



# **Systemauslegung eines Single Photon Detection Laser Altimeters für eine Kleinsatellitenmission im LEO**

Bachelorarbeit

Vorgelegt von:

Christoph Becker

Matr.Nr.: 400939

Studiengang: Verkehrswesen B.Sc.

Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme

Fachgebiet Raumfahrttechnik

Institut für Luft- und Raumfahrt

Marchstraße 12-14

10587 Berlin

Betreuer:

Prof. Enrico Stoll

Dipl.-Ing. Philipp Werner

21. August 2023

---

## **Selbständigkeitserklärung § 60 Abs. 8 AllgStuPO**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die selbstständige und eigenhändige Anfertigung versichere ich an Eides statt.

---

Datum, Ort

---

Unterschrift

---

## Vereinbarung über Verwertungsrechte

Studierende der TU Berlin müssen nach § 60 der AllgStuPO in ihrem Studium eine Abschlussarbeit leisten. Die Gesamtheit der Leistungen verbunden mit einer Abschlussarbeit basieren neben der schriftlichen Dokumentation und dem Engagement der Studierenden auch auf dem Betreuungsaufwand der Fachgebiete, dazu zählt die Erstellung der Aufgabenstellung, die spezifischen Anforderungen, Lenkung der Studierenden, Hilfen und Hinweise in organisatorischer, technischer und wissenschaftlicher Hinsicht. Daher ist der/die Studierende alleiniger Autor der schriftlichen Ausarbeitung, jedoch nicht alleiniger Urheber der Gesamtheit der Leistungen verbunden mit einer Abschlussarbeit.

Durch die Betreuung wird die Technische Universität Berlin, vertreten durch den Lehrstuhl für Raumfahrttechnik, zum Miturheber der Gesamtheit der Leistungen und den damit assoziierten Ergebnissen nach § 8 Abs. 1 Urheberrechtsgesetz. Für die nicht gewinnbringende Nutzung in Lehre und Forschung darf der Lehrstuhl die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nutzen. Als Miturheber steht dem Lehrstuhl dies nach § 8 Abs. 2 Urheberrechtsgesetz zu. Wird die Arbeit derart selbstständig verfasst, dass keine Miturheberschaft gegeben ist, wird dieses Nutzungsrecht nach § 31 Abs. 2 Urheberrechtsgesetz vom Studierenden eingeräumt. Dieses Nutzungsrecht ist unbeschränkt und umfasst Inhalte jeglicher Art (z.B. Dokumentationen, Präsentationen, Fotos, Videos, Verfahren, Entwürfe, Zeichnungen, Software einschließlich Quellcode und ähnliches) unter Nennung der Autorin bzw. des Autors.

Durch den Bezug zu laufenden Forschungsvorhaben wird der Studentin bzw. dem Studenten eine Veröffentlichung ohne explizite Genehmigung des Fachgebiets nicht gestattet. Dies ist im Einzelfall vom Fachgebiet zu prüfen und zu genehmigen. Eine eventuelle kommerzielle Nutzung beider Seiten erfolgt nur mit Zustimmung aller Autoren der vorliegenden Arbeit unter angemessener Beteiligung am Verdienst.

---

---

Datum, Ort

---

Unterschrift der/des Studierenden

---

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>  | <b>10</b> |
| <b>2</b> | <b>Laser</b>   | <b>12</b> |
| 2.1      | Festkörperlaser . . . . .                                    | 12        |
| 2.2      | Diodenlaser . . . . .  | 13        |
| 2.3      | Mikrochiplaser . . . . .                                     | 13        |
| <b>3</b> | <b>Photodetektoren</b>                                       | <b>14</b> |
| 3.1      | Avalanche Photo Diode . . . . .                              | 14        |
| 3.2      | Single Photo Avalanche Diode . . . . .                       | 14        |
| 3.3      | Photon Multiplier Tube . . . . .                             | 15        |
| <b>4</b> | <b>Auslegung</b>   | <b>17</b> |
| 4.1      | Link Budget . . . . .  | 17        |
| 4.2      | Hintergrundlicht . . . . .                                   | 20        |
| 4.3      | Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion (WKD) . . . . . | 20        |
| 4.3.1    | Rechteckpuls . . . . .                                       | 22        |
| 4.3.2    | Gaußpuls . . . . .   | 24        |
| 4.3.3    | Trefferchance . . . . .                                      | 28        |
| 4.4      | Messgenauigkeit . . . . .                                    | 31        |
| <b>5</b> | <b>Auswertung</b>  | <b>36</b> |
| 5.1      | Wahl der Wellenlänge . . . . .                               | 36        |
| 5.2      | Wahl des Teleskops . . . . .                                 | 37        |
| 5.3      | Betrieb im Schatten der Erde . . . . .                       | 39        |
| <b>6</b> | <b>Ressourcen Abschätzung</b>                                | <b>41</b> |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                       | <b>46</b> |

|          |                                     |           |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| <b>8</b> | <b>Ausblick</b>                     | <b>47</b> |
| 8.1      | Variation der Laserstärke . . . . . | 47        |
| 8.2      | Hohe QE im Infraroten . . . . .     | 48        |
| 8.3      | Pixeldetektor . . . . .             | 49        |
| <b>9</b> | <b>Quellen</b>                      | <b>50</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.1  | Link Budget mit einem 20 cm Teleskop . . . . .   | 18 |
| 4.2  | Link Budget auf einem 500 km Orbit . . . . .   | 19 |
| 4.3  | Hintergrundrate über Erde . . . . .  | 21 |
| 4.4  | Baumdiagramm des Rechteckpulses . . . . .  | 23 |
| 4.5  | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Events innerhalb eines Pulses mit<br>der Wellenlänge 1064 nm . . . . .         | 24 |
| 4.6  | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Events innerhalb eines Pulses mit<br>der Wellenlänge 532 nm . . . . .          | 25 |
| 4.7  | Zeitlicher Verlauf eines Pulses . . . . .  | 25 |
| 4.8  | Kombinierte Baumdiagramme . . . . .  | 26 |
| 4.9  | Vergleich eines Gaußpulses und Rechteckpulses . . . . .  | 27 |
| 4.10 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Hintergrundphotonen über das<br>gesamte Zeitfenster . . . . .                  | 29 |
| 4.11 | Wahrscheinlichkeitsverteilung der Hintergrundphotonen über eine<br>Pulslänge um eine Totzeit reduziert . . . . . | 30 |
| 4.12 | Verteilung von 6 Hintergrundevents bei 4 Signalevents . . . . .  | 31 |
| 4.13 | Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion . . . . .   | 32 |
| 4.14 | Simulation mit der Wellenlänge 1064 . . . . .  | 33 |
| 4.15 | Simulation mit der Wellenlänge 532 . . . . .   | 34 |
| 4.16 | Ausschnitt des Pulses von Abbildung 4.14 . . . . .   | 34 |
| 4.17 | Ausschnitt des Pulses von Abbildung 4.15 . . . . .   | 35 |
| 5.1  | Blick auf Schnee auf 500 km Höhe in Abhängigkeit der Pulslänge .   | 36 |
| 5.2  | Blick auf Schnee auf 500 km Höhe in Abhängigkeit des Teleskops .   | 37 |
| 6.1  | Elektrische Leistung eines 1mJ Mikrochip Lasers . . . . .  | 42 |
| 6.2  | Masse der Teleskops . . . . .  | 44 |
| 8.1  | Variation der Laserenergie . . . . .   | 47 |
| 8.2  | Elektrische Leistung eines 1mJ Mikrochip Lasers . . . . .  | 48 |

