsen.

Der Verlauf der Sättigungsamplitude kann wiederum auf die Messungen der kontinuierlichen Lichtquelle (siehe Abschn. 3.2) zurückgeführt werden. Für den direkten Vergleich ist eine Umrechnung der LED-Spannung in die LED-Stromstärke über die Diodengleichung (Gl. 2.1) möglich, welche jedoch aufgrund der fehlerhaften Spannungskalibration nicht durchgeführt wurde.

4.5 Messung am Solarpanel

Nach der Anlieferung des großen Solarpanels, wurde der Einfluss der größeren Fläche und der Hintereinanderschaltung einzelner Solarzellen auf das Signal untersucht. Da die Abmessungen von 150 cm × 66.8 cm zu groß für den Dunkelkasten waren, wurde die Messung in ein Dunkellabor verlegt. Die Wahl der Geräte wurde nicht verändert, sodass die zuvor genutzten Programmroutinen weiterhin verwendet werden konnten.

Da das Solarpanel Ströme von bis zu 10 A liefert, bestand die Gefahr einer Überlastung des ADC. Um dies zu verhindern, wurde ein Hochpass 1. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 20 Hz verwendet, der die Gleichstromanteile herausfilterte. Das Schaltbild des erweiterten Messaufbaus ist in Abb. 4.6 dargestellt.

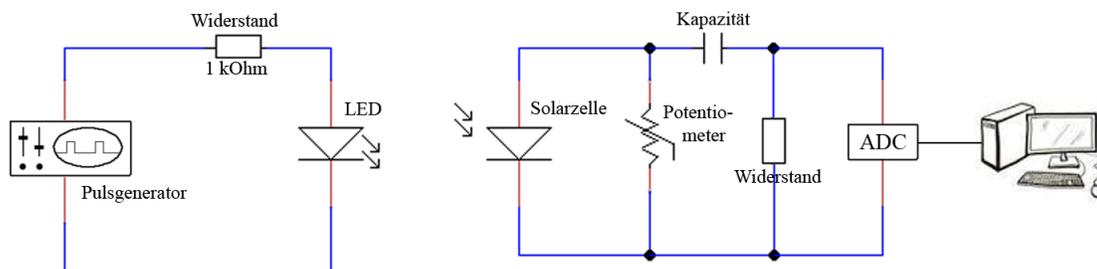


Abbildung 4.6: Schaltbild des Messaufbaus mit eingebautem Hochpass

Die Auswirkungen des Hochpasses mussten in der Fitfunktion berücksichtigt werden. Dies konnte über die Multiplikation einer abnehmenden e-Funktion erreicht werden. Letztendlich wurde die Näherung einer linearen Annahme aufgrund der geringen Grenzfrequenz und

der einfacheren Handhabung verwendet. Eine Messung an dem Solarpanel mit modifiziertem Fit ist in Abb. 4.7 zu sehen.