8.3 Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion mit einer Hohen QE  
im Infraroten . . . . . 49



## Tabellenverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Albedo eigene Darstellung nach (Goward 1998, ohne Seite) . . . . . | 18 |
| 5.1 | erforderlicher Teleskopdurchmesser bei Tag . . . . .               | 38 |
| 5.2 | Simulationsergebnisse bei Tag . . . . .                            | 38 |
| 5.3 | geforderter Teleskopdurchmesser bei Nacht . . . . .                | 39 |
| 5.4 | Simulationsergebnisse bei Nacht . . . . .                          | 40 |
| 6.1 | Teleskopmassen der gewählten Szenarien . . . . .                   | 44 |

# 1 Einleitung

LIDAR steht für "Light Detection And Ranging", also übersetzt "Licht Detektion und Entfernungsmessung". Es ist ein einfaches Konzept, bei dem ein Lichtpuls von einem Gerät, dem LIDAR, ausgesendet wird und dieses Licht wieder detektiert wird. Aus der verstrichenen Zeit zwischen der Aussendung des Pulses und der Detektion, der Time of Flight, lässt sich die Entfernung mithilfe der Lichtgeschwindigkeit bestimmen. Eine Anwendung dieses Messprinzips ist die Space Based Laseraltimetrie, also übersetzt Weltraum basierte Laser Höhenmessung. Dabei wird ein LIDAR in einen Satelliten oder eine Sonde eingebaut. Vom LIDAR wird ein Laserlichtpuls auf die Planetenoberfläche gesendet, dort reflektiert und vom LIDAR detektiert. Mit der Formel  $d = \frac{t \cdot c}{2}$ , mit  $d$ =Distanz,  $t$ =Time of Flight und  $c$ =Lichtgeschwindigkeit, lässt sich die Entfernung zwischen dem LIDAR und der Planetenoberfläche bestimmen. Ist zusätzlich die Position des Satelliten bzw. der Sonde bekannt, so lässt sich durch wiederholende Messungen über den ganzen Planeten eine Höhenkartierung der Planetenoberfläche durchführen.

Beispiele für solche LIDARs sind BELA (BEpicolumbo LaserAltimeter) und GALA (GANymed LaserAltimeter). BELA fliegt in einem elliptischen Orbit mit der Höhe 480 km x 1050 km (Thomas 2020: S.5) von der Planetenoberfläche entfernt, hat einen 20 cm Teleskopdurchmesser (Thomas 2020: S.1) und eine Pulsenergie 50 mJ (Thomas 2020: S.1). GALA fliegt mit einer Distanz von 500 km von der Planetenoberfläche entfernt (Hussman et al. 2019, S.382), hat einen 25 cm Teleskopdurchmesser (Hussman et al. 2019, S.382) und eine Pulsenergie 17 mJ (Hussman et al. 2019, S.348). Beide Geräte nutzen zur Detektierung des Lichts eine Avalanche Photo Diode. Diese Dioden benötigen einige Hundert Photonen im zurückkehrenden Licht, um den Puls vom Hintergrund unterscheiden zu können. Eine Single Photon Avalanche Diode ist in der Lage, ein einzelnes Photon zu detektieren. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Systementwurf eines Laseraltimeters für eine Kleinsatellitenmission im niederen Erdorbit mit einer Single Photon Avalanche Diode zu erarbeiten. Dieses Laseraltimeter soll ein möglichst kleines Teleskop besitzen und mit einer Pulsenergie von maximal 1 mJ bei einer Lichtwellenlänge von 1064 nm oder maximal 500  $\mu$ J bei einer Lichtwellenlänge von 532 nm arbeiten.

Dafür werden acht mögliche Umgebungsbedingungen betrachtet. Zum einen bei einer Orbithöhe von 250 km und 500 km über der Planetenoberfläche, zum anderen wird als Planetenoberfläche frisch gefallener Schnee und trockene Erde, also Orte mit hohem und niedrigem Albedo. Und zum Schluss noch ob das Laseraltimeter auf der Tag oder Nachtseite der Erde betrieben wird.

## 2 Laser

Der Laser ist ein Gerät zur Erzeugung von einem nahezu parallelen, monochromatischen, gleichphasigem Lichtstrahl. Er besteht aus drei Elementen: einer externen Energiequelle, einem Verstärkungsmedium und einem Resonator. Die externe Energiequelle versetzt die Elektronen des Verstärkungsmediums in einen angeregten Zustand. Diesen angeregten Zustand werden die Elektronen nach einiger Zeit von selbst verlassen und dabei ein Photon einer bestimmten Wellenlänge abgeben. Wenn das Teilchen, das die Elektronen hält, in angeregtem Zustand von einem Photon getroffen wird, so geht es in den nicht angeregten Zustand zurück und gibt dabei in dieselbe Richtung wie das ankommende Photon ein weiteres Photon mit der bestimmten Wellenlänge ab. Es findet also eine Verstärkung des Lichts statt. Die Aufgabe des Resonators ist es nun, das Licht in Austrittsrichtung wiederholt in das Verstärkungsmedium zu lenken und so Licht in einer bestimmten Richtung zu fokussieren. Von diesem fokussierten Licht wird ein Teil aus dem Laser gelassen, welches den eigentlichen Strahl ausmacht. In diesen folgenden Abschnitten sollen nun drei Laserprinzipien auf ihren Aufbau und das austretende Licht betrachtet werden.

### 2.1 Festkörperlaser

Ein Festkörperlaser ist ein Laser mit einem festen Lasermedium. Sie werden mit einer Blitzlampe oder einem Diodenlaser gepumpt. Die Lichtleistung eines Festkörperlasers kann zwischen ein paar Milliwatt und mehreren Kilowatt liegen. Werden diese Laser mit Q-Switching Technologie ausgestattet, so sind sie in der Lage kurze Pulse im Nanosekunden-Bereich mit mehreren Millijoule Pulsenergie zu erzeugen. Ein häufiger Vertreter der Festkörperlaser ist der Nd:YAG Laser. Dieser Laser sendet Licht der Wellenlänge 1064 nm aus. Mit einem KPT Kristall lässt sich die Wellenlänge des Lichts auf 532 nm halbieren. Bei dieser Umwandlung geht die Hälfte der Pulsenergie verloren.

## 2.2 Diodenlaser

Diodenlaser sind Halbleiterlaser mit einer Stromführenden p-n-Dotierung. Anders als Festkörperlaser werden diese Laser mit Strom gepumpt. Durch den Übergang der Elektronen vom Leitungsband in das Valenzband entsteht ein Photon mit der Energie der Bandbreite. Dieser Übergang kann spontan ablaufen oder durch ein weiteres Photon stimuliert werden. Die Laserdiode kann also kontinuierlich Licht erzeugen, wenn die Stromquelle den Halbleiter mit neuen Elektronen und Löchern versorgt. Die austretende Leistung einer Laserdiode kann zwischen einigen Milliwatt und einem halben Watt liegen. Mehrere Diodenlaser können in einem Stack zusammengeschlossen werden, dies führt jedoch dazu, dass die Strahlqualität des Lasers gesenkt wird.

## 2.3 Mikrochiplaser

Bei Mikrochiplasern handelt es sich um eine spezielle Form eines Festkörperlasers. Hier wird der Resonator direkt an dem Verstärkungsmediums angebracht, dies ermöglicht eine sehr kompakte Bauart des Lasers. Ein Beispiel eines solchen Mikrochip Lasers ist der „PULSELAS-P-1064-100-HE“ (Alphalas ohne Jahr, S.2). Mit einer Pulsenergie von 1 mJ entspricht dieser Laser genau den Anforderungen dieses LIDARs.

## 3 Photodetektoren

Photodetektoren dienen der Messung des Licht. Für LIDARs ist eine hohe Lichtempfindlichkeit, um schwache Lichtmengen messen zu können, und eine hohe zeitliche Auflösung erforderlich, um präzise Distanzmessungen durchzuführen. In diesem Abschnitt werden drei Sensortypen vorgestellt, welche für Weltraum LIDARs eingesetzt werden können.

### 3.1 Avalanche Photo Diode

Die Avalanche Photo Diode (APD) ist eine Halbleiter-Photodiode. Für den Betrieb wird an die APD eine Spannung entgegen der Durchlassrichtung der Diode angelegt. Diese Spannung liegt knapp unterhalb der Durchbruchspannung. Wird nun ein Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband gehoben, z.B. durch ein Photon, so wird das Elektron und das Loch durch das innere elektrische Feld stark beschleunigt. Die Energie der Elektronen reicht aus, um während der Beschleunigung weitere Elektronen-Löcher-Paare zu erschaffen und damit eine Lawine aus Elektronen zu erzeugen. Die Spannung ist jedoch nicht so groß, dass die Löcher ebenfalls neue Elektronen-Löcher-Paare generieren. Das bedeutet, dass die Lawine endet, sobald die Elektronen die Diode verlassen haben. Es lässt sich damit ein linearer Zusammenhang zwischen der Menge an Photonen und dem Stromfluss beobachten.

### 3.2 Single Photo Avalanche Diode

Single Photo Avalanche Dioden (SPAD) funktionieren so ähnlich wie APDs. Der Unterschied besteht darin, dass die Betriebsspannung an den Dioden leicht über der Durchbruchspannung liegt. Nun lösen nicht nur die Elektronen weitere Elektronen-Loch-Paare aus, sondern auch die Löcher. Das bedeutet, sobald ein einzelnes

Elektronen-Loch-Paar entstanden ist, entsteht ein sich erhaltener Stromfluss innerhalb der Diode. Sobald dieser Stromfluss detektiert wird, wird die Spannung unterhalb der Durchbruchspannung runtergefahren. Daraufhin wird der Stromfluss enden, und die Spannung kann wieder über die Durchbruchspannung gefahren werden. So ein Vorgang wird im Folgenden als Event bezeichnet. Die Zeit zwischen dem Auslösen des Stroms und dem Erneuten Erreichen der Betriebsspannung wird Totzeit genannt. Die Totzeit einer SPAD kann sehr unterschiedliche Werte annehmen. Für diese Anwendung ist eine möglichst kurze Totzeit entscheidend. Die kleinste Annahme, die hier getroffen werden kann, ist eine Totzeit von einer Nanosekunde (Severini et al. 2021, S.5).

Ein weiterer wichtiger Parameter für eine SPAD ist die Quanteneffizienz (QE). Die QE ist die Wahrscheinlichkeit eines Photons, ein Elektronen-Loch-Paar zu erschaffen. Diese wird in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Photons angegeben. Im Folgenden wird für die Wellenlänge 532 nm eine QE von 50 % angenommen und für 1064 nm 2 % (exelitas technologie ohne Jahr, S.2). Es gibt zwar auch die SPAD „SPD\_OEM\_NIR\_C“ (Aurea Technology ohne Jahr, S.2) mit einer QE von 35 % für 1064 nm, allerdings ist dies mit einer Totzeit von 100 ns bis 1 ms verbunden, was für die Anwendung nicht genügt.

Die Dark Count Rate einer SPAD ist die Menge an Events, die pro Sekunde gemessen werden, ohne dass Licht auf die Diode fällt. Hier wird sie mit 1000 Events pro Sekunde angenommen, die genaue Menge ist hier jedoch nicht relevant, da die Menge sowieso weit unter der Eventrate des Hintergrundes liegt, wie es in 4.2 gezeigt wird.

### 3.3 Photon Multiplier Tube

Photon Multiplier Tubes (PMT) sind wie die SPADs ebenfalls zum Zählen von Photonen geeignet. Hier soll ein Elektron durch ein Photon aus einer Kathode gelöst werden. Dieses gelöste Elektron soll in einem elektrischen Feld beschleunigt, in dem es beim Zusammenstoß mit Platten weitere Elektronen lösen soll. Damit wird wie in einer APD eine Elektronenlawine ausgelöst. Diese Lawine kann groß genug werden, um einzelne Photonen unterscheiden zu können.

Vergleicht man die Hersteller, so kann man QEs von 30 % im sichtbaren Spektrum finden, für 1064 nm wird die QE im Regelfall nicht mehr angegeben, da sie so

gering ist. Da SPAD zusätzlich robuster als die PMTs sind, finden diese kaum noch Anwendung und werden auch in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.



## 4 Auslegung

In diesem Abschnitt sollen nun die Formeln und Methoden für die Auslegung des Sensors beschrieben werden. Des Weiteren wird ein Modell erarbeitet, welches die Performance des Sensors vorhersagen soll.

### 4.1 Link Budget

Das Link Budget gibt an, wie viel von der ausgesendeten Energie des Pulses nach den Verlusten auf der Strecke vom Satelliten zur Erde und zurück ankommt. Die Formel, die diesen Zusammenhang darstellt, lautet:

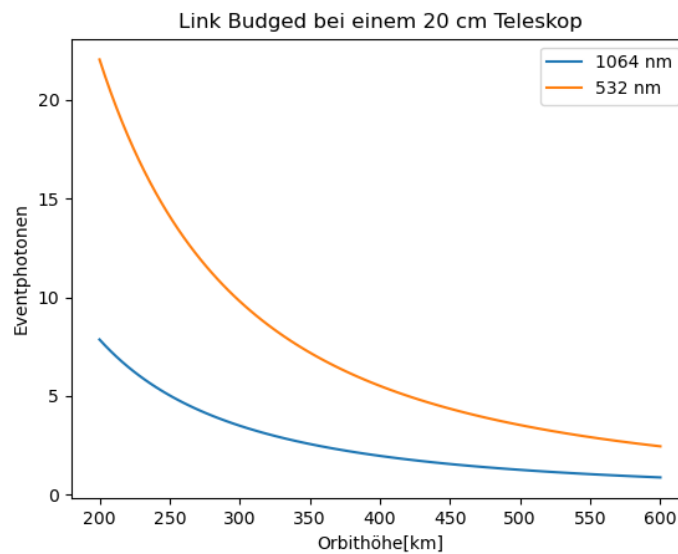
$$E_R = E_T \cdot \xi_T \cdot \xi_R \cdot r \cdot A_R \cdot T_A^2 \cdot \frac{1}{R^2}$$