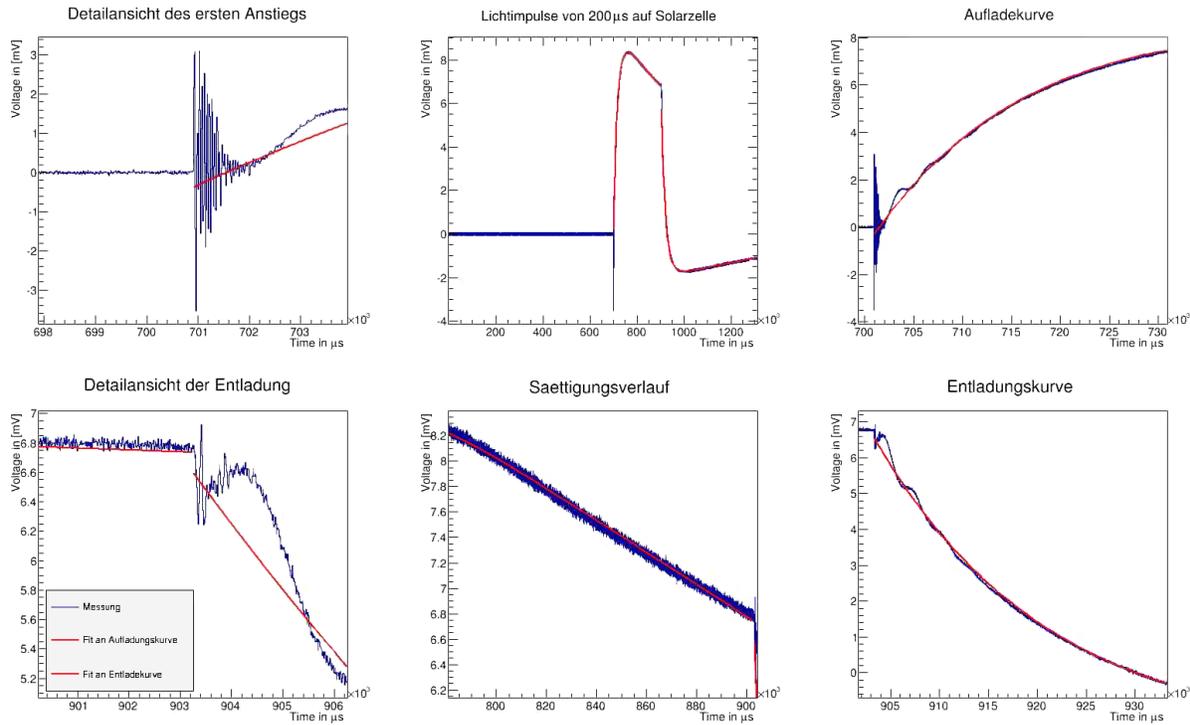


Abbildung 4.7: Signal eines 200 μs Lichtpulses auf der großen Solarzelle

Abgesehen von den Auswirkungen des Hochpasses, ist der Verlauf den vorangegangenen Messergebnissen sehr ähnlich. Auch hier ist ein klarer, exponentieller Anstieg und Abstieg zu erkennen. Unterschiede liegen in der Amplitude des elektrischen Schwingens am Anfang und Ende des Pulses, welches weitaus stärker gegenüber dem Pulssignal ausgeprägt ist. Allerdings ist auch die Signalstärke trotz Senkung des Abstandes zwischen LED und Solarpanel auf 1 cm geringer als bei der kleinen Solarzelle. Die geringere Spannungsamplitude weist auf den resistiven Charakter der in Reihe geschalteten, unbelichteten Bereiche hin. Außerdem kommt es zu langsamen Schwingungen von 200 kHz, die auf eine Eigenfrequenz des Bauteiles hindeuten. Die Zeitkonstanten der kleinen Solarzelle weichen im Vergleich zum großen Solarpanel nur geringfügig voneinander ab und zeigen die gleiche Widerstandsabhängigkeit. So liegt bei einem Lastwiderstand von 6.3 kΩ die Zeitkonstante der kleinen Zelle bei 18.3 μs und die des Solarpanels bei 16.1 μs. Folglich können die zuvor gewonnenen Ergebnisse auch zeitlich auf das große Solarpanel übertragen werden.

Da Blitze sich üblicherweise nicht in einem Dunkellabor entladen, musste der Einfluss von Hintergrundbeleuchtung auf die Form des Pulses untersucht werden. Aus Zeitgründen wurde diese Untersuchung jedoch nur quantitativ durchgeführt mit Verzicht auf eine genaue Bestimmung der Stärke der Hintergrundstrahlung. Wie zu erwarten verringerte sich bei

zusätzlicher Beleuchtung die Sättigungsspannung. Eine genaue Bestimmung der Stärke dieser Abschwächung ist über die Kennlinie (siehe Abschn. 2.2 und 3.2) möglich. Zudem nahm die Zeitkonstante geringfügig ab.

Für weitere Untersuchungen hätte sich die Messung an der Solarzelle bei definierter Hintergrundstrahlung angeboten, da hier eine gleichmäßige Beleuchtung durch den Lichtpuls gewährleistet werden kann. Letztendlich war diese Messung immer wieder geplant worden, doch die Messungen von Blitzen und der Aufbau von Filterschaltungen hatten Priorität.

4.6 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse dieses Kapitels sollen im Folgenden kurz zusammengefasst werden: Bei einem Lichtpuls kommt es zu einem exponentiellen Anstieg $\sim (1 - e^{-bt})$ der Spannung bis zur Sättigungsspannung und einem exponentiellen Abfall nach Beendigung des Pulses. Sowohl An- als auch Abstieg folgen dem Signal unmittelbar.

Die Sättigungsspannung entspricht der Spannung bei kontinuierlicher Bestrahlung und kann über die Solarzellengleichung (Gl. 2.2) bzw. die Kennlinie bestimmt werden. Unterhalb von Lastwiderständen von $300\ \Omega$ verringert sich die Sättigungsspannung stark, während sie oberhalb weitgehend konstant ist. Bei Hintergrundbeleuchtung kommt es zu einer Reduktion der Signalamplitude des Pulses. Diese Reduktion steigt sowohl mit der Stärke der Hintergrundstrahlung als auch durch Steigerung des Lastwiderstandes.

Die Zeitkonstante des exponentiellen An- und Abstiegs ist näherungsweise gleich. Sie ist von der Amplitude der Pulshöhe unabhängig, steigt jedoch bei Vergrößerung des Lastwiderstandes. Auch hier kommt es unterhalb von $300\ \Omega$ zu einer starken Verringerung der Sättigungsspannung und oberhalb zu einem konstantem Verhalten. Zudem ist eine leichte Abnahme der Zeitkonstante bei Hintergrundbeleuchtung gemessen worden. Typische Werte liegen zwischen 10 und $18\ \mu\text{s}$ und bestimmen die Reaktionsgeschwindigkeit bzw. den zeitlichen Fehler der Detektion von Lichtpulsen durch Solarzellen. Eine Grenze der Messung bei Nanosekundenpulsen beruht auf der langen Anstiegszeit. Prinzipiell sind beliebig kurze Pulse messbar, falls ihre Amplitude sich vom Rauschen absetzen kann.

All diese Eigenschaften gelten bis auf kleine materialspezifische Unterschiede sowohl für kleine Solarzellen als auch für großflächige Solarpanels.

5 Detektion von Blitzen mit einem Solarpanel

In diesem Kapitel wird die Detektion von Gewitterblitzen mithilfe des Solarpanelsignals beschrieben. Die gewonnenen Daten der Blitzereignisse werden analysiert und Störungen sowie deren mögliche Gegenmaßnahmen diskutiert.

5.1 Messaufbau

In Verbindung mit der Lieferung des Solarpanels wurde die direkte Messung eines Blitzes überfällig. Zu diesem Zweck wurde ein Platz auf dem Vordach der Universität mit kurzer Distanz zu einem ungenutzten Büro zur Positionierung des Solarpanels gewählt. Da das Vordach von zwei Seiten an lichtabschirmende Unitürme angrenzte, wurde das Solarpanel für eine maximale Signalausbeute in die offene Richtung schräg an einem Tisch befestigt (siehe Abb. 5.1). Zwei Kabel leiteten das Solarpanelsignal in das leerstehende Büro, wo der Spannungsverlauf aufgezeichnet wurde.

Das Modell des Solarpanels ist Kyocera KD140GH-2YU, der Nachfolger des in Argentinien verwendeten Kyocera KD140GH-2PU. Beide Modelle unterscheiden sich nur in der Oberflächenbeschichtung. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass das Signalverhalten beider Versionen ähnlich ist. Für die ersten Messungen wurde auf die in den Detektorstationen verbauten Charge-Controller und die Batterie verzichtet, da bei Anschluss starke rechteckige Pulse den Signalverlauf störten. Die Untersuchung dieses Phänomens folgt in Kapitel 6.