$E_R$  steht für die empfangene Energie,  $E_T$  steht für die ausgesendete Energie,  $\xi_T$  und  $\xi_R$  stehen für die Verluste des Transmitters und Receivers,  $r$  steht für die Verluste durch die Reflexion an der Oberfläche,  $A_R$  ist die Fläche des Receivers,  $T_A$  steht für die Verluste des Licht, die bei einem Durchlauf durch die Erdatmosphäre entstehen und  $R$  ist der Abstand zwischen dem Raumfahrzeug und der Oberfläche der Erde. Die Oberfläche der Erde wird angenommen als Lambert Strahler. Das heißt, es wird davon ausgegangen, dass die reflektierte Energie in alle Richtungen gleichmäßig ausgestrahlt wird. Das bedeutet  $r = \frac{a}{\pi}$ ,  $a$  steht für den Anteil an Energie, der bei der Interaktion zwischen Licht und Oberfläche reflektiert wird. Dies wird auch Albedo genannt. Bei der Fläche des Receivers handelt es sich um einen Kreis. Das bedeutet  $A_R = \frac{d_T^2}{4} \cdot \pi$ ,  $d_T$  ist der Durchmesser des Teleskops. Da diese Energieform Licht ist, kann die Energie in eine Anzahl von Photonen umgerechnet werden mit  $E_{\text{Licht}} = N_{\text{Photonen}} \cdot h \cdot \lambda$ . Wobei die Anzahl der Photonen noch mit QE multipliziert werden muss, da nicht jedes Photon auch detektiert werden kann. Damit lässt sich die Link Budget Equation umschreiben zu:

$$N_{\text{Photonen}} = \frac{E_T \cdot \xi_T \cdot \xi_R \cdot a \cdot d_T^2 \cdot T_A^2 \cdot QE}{4 \cdot R^2 \cdot h \cdot \lambda}$$

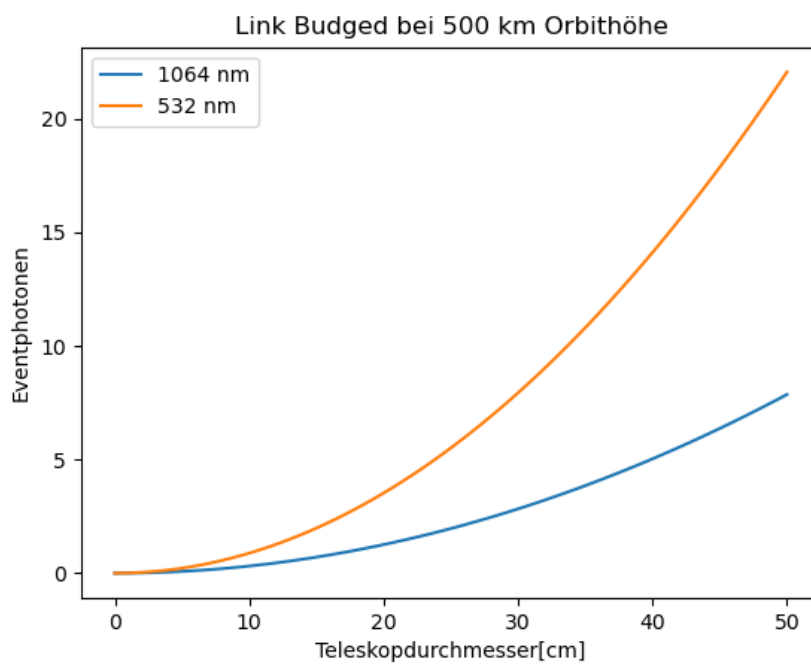
| Untergrund | 1064 nm | 532 nm |
|------------|---------|--------|
| Erde       | 0,4     | 0,2    |
| Schnee     | 0,8     | 0,9    |

**Tabelle 4.1:** Albedo eigene Darstellung nach (Goward 1998, ohne Seite)



**Abbildung 4.1:** Link Budget mit einem 20 cm Teleskop

$\xi_T$  und  $\xi_R$  können mit je 0,9 abgeschätzt werden (Althaus 2023). Für den Albedo werden die Werte aus Tabelle 4.1 angenommen. Die Atmosphärentransmission beträgt für 1064 nm mit 0,95 und 0,9 für 532 nm (Giggenbach und Shrestha 2021, S.3). Bei  $h$  handelt es sich um das Plancksche Wirkungsquantum, einer Naturkonstanten mit dem Wert  $6,626 \cdot 10^{-34} Js$ . Nun kann in Abhängigkeit von der Orbithöhe und dem Teleskop-Durchmesser die Anzahl der empfangenen Photonen berechnet werden. Dies wurde in den Abbildungen 4.1 und 4.2 für trockene Erde durchgeführt.



**Abbildung 4.2:** Link Budget auf einem 500 km Orbit

## 4.2 Hintergrundlicht

Hintergrundlicht ist das Licht, das von der Sonne auf die Erde fällt, von dort reflektiert wird und dann vom Teleskop aufgefangen wird. Die solare Strahlung  $\hat{E}_{\lambda=1064nm}$  bei 1064 nm Wellenlänge beträgt  $0,642 \frac{W}{m^2nm}$  und  $1,773 \frac{W}{m^2nm}$  bei 532 nm (NREL 1985). Wenn ein Bandpassfilter mit einer Bandbreite von 0,2 nm um die Wellenlänge 1064 nm angenommen (Althaus 2023) wird, so ergibt das eine Leistung von  $E_{\lambda} = 0,1284 \frac{W}{m^2}$ . Dieser Bandpassfilter lässt sich bei gleichem Aufwand der Bandpassfilter auf 0,1 nm reduzieren (Althaus 2023), was zu einer Hintergrundleistung von  $E_{\lambda} = 0,1773 \frac{W}{m^2}$  führt.

Die Hintergrundleistung, die am Teleskop ankommt, lässt sich berechnen mit (Althaus 2023):

$$L_g = \frac{a \cdot E_{\lambda}}{\pi}$$

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta))$$

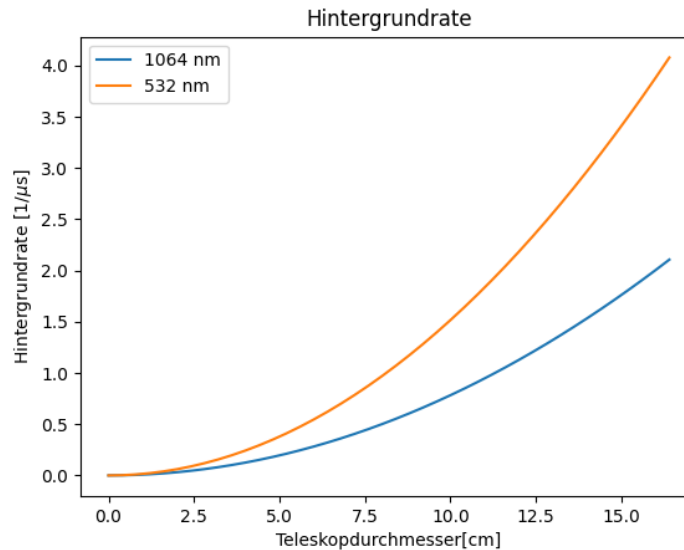
$$W_T = \Omega \frac{\pi}{4} d_A^2 L_g T_A^2 \xi_T$$

$\theta$  ist hier der FoV half cone angle. Dieser wird mit ungefähr 141  $\mu\text{rad}$  für 1064 nm und 71  $\mu\text{rad}$  für 532 nm angenommen (Althaus 2023). Diese Zahl setzt sich so zusammen. Es wird angenommen, dass der Laser eine Divergenz von 100  $\mu\text{rad}$  besitzt. Um mit ausreichender Sicherheit das gesamte Laserlicht beobachten zu können, soll noch ein Sicherheitsfaktor von  $\sqrt{2}$  mitberechnet werden. Damit sollen Ungenauigkeiten in der Strahlausrichtung und der Drehung des Satelliten berücksichtigt werden, dies ist ein empirischer Wert. Für die Wellenlänge 532 nm kann der Laser bei gleichem Aufwand die Divergenz auf die Hälfte von 1064 nm reduziert werden.

Mit dieser Formel und der Formel zur Umrechnung von Energie in detektierte Photonen aus Abschnitt 4.1 lässt sich nun eine Rate an Hintergrundevents ausrechnen. Diese ist in Abbildung 4.3 für den Flug über trockener Erde dargestellt. Es werden also mehr Hintergrundphotonen in der Wellenlänge 532 nm auftreten.

## 4.3 Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion (WKD)

Bei Laseraltimetern mit analogen Photodetektoren, wie einer Avalanche Photo Diode, wurde gerne für die Unterscheidung des eigentlichen Signals vom Hintergrund



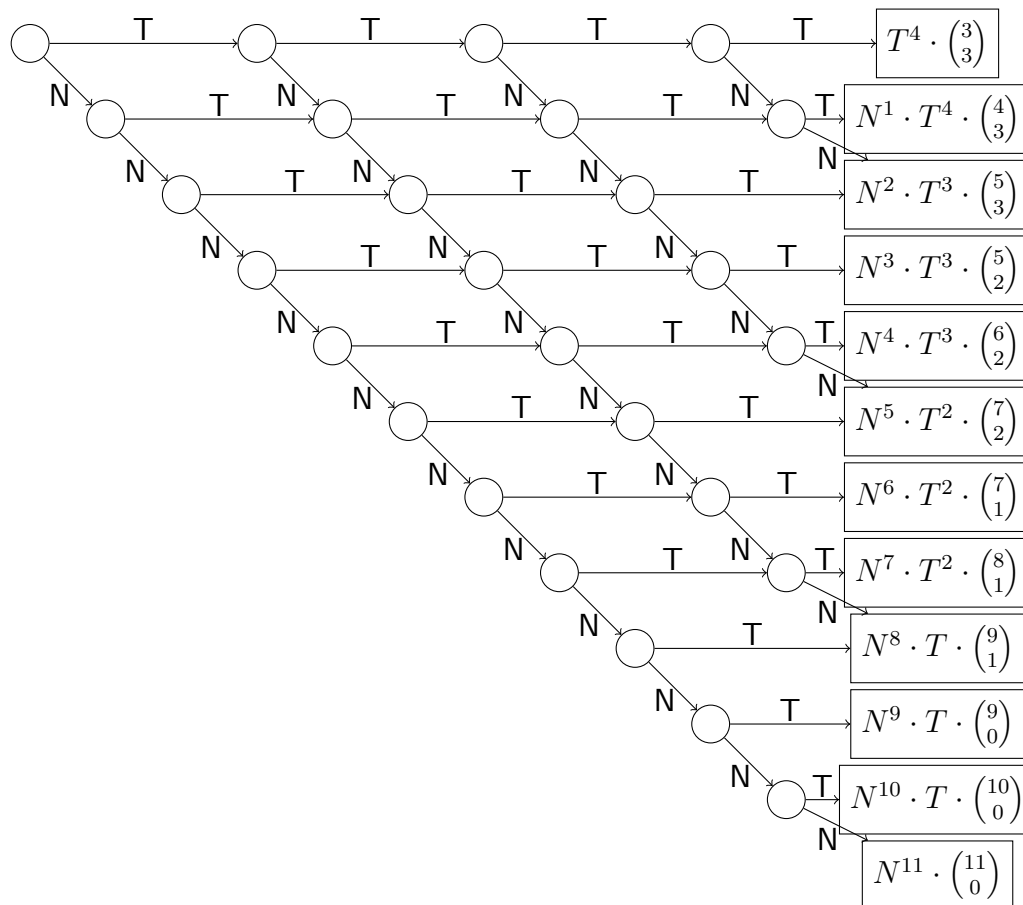
**Abbildung 4.3:** Hintergrundrate über Erde

das Signal- zum Rausch-Verhältnis angegeben. Dieses Verhältnis sagt jedoch im Fall einer Single Photon Diode wenig aus. Wenn Beispielsweise ein 10 ns Puls betrachtet wird bei einer Totzeit der Diode von 10 ns, so ist es ausgeschlossen, mehr als 1 Photon zu detektieren, egal wie viel Energie in dem Puls enthalten ist. Weiterhin lässt sich ein Puls mit einer Chance von 50 % ein Signalphoton zu detektieren bei einer Chance von 0.0000005 % eines Hintergrundphotons schlechter detektieren als ein Puls mit einer Hohen Chance von 5 Signalphotonen bei einer Chance von 50 % auf ein Hintergrundphoton, obwohl dies nach dem Signal-zum Rausch-Verhältnis besser wäre. In diesem Abschnitt soll nun ein neues Modell erarbeitet werden zur Vorhersage einer erfolgreichen Detektion. Dafür soll als Kriterium für eine erfolgreiche Detektion innerhalb des Pulses vom zurückkehrenden Licht mehr Events auftreten als innerhalb eines realistischen Zeitfensters, in dem wir annehmen, dass der Puls zurückkehrt. Die Dauer dieses Zeitfensters wird mit  $6 \mu\text{s}$  angenommen (Althaus 2023). Dafür sollen im folgenden die Wahrscheinlichkeiten berechnet werden für die Menge an Events im Signal und im Hintergrund.