Zur Aufnahme des Signalverlaufs wurde das Picoscope 6402 von Picotechnology verwendet (siehe Abb. 5.2). Dies ist ein hochpräziser elektronischer Oszillograph zur Nutzung über einen PC, dessen Steuerung über das mitgelieferte Programm Picoscope 6 erfolgt. Das Programm ermöglicht eine übersichtliche Datenansicht, einfache Sicherung und Weiterverarbeitung von Messungen sowie eine große Anzahl an diversen Feineinstellungen. So sind z.B. komplexe Triggerbedingungen von verschiedenen Spannungsfenstern und Pulsweitenfenstern möglich.



Abbildung 5.1: Das aufgerichtete Solarpanel in Detektionsposition

Eine solche Triggereinstellung sollte dazu genutzt werden, die Messung bei dem schnellen Spannungsanstieg der Blitze auszulösen. Aufgrund von diffuser Strahlung sowie der Einstrahlung der Sonne ändert sich die Spannung des Solarpanels je nach Wetter und Tageszeit. Damit trotzdem eine einfache Spannungsschwelle als Triggersignal genutzt werden konnte, wurde der Gleichspannungsanteil über einen Hochpass herausgefiltert. Dessen Grenzfrequenz musste sorgsam gewählt werden, damit zum einen nicht schon die langsamen Lichtänderungen der Wolken ein Triggersignal auslösten und zum anderen das Signal der Blitze nicht zu sehr verfälscht wurde. Die Länge des Signales von Blitzen wurde einige Wochen zuvor mit einer Photozelle an einem Oszilloskop auf näherungsweise 1 Millisekunde bestimmt. Unter Berücksichtigung dieses Wertes stellte sich nach einigen Versuchen mit zusätzlichen Wolkenereignissen eine Kombination von einem $1\text{ k}\Omega$ Widerstand und einer Kapazität von $1.67\text{ }\mu\text{F}$ als geeignet heraus. Die Grenzfrequenz von $\approx 50\text{ Hz}$ war damit so gewählt, dass nur eine geringe Auswirkung auf das Signal des Blitzes zu erwarten war.



Abbildung 5.2: Das elektronische PicoScope 6402

Die Spannungsschwelle zur Auslösung einer Messung wurde auf 300 mV und die Totzeit auf 1 Sekunde (vgl. Abschn. 2.1) festgelegt. Da die Sättigungsspannung bei 22 V liegt, konnten hierdurch schon schwache Lichtpulse und Ereignisse bei starker Hintergrundstrahlung ein Triggersignal auslösen. Das Auslösen des Triggersignals führte zur Abbildung des Signalverlaufs über einen Zeitraum von 20 ms mit anschließendem Abspeichern der Daten, wobei durch den Erstellungszeitpunkt der Dateien die Ereignisse zeitlich zugeordnet werden konnten. Als Speicherort wurde der Cloud-Speicher Dropbox verwendet, was eine direkte Weiterverarbeitung auch von Extern möglich machte. Unter diesen Bedingungen wurde eine Langzeitmessung gestartet, deren Ergebnisse im Folgenden diskutiert werden.

5.2 Störungen

Ein großes Problem der fortlaufenden Messungen waren die immer wieder auftretenden Störpulse, die die Triggerschwelle überstiegen und die Aufzeichnung auslösten. Die auftretenden Störungen waren von ganz unterschiedlicher Form, gemeinsam war ihnen jedoch die hohen Frequenzen des Signals. Abb. 5.3 zeigt zwei typische Beispiele der auftretenden Störungen.

Während der ersten Messzeiten war die Empfindlichkeit des Messsystems auf hochfrequente Störsignale so stark, dass innerhalb eines Tages bis zu 400 Störungen auftraten. Verbessert wurde dies durch den Einsatz von Koaxialkabeln als Verbindung zwischen Solarpanel und Aufnahmesystem. Eine weitere Verbesserung brachte die Umhüllung der Kontakte mit Aluminiumfolie. Gerade die Abdeckung der abisolierten Kabelstränge an dem Solarpanel verringerte die Störungen stark. Im Falle eines schlecht zugänglichen Kontaktpunktes, bei dem innerhalb der Aluminiumisolierung ein Hohlraum entstand, wurden auch negative

Auswirkungen auf das Rauschen gemessen. Da die Anzahl der Störungen stark von statistischen Schwankungen beeinflusst waren, wurde als qualitatives Maß für die Isolation das RMS (RootMeanSquare) des natürlichen Rauschens genutzt. Der Einsatz der Alufolie verbesserte diesen von $9.7\text{ mV} \pm 0.2\text{ mV}$ auf $6.0\text{ mV} \pm 0.2\text{ mV}$ und verringerte die Anzahl der Störpulse auf 30-40 pro Tag.

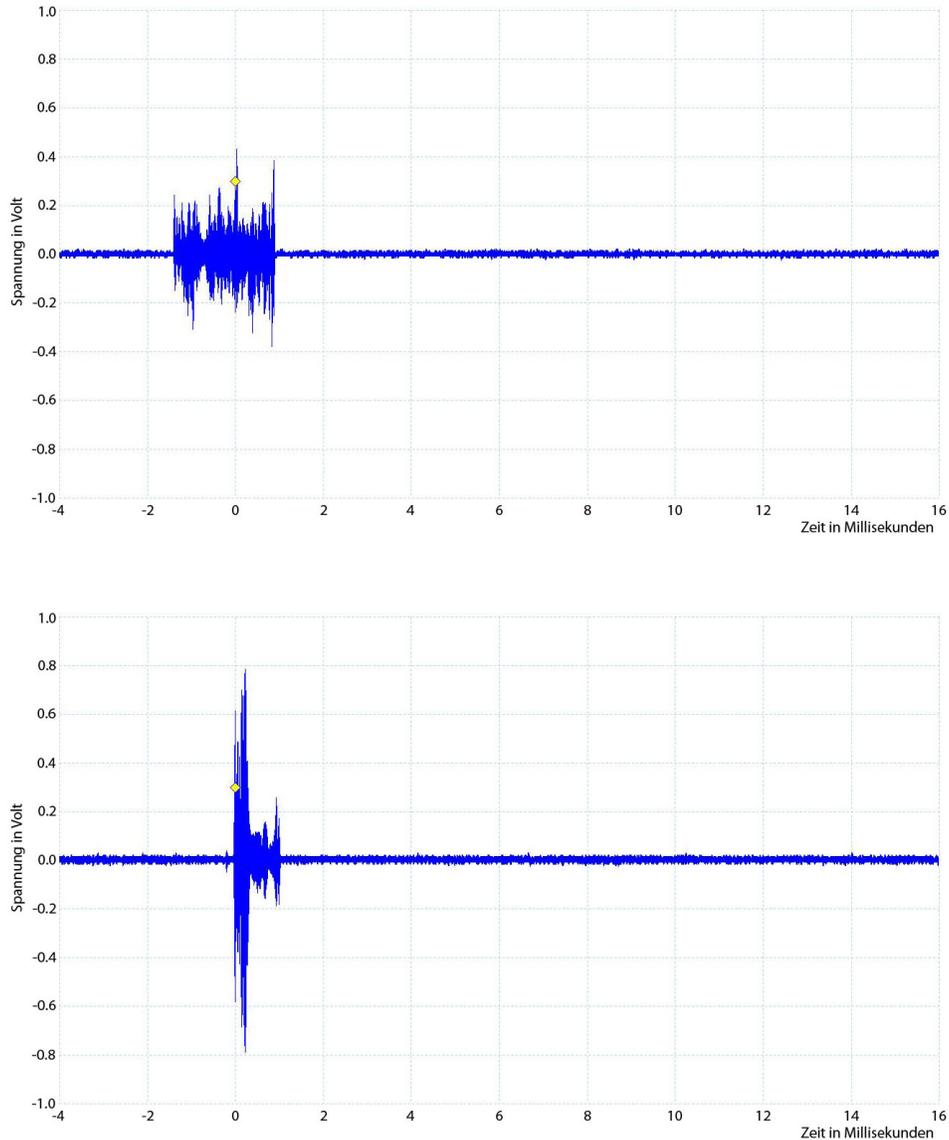


Abbildung 5.3: Exemplarische Beispiele für Störungen

Für die weitere Reduktion des Störpulses wurde der Einbau eines Tiefpasses geplant. Hierzu wurden auf den aufgenommenen Daten der Störungen verschiedene Tiefpassfilter simuliert. Die Simulationen zeigen, dass ein Tiefpassfilter mit einer Grenzfrequenz von 10 kHz die Amplitude der Störungen um 95% verringern würde, während die grobe Struktur von

Blitzereignissen nicht beeinflusst würde. Dies ist für eine genaue Untersuchung des Blitzverlaufs nicht zu empfehlen, könnte jedoch für die bloße Detektion einen großen Vorteil bieten.

Zur Eingrenzung der Herkunft der Störungen wurde das Solarpanel abgedeckt. Dies führte zu keiner Veränderung der Anzahl der hochfrequenten Pulse, welche folglich nicht von Lichtimpulsen stammen konnten. Die hochfrequenten Pulse stammen daher höchstwahrscheinlich von naheliegenden elektromagnetischen Sendern. Die Vermutung, dass es sich hierbei um Atmosphärics, d.h. hochfrequente, elektromagnetische Wellen, die bei der Entstehung eines Blitzes ausgesendet werden, handelt, kann jedoch verneint werden, da in diesem Falle der Messung eines Blitzes eine Störung vorausgehen würde.

5.3 Messungen von Blitzen

Während der Laufzeit der Messung zur Blitzdetektion zog am Sonntag dem 08.09.2013 ein schweres Gewitter zwischen 3.45 Uhr und 6.30 Uhr über Wuppertal hinweg. Einige, exemplarische Beispiele der Spannungsverläufe sind in Abb. 5.4 dargestellt. Weitere Messungen der aufgezeichneten Blitze sind in chronologischer Ordnung im Anhang abgebildet.

Ein zeitlicher und örtlicher Abgleich mit der Blitzdatenbank von Blitzortung.org sowie mit der Blitzdetektionsmessung über Atmosphärics von Lukas Niemietz bestätigte die Messungen als Blitzereignisse. Die Daten zeigen, dass die aufgenommenen Blitzpulse eine Signaltbreite von mindestens 1 ms haben und ab einem Abstand von 1 ms weitere Entladungen folgen können. Die maximale Signallänge sowie die Anzahl und Frequenz von Folgeblitzen konnte aufgrund des verwendeten Zeitfensters nicht bestimmt werden.

Die Blitze unterscheiden sich in Amplitude, Dauer und Anzahl der Folgeblitze sowie der Stärke des Signalrauschens. Es ist anzunehmen, dass eine starke Zunahme des Rauschen auf die hochfrequente Strahlung eines nahen Blitzeinschlag hindeutet.

Der Effekt, dass mit zunehmender Dauer des Blitzes negative Spannungsverläufe gemessen wurden, ist auf die Auswirkungen des Hochpassfilters zurückzuführen. Da das Verhalten des Hochpassfilters bekannt ist, ist es möglich, die Auswirkung zu berechnen und das Signal numerisch von diesem Effekt zu bereinigen. Da bei einer Überschreitung der maximalen Messamplitude diese Methode jedoch fehlschlägt, konnte sie nur begrenzt verwendet werden und erbrachte zudem keinen weiteren Kenntnisgewinn.

Sowohl der Anstieg als auch der Rückgang des Signals eines Blitzpulses ist im Vergleich zu künstlich erzeugten Lichtpulsen weitaus langsamer (vgl. Tab. 4.1). Des Weiteren entspricht der Verlauf der Spannungskurven bei keiner Messung einer exponentiellen Funktion mit einer Zeitkonstante von $15 \mu s$. All dies weist auf eine stetige Helligkeitsentwicklung mit Steigungszeiten von mehreren 100 Mikrosekunden hin.