### 4.3.1 Rechteckpuls

In diesem Abschnitt soll nun eine Methode vorgestellt werden, mit der berechnet wird mit welcher Wahrscheinlichkeit wie viele Photonen innerhalb einer bestimmten Zeit detektiert werden können. Aus der Link Budget Equation lässt sich ein Erwartungswert berechnen. Nun könnte man daran denken, eine Poisson Verteilung zu verwenden. Diese Verteilung berücksichtigt jedoch nicht die Totzeit des Sensors. So gibt diese Verteilung auch Chancen für eine Treffer-Anzahl an, die wegen dem Verhältnis aus Pulslänge und Totzeit nicht mehr möglich sind. Allerdings gibt die Poissonverteilung für den Fall, dass gar kein Photon detektiert wird  $p_{\text{Signal}=0} = e^{-E(\text{Signal})}$ , die korrekte Wahrscheinlichkeit an mit  $E$  als den Erwartungswert an detektierten Photonen innerhalb eines Zeitraums. Der Grund dafür ist, dass es nur in diesem Szenario keine Totzeit zu berücksichtigen gibt. Damit lässt sich außerdem die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens ein Photon  $p_{t \geq 0}$  detektiert wird, berechnen mit  $p_{\text{Signal} \geq 0} = 1 - p_{\text{Signal}=0}$ . Dies gilt auch für Zeiträume  $dt$ , für die gilt  $dt \ll t_{\text{tot}}$ . Allerdings besteht auch die Möglichkeit, dass in der Zeit ein Hintergrundphoton oder ein Dark Count stattfindet. Demnach beträgt die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Events in einem kurzen Schritt  $p_{E \geq 0} = 1 - (p_{\text{Signal}=0} \cdot p_{\text{Hinter}=0} \cdot p_{\text{Dark}=0})$

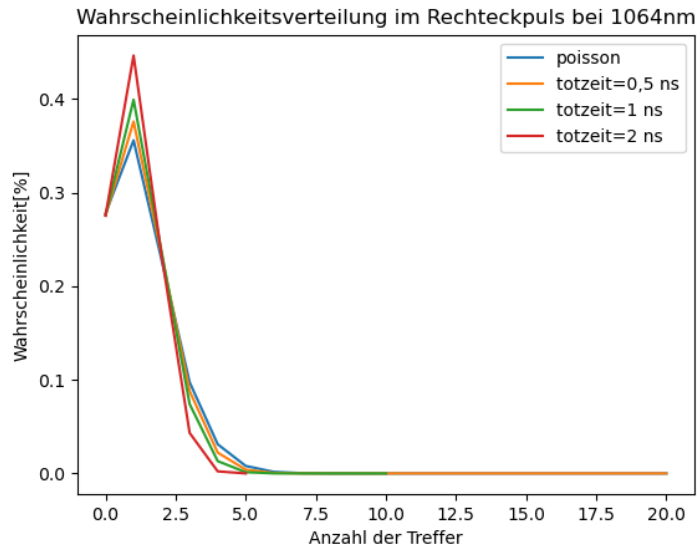
Die Wahrscheinlichkeit eines Treffers innerhalb eines sehr kleinen Zeitschritts ermöglicht nun einen numerischen Ansatz. Bei diesem soll nun der Puls in diesen sehr kleinen Schritten untersucht werden. Beim ersten Schritt gibt es nur die Möglichkeiten Treffer und nicht Treffer. Im Fall von nicht Treffer wird zum nächsten Schritt gegangen und wieder Treffer oder nicht Treffer betrachtet. Im Fall von Treffer kann für eine bestimmte Anzahl von Schritten kein weiterer Treffer detektiert werden. Die Anzahl der Schritte soll der Länge von  $t_{\text{tot}}$  entsprechen. Wenn man annimmt, dass die Lichtleistung über die Zeit konstant bleibt, lässt sich mit diesem Verfahren nun ein Baumdiagramm zeichnen, welches sämtliche Möglichkeiten an Treffern angibt, die innerhalb eines Pulses auftreten können. So ein Baumdiagramm ist in Abbildung 4.4 dargestellt. T steht für die Wahrscheinlichkeit eines Treffers und N für die Wahrscheinlichkeit keines Treffers. Auf der rechten Seite steht eine Formel für die Wahrscheinlichkeit sämtlicher Pfade, die genau dieses Ergebnis erreichen. Die Anzahl an T und N ergibt sich aus der Summe dieser, die auf dem Pfad zusammenkommen. Die Anzahl der Pfade, die zu einem Ergebnis führen, ergibt sich aus der Summe aus T und N, bzw. T und N minus eins für den



**Abbildung 4.4:** Baumdiagramm des Rechteckpulses

Fall, dass das letzte T feststeht, über der Anzahl von T oder N. In der Abbildung 4.4 wurde T gewählt.

In den Abbildungen 4.5 und 4.6 wird diese Verteilung für verschiedene Totzeiten und die Poissonverteilung, welche bei einer Totzeit von 0 s entstehen würde, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass, je kürzer die Totzeit ist, umso mehr wird sich der Poissonverteilung angenähert, bei der die Chancen auf viele Events am besten sind. Dies beweist, dass eine möglichst kurze Totzeit von Vorteil ist. Weiterhin ist zu sehen, dass die Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Totzeiten geringer werden, wenn die Chance eines Events geringer wird. Dies lässt sich dadurch er-



**Abbildung 4.5:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der Events innerhalb eines Pulses mit der Wellenlänge 1064 nm

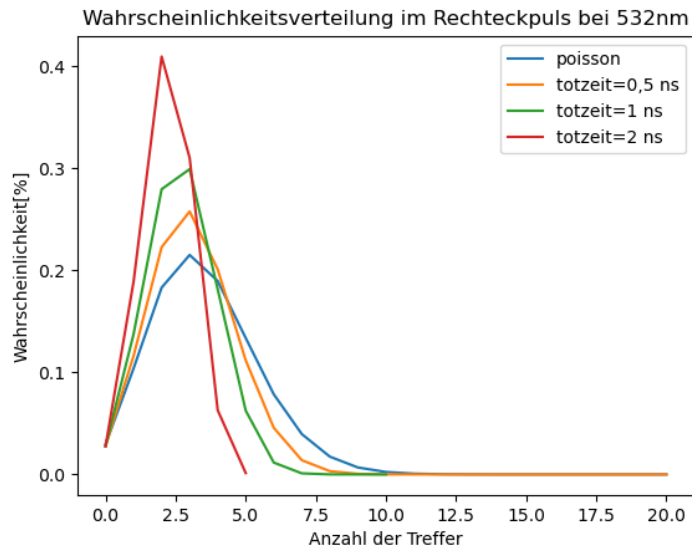
klären, dass die gesamte Energie, die während der Totzeit des Sensors den Sensor erreicht, nicht detektiert werden kann und damit verschwendet wird.

### 4.3.2 Gaußpuls

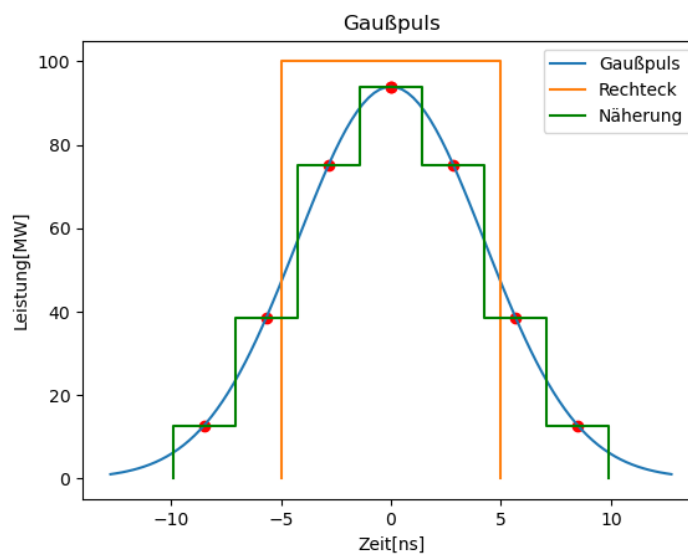
Das Modell des Rechteckpulses funktioniert, wenn die Leistung eines Pulses über die Zeit konstant bleibt. In der Realität nähert sich der Puls eines Lasers jedoch einer Gaußschen Glockenkurve an. Dies ist für einen 1 mJ Puls mit 10 ns Halbwertsbreite in Abbildung 4.7 dargestellt. Um das Modell des Rechteckpulses anwenden zu können, wurde die Halbwertsbreite als Pulsbreite angenommen und die Leistung so angepasst werden, dass der Puls eine bestimmte Pulsenergie hat. Dieses Modell wurde in Abschnitt 4.3.1 angewandt.

Um der realen Gaußkurve näher zu kommen, wurde ein Modell gewählt, bei dem auf der Kurve sieben Entwicklungspunkte in gleichen Abständen gewählt werden. Die Punkte am Rand entsprechen den Punkten von  $\pm 2\sigma$ . Nun wird die Leistung bei jedem Zeitschritt als die Leistung angenommen, die ihrem jeweiligen Entwick-



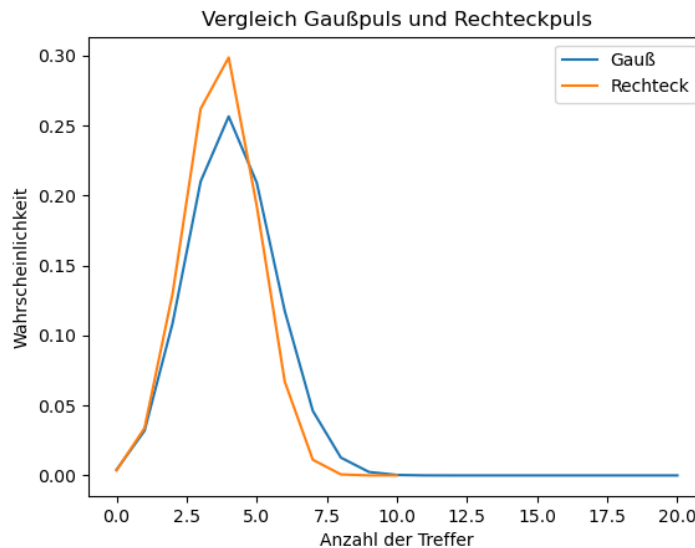


**Abbildung 4.6:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der Events innerhalb eines Pulses mit der Wellenlänge 532 nm



**Abbildung 4.7:** Zeitlicher Verlauf eines Pulses





**Abbildung 4.9:** Vergleich eines Gaußpulses und Rechteckpulses

lungspunkt am nächsten liegt. Nun kann jeder der sieben Stufen als ein individueller Rechteckpuls betrachtet werden. Um nun die Wahrscheinlichkeit für den ganzen Puls zu berechnen, müssen die Wahrscheinlichkeiten der Stufen kombiniert werden. Wie diese Stufen kombiniert werden, wird in Abbildung 4.8 angedeutet. Die rote Linie stellt das Ende der vorherigen Stufe dar bzw. den Beginn der neuen Stufe. Die Pfeile, die die rote Linie übertreten, sind demnach die Ausgänge der vorherigen Stufe. Deren Berechnung wurde im vorherigen Abschnitt erklärt. Nach jedem Ausgang der vorherigen Stufe wird ein neues Baumdiagramm mit den neuen Trefferwahrscheinlichkeiten der jetzigen Stufe gebildet. Dabei muss darauf geachtet werden, dass, wenn von der vorherigen Stufe noch Totzeit übrig bleibt, sich die Anzahl der Schritte dieser Stufe reduziert. Jeder mögliche Ausgang des vorherigen Baumdiagramms wird mit sämtlichen Ausgängen des folgenden Baumes multipliziert, und danach werden die Pfade mit gleich vielen Treffern miteinander addiert. Auf diese Weise können zwei Stufen zu einer kombiniert werden. Dieser Vorgang muss nun nur noch mit den neu entstehenden Bäumen und den verbleibenden Stufen wiederholt werden.

In Abbildung 4.9 wird die Verteilung des Rechteckpulses mit dem Modell des Gaußpulses verglichen. Hier fällt auf, dass die Verteilungen zwar ähnlich sind, aber

es dennoch Unterschiede gibt. Zum einen ist die Chance auf mehr Events in dem Gaußpuls höher als in dem Rechteckpuls, aber dafür ist auch die Dauer des Pulses ungefähr doppelt so lang ist.

### 4.3.3 Trefferchance

In diesem Abschnitt wird nun ein Modell vorgestellt, welches vorhersagen soll, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich die Hintergrundphotonen über das Zeitfenster so verteilt werden, dass mehr Events innerhalb des Pulses stattfinden als außerhalb. Dieses Modell ist mathematisch nicht exakt; es hat allerdings in den Simulationen, die in Abschnitt 4.4 erklärt werden, gute Vorhersagen über das Verhalten des Sensors gezeigt.

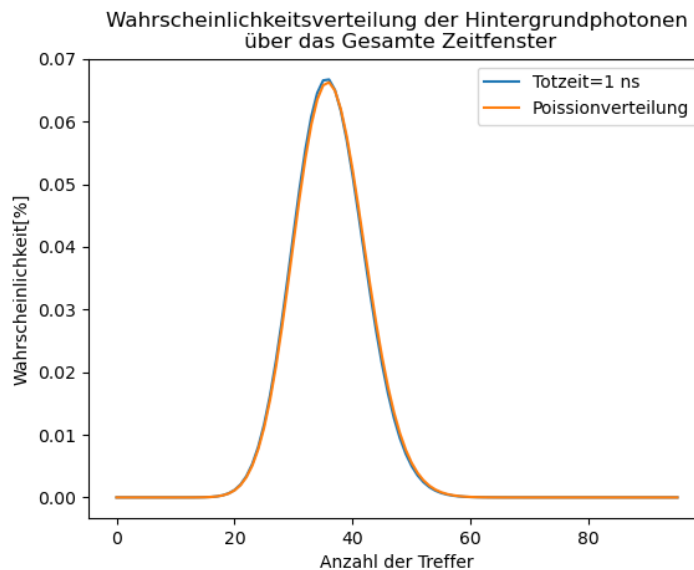
Für das Modell sollen sämtliche Szenarien addiert werden, in denen innerhalb des Pulses mehr Events auftreten als irgendwo im Hintergrund innerhalb einer gleich großen Zeitspanne. Dafür wird die Wahrscheinlichkeit benötigt, wie viele Photonen über das gesamte Zeitfenster verteilt werden können. Dafür wird das Modell des Rechteckpulses über das gesamte Zeitfenster gebraucht. Dies ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Diese Verteilung entsteht bei der Wellenlänge 532 nm, einem 20 cm Teleskop, welches über Erde fliegt. Hier ist der Unterschied zwischen einer Nanosekunde Totzeit und der Poissonverteilung so gering, dass man kaum noch einen Unterschied bemerkt. Im Scheitelpunkt beträgt der Unterschied noch 0,04 %. Die Möglichkeiten, in denen mehr Signalevents  $i$  auftreten als Hintergrundevents  $j$  im gesamten Hintergrund, sind jeweils eine Möglichkeit.

$$p_{\text{Möglichkeit}}(i, j) = p_{\text{Signal}}(i) \cdot p_{\text{Hintergrund}}(j) \quad (\text{Für } i > j)$$