In Hinblick auf das theoretische Wissen über Entladungszeiten (siehe Tab. 2.1) stimmen die Pulszeiten nicht mit dem eines primären Leitblitzes überein. Eine gute Übereinstimmung ist dagegen für die Struktur der Folgeblitze gegeben.

5 DETEKTION VON BLITZEN MIT EINEM SOLARPANEL

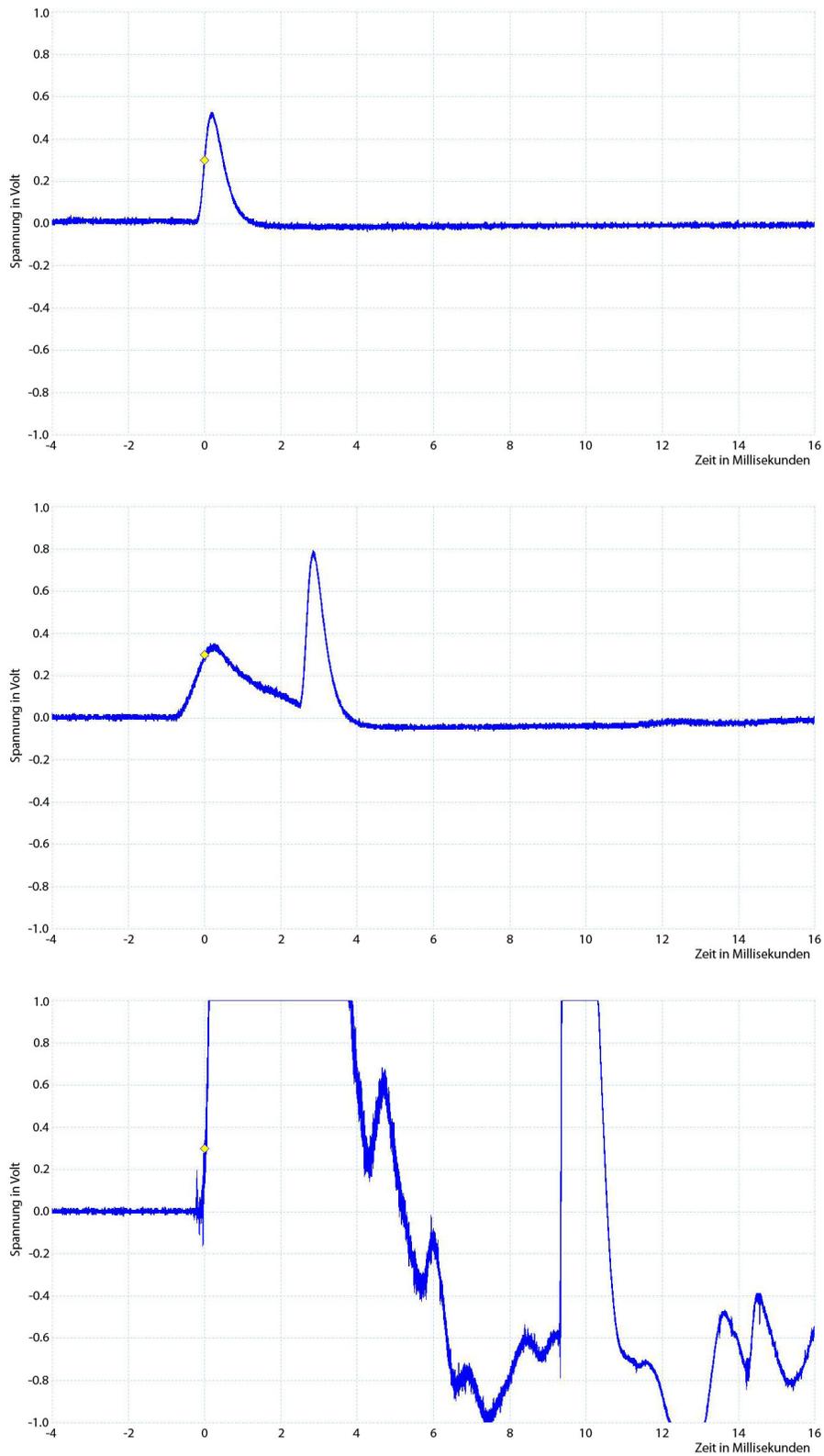


Abbildung 5.4: Ausgewählte Blitze der Messung vom 08.09.2013

Eine Messung mit größerer Aufnahmedauer hätte Aufschluss geben können, ob es sich hierbei tatsächlich um Folgeblitze handelt. Darüber hinaus hätte überprüft werden können, ob eine Separation von M-Komponenten und Folgeblitzen anhand des Signals durchführbar ist. Hierdurch könnte die Blitzlänge sowie die Anzahl der Folgeblitze bzw. Pulse bestimmt werden. Ferner hätte die zusätzliche Erhöhung der Maximalspannung die numerische Kalkulation der hochpassbereinigten Daten möglich gemacht. Die beschriebene Messung war geplant, konnte jedoch aufgrund des Ausbleibens eines Gewitters nicht durchgeführt werden. Trotzdem war das vorrangige Ziel der Konstruktion eines Blitzdetektorsystems mithilfe eines Solarpanels gelungen.

6 Blitzmessungen an einer autonomen Detektorstation

In diesem Kapitel wird der Versuch unternommen eine Solarblitzmessung an einem Solarsystem, das dem der Detektorstationen in Argentinien entspricht (siehe Abb. 6.1), zu realisieren. Hierbei wird insbesondere auf die Problematik der im Solarschaltkreis eingeschlossenen Geräte eingegangen.



Abbildung 6.1: Detektorstation in Argentinien

6.1 Aufbau

Dem argentinische Modell entsprechend, wurde zum Aufbau des Solarsystems neben dem Solarpanel ein Akku sowie ein Charge-Controller, der die Regelung des Ladeflusses übernimmt, benötigt. Als weiteres Bauteil ist die angeschlossene Elektronik zu erwähnen, welche auf einen sich ändernden Widerstand reduziert werden kann. Aufgrund der Kenntnis über die Auswirkungen von Widerstandsänderungen (siehe Abschn. 3.2 und 4.3) wurde dieser jedoch in der Schaltung nicht berücksichtigt.



Abbildung 6.2: Der verwendete Akku und Charge-Controller (nicht maßstabgetreu)

Die Modelle des Charge-Controllers und des Akkus weichen von den in Argentinien verwendeten Geräten ab. Dies lag zum einen an dem original Charge-Controller IVT SC 10A, der nicht mehr zu erwerben war, zum anderen an den hohen Kosten des Akkus, dessen Einfluss auch mithilfe eines kleineren Modells demonstriert werden konnte. Die Wahl führte zu dem von Steca Elektronik hergestellten Charge-Controller Solarix PRS 2020 und dem Akku DF-A512/6,5 S von Sonnenschein (siehe Abb. 6.2).

Vom prinzipiellen Aufbau her gilt, dass Akku und Solarpanel über den Charge-Controller verbunden sind, welcher den Stromfluss dieser Verbindung reguliert. Zur Blitzdetektion wurde die Spannung zwischen Solarpanel und Charge-Controller abgegriffen und wie zuvor über Hochpass und Picoscope ausgewertet.

6.2 Problematik und Lösungsansätze

Sowohl die Charge-Controller an den argentinischen Detektorstationen als auch der für diese Arbeit verwendete Charge-Controller regulieren den Ladestrom des Akkus mittels Pulsweitenmodulation. Die Funktionsweise entspricht der eines Schalters, der sich in periodischen Abständen öffnet und schließt. Durch die Modulation des Zeitraums bei geschlossenem Schalter kann der Ladestrom reguliert werden.

Infolge des Öffnens und Schließens der Verbindung zwischen Solarpanel und Akku kommt es zu einem Rechtecksignal am Oszilloskop. Die Frequenz dieses Rechtecksignals liegt bei 50 Hz - 1 kHz und erzeugt Spannungspulse mit Amplituden von bis zu 8 V. Da jeder dieser Pulse ein Triggersignal auslöst, ist eine Blitzdetektion in der bisherigen Konfiguration nicht möglich. Abb. 6.3 zeigt zwei exemplarische Pulse des Charge-Controllers bei unterschiedlichen Belichtungsstärken und Ladeständen des Akkus.

Zur Reduzierung der Pulse wurden verschiedene Frequenzfiltersysteme simuliert. Eine Voraussetzung an das Filtersystem war hierbei, dass das Ladesystem des Akkus nicht beeinflusst werden durfte. Erschwerend kam die Größe der Pulse und die ähnlichen Frequenzen der Pulse von Charge-Controller und Blitzen hinzu. Die Realisierung eines erforderlichen Filtersystems wäre daher nur mit großem Kostenaufwand und großen räumlichen Ausmaßen umsetzbar gewesen, weshalb andere Möglichkeiten gesucht werden mussten.

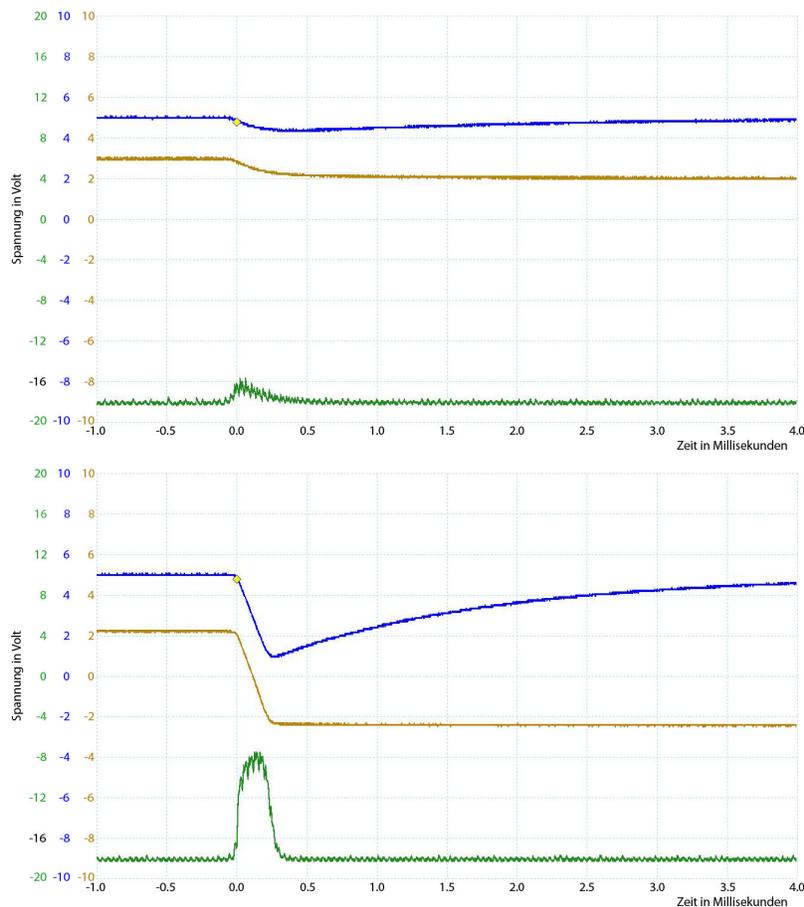


Abbildung 6.3: Gegenüberstellung der Pulse bei verschiedenen Helligkeiten
Die Spannung an dem Solarpanel ist in blau dargestellt, die durch den Hochpass gefilterte Spannung in gelb, und die negative differenzierte Spannung in grün.

Die Untersuchung der Separationsmethoden von Schalt- und Blitzpulsen konnte aufgrund der Abgabefrist der Bachelorarbeit nicht beendet werden. Geplant war die Überprüfung zweier Ansätze, die sich jedoch noch im Versuchsstadium befanden.

Zum einen sollte die Unterscheidung auf Basis des differenzierten Messsignals untersucht werden. Der gleichmäßige Spannungsan- und abstieg der Charge-Controller-Pulse sollte in diesem Fall als Unterscheidungsmerkmal dienen.

Zum anderen sollte die Dunkelheit während eines Gewitters genutzt werden. Diese Methode setzt voraus, dass die reduzierte Belichtung des Solarpanels nicht für den Ladevorgang des Akkus ausreicht und der Charge-Controller während dieses Zeitraums keine Verbindung aufbaut. In diesem Fall wäre während des abgedunkelten Zeitraums eine Blitzdetektion möglich. Zur Realisierung könnte somit eine S

olarpanelspannung oberhalb der Ladeschwelle als Vetosignal dienen. Es bleibt zu prüfen, ob unterhalb einer Spannungsschwelle die periodische Schaltung des Charge-Controllers

aussetzt und ob die Dunkelheit während eines Gewitters ausreicht, um diese Schwelle zu unterschreiten.

7 Fazit

Das in dieser Arbeit verfolgte Ziel war zum einen die Konstruktion eines Blitzdetektionssystems mithilfe einer Solarzelle. Zum anderen sollte eine mögliche Implementierung in die Cherenkov-Detektorstationen in Argentinien für den experimentellen Nachweis der Korrelation zwischen kosmischen Teilchen und Blitzen untersucht werden.

Mithilfe eines einfachen Hochpasses, über den die Solarzellenspannung gemessen wurde, konnte durch Schwellentriggerung eine fähige Blitzdetektion realisiert werden. Spezifische Messungen des Verhaltens der Solarzelle sowie die Einarbeitung in die Theorie der Blitze zeigten jedoch auch, dass die zeitliche Genauigkeit dieser Messung im Millisekundenbereich liegt. Hierbei führt die Reaktionszeit der Solarzelle zu Unsicherheiten von $\approx 10 - 20 \mu\text{s}$, während der Beginn der Blitzentwicklungen durch den lichtschwachen Leitblitz höchstwahrscheinlich zu Zeitfehlern von $\approx 35 \text{ms}$ führt, mindestens jedoch von einigen $100 \mu\text{s}$ durch die Anstiegszeit bis zur Triggerschwelle.

Durch die zeitliche Ungenauigkeit ist der Nachweis der Korrelation zwischen kosmischen Teilchen und Blitzen in dieser Konfiguration nicht möglich. Hinzu kommt, dass der an den Detektorstationen verwendete Charge-Controller zu großen Spannungspulsen führt, die zu Fehlregistrierungen führen, deren Auftreten bis jetzt nicht verhindert werden konnte.

Damit ist ein Einsatz des Solarpanels als Blitzdetektor in Argentinien mit dem jetzigen Kenntnisstand nicht empfehlenswert. Weitere Untersuchungen des Blitzverlaufes, eine präzisere Messung zur Detektion des Leitblitzes durch die Verringerung der Spannungsschwelle der Triggerung und des Rauschens sowie die Weiterführung der Ansätze zur Filterung der Spannungspulse des Charge-Controller können die Messung eventuell möglich machen und die Zeitpräzision verbessern. Trotzdem verbleibt der variable, lichtschwache Beginn des Blitzereignisses, welcher unweigerlich zu großen zeitlichen Fehlern führt.

Literatur

- [1] RAKOV, V. ; UMAN, M.: *Lightning - Physics and Effects*. Cambridge University Press, 2003
- [2] DWYER, Joseph R.: Vom Blitz getroffen. *Spektrum der Wissenschaft* Vol.11 (2005), S. 38–44
- [3] MARSHALL, T. ; U. A.: Observed electric fields associated with lightning initiation. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32* (2005)
- [4] DWYER, Joseph R.: *Powerpoint über "Radio detection in atmospheric and thunderstorm physics"*
- [5] FRANKLIN, Benjamin: *Schreiben Benjamin Franklins an John Mitchell vom 29. April 1749*. <http://founders.archives.gov/documents/Franklin/01-03-02-0149>. Zugriffsdatum: 27.10.2015
- [6] VORREITER, Leopold: *Blitzhandbuch*. Berger & Söhne, 1983
- [7] *Franklin's Lightning Rod*. <http://franklinlightningrod.wordpress.com>. Zugriffsdatum: 27.10.2015
- [8] QIE, X. ; U. A.: *Triggering Lightning Experiment: an Effective Approach to the Research of Lightning Physics*. Aerospacelab Lab. <http://www.aerospacelab-journal.org/a15/>. Zugriffsdatum: 27.10.2015
- [9] G. DIENDORFER, W. S.: ALDIS Austrian Lightning Detection and Information System. *Elektrotechnik & Informationstechnik* Vol. 5 (2008), S. 209–210
- [10] SARAIVA, A. C. V. ; U. A.: A comparative study of negative cloud-to-ground lightning characteristics in Sao Paulo (Barazil) and Arizona (United States) based on high-speed video observations. *Journal of Geophysical Research* Vol. 115 (2010)
- [11] DEMTRÖDER, Wolfgang: *Experimentalphysik Band 2 Elektrizität und Optik*. 5. Ausgabe. Springer-Verlag, 2009
- [12] GÖBEL, Holger: *Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik*. 2. Ausgabe. Springer-Verlag, 2011
- [13] MERTENS, Konrad: *Photovoltaik - Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011
- [14] WAGEMANN, Hans-Günther ; ESCHRICH, Heinz: *Photovoltaik - Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben*. Vieweg+Teubner. 2. Ausgabe, 2010

- [15] SENTMAN, D. ; U. A.: *Powerpoint über "Lightning Spectroscopy"*. http://www.goes-r.gov/downloads/2011-Science-Week/day-01_spectral_studies_lightning.pdf. Zugriffsdatum: 27.10.2015
- [16] HEWLETT PACKARD: *HP 214B Puls Generator Datenblatt*. <http://bee.mif.pg.gda.pl/ciasteczkowypotwor/HP/214B.pdf>. Zugriffsdatum: 27.10.2015
- [17] MYNBAEV, Djafar ; SCHEINER, Lwell: *Fiber-Optic Communications Technology*. Prentice Hall Verlag, 2000

A Anhang

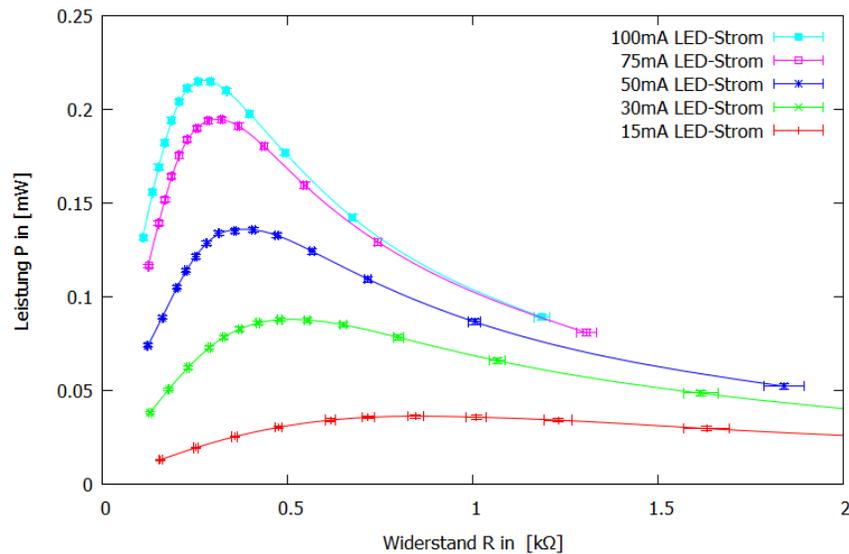


Abbildung A.1: Leistung in Abhängigkeit zum Widerstand bei Bestrahlung durch eine grüne LED

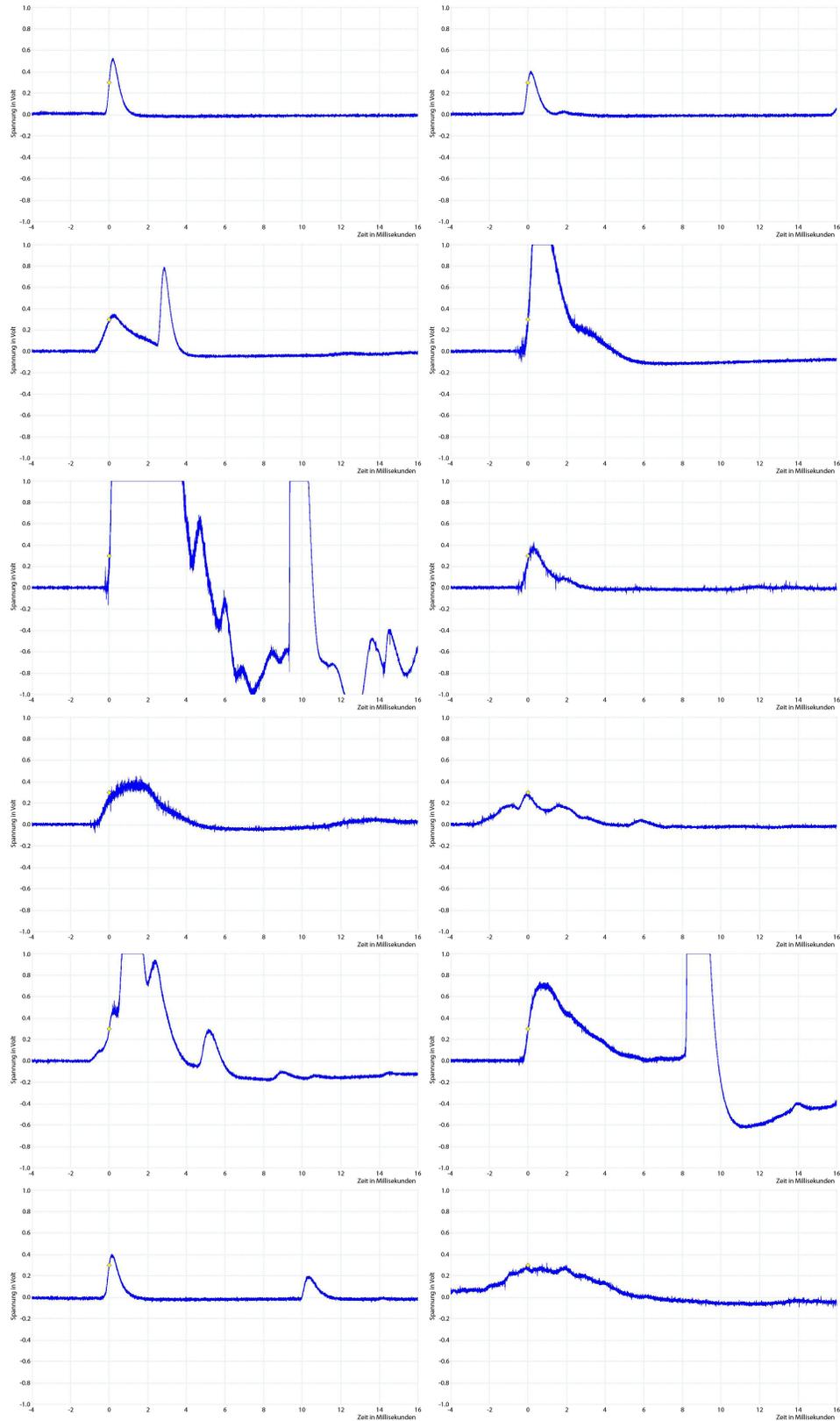


Abbildung A.2: Blitze eines vorbeiziehenden Gewitters in chronologischer Reihenfolge