Die Szenarien, bei denen mehr oder gleich viele Treffer im Hintergrund auftreten, sind jedoch nicht alle vom Hintergrund nicht zu unterscheiden. Hier muss die Verteilung über das Zeitfenster betrachtet werden, da, falls die Events weit genug voneinander entfernt sind, das Signal vom Hintergrund unterschieden werden kann. Es muss für  $i \leq j$  also noch eine Szenariowahrscheinlichkeit betrachtet werden:

$$p_{\text{Möglichkeit}}(i, j) = p_{\text{Signal}}(i) \cdot p_{\text{Hintergrund}}(j) \cdot p_{\text{Szenario}}(i, j) \quad (\text{Für } i \leq j)$$

Die Szenariowahrscheinlichkeit wird immer für ein spezielles  $i$  und  $j$  berechnet. Es ist also immer bekannt wie viele Hintergrundevents verteilt werden müssen und wie viele davon wie nahe maximal beieinander liegen dürfen. In Abbildung

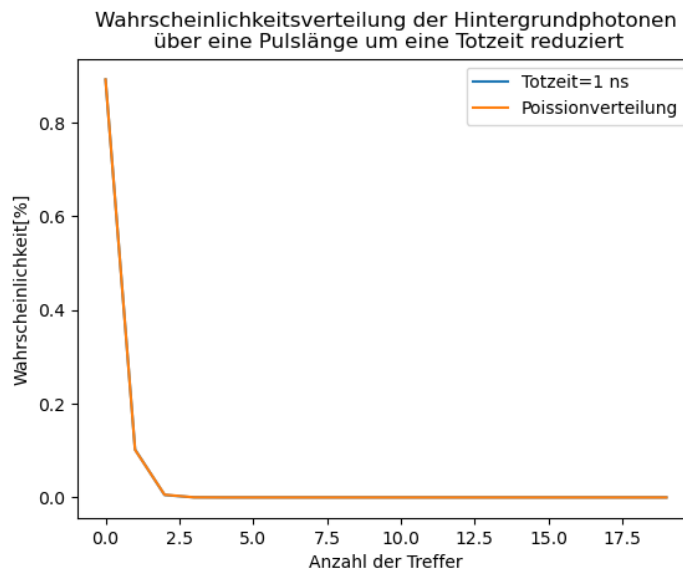


**Abbildung 4.10:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der Hintergrundphotonen über das gesamte Zeitfenster

4.12 wird eine Beispielerverteilung für 6 Hintergrundphotonen gezeigt, wobei immer nur maximal 3 nahe beieinander liegen dürfen. Die Graphik ist von links nach rechts zu lesen. Das T oben links steht für das erste Hintergrundevent. Dieses wird irgendwann mit Sicherheit eintreten  $p_T = 1$ . Hinter diesem ersten Event werden nun die Wahrscheinlichkeiten, wie viele Hintergrundevents seit Beginn des ersten Hintergrundevents auftreten können, aber noch innerhalb einer Pulslänge bleiben. Wie groß diese Wahrscheinlichkeiten bei der Wellenlänge 532 nm, einem 20 cm Teleskop, welches über trockener Erde fliegt, werden, wird in Abbildung 4.11 dargestellt. Es können einige Events in der Zeit stattfinden, allerdings kann das Signal vom Hintergrund nur unterschieden werden, wenn in der Zeit nur drei oder weniger Events stattgefunden haben. Deshalb werden nur die Pfade für 0, 1 und 2 Events für die Szenariowahrscheinlichkeit addiert.

$$p_{\text{Szenario}}(3, j) = p_{T=0} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-1) + p_{T=1} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-2) + p_{T=2} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-3)$$

Je nach Anzahl, wie viele Events in dieser Pulslänge stattfanden, müssen nun unterschiedlich viele Events verteilt werden. In dem beschriebenen Fall können für den Fall, dass drei Events bereits stattfanden, nur noch maximal drei weitere Events



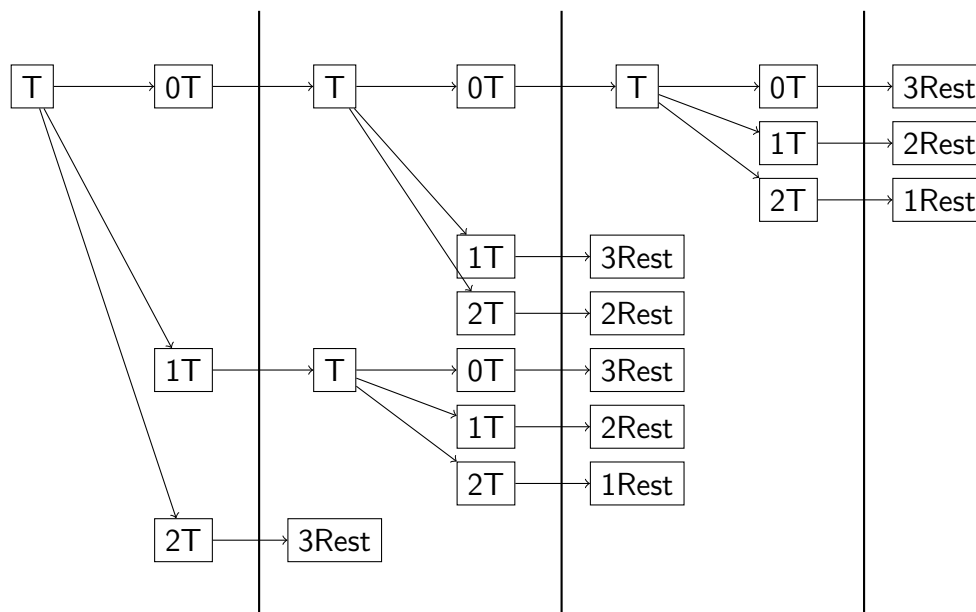
**Abbildung 4.11:** Wahrscheinlichkeitsverteilung der Hintergrundphotonen über eine Pulslänge um eine Totzeit reduziert

stattfinden. Wie diese verteilt sind, ist dann irrelevant, da sie zusammen nicht mehr genug sind, um mehr Events zu bilden als das eigentliche Signal, das heißt  $p_{\text{Szenario}}(3, j-3) = 1$ . In dem Fall, dass nur ein Event während der Pulsdauer stattfand, müssen noch 5 Events verteilt werden. Es wird angenommen, dass zwischen dem letzten Event des vorherigen Pulses und dem nächsten Event ein ausreichend großer Abstand liegt. Dieser Abstand wird durch die schwarze senkrechte Linie dargestellt. Sobald dieses nächste Event stattgefunden hat, müssen wieder die Szenarien betrachtet werden, in denen weniger Events als im Signal stattgefunden haben.

$$p_{\text{Szenario}}(3, j-1) = p_{T=0} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-2) + p_{T=1} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-3) + p_{T=2} \cdot p_{\text{Szenario}}(3, j-4)$$

Dieses Prozedere wird für jeden Pfad wiederholt bis sämtliche akzeptablen Möglichkeiten erfasst wurden. Dann ist die Gesamtwahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion die Summe aller Möglichkeiten:

$$p_{\text{ges}} = \sum^{i,j} p_{\text{Möglichkeiten}}(i, j)$$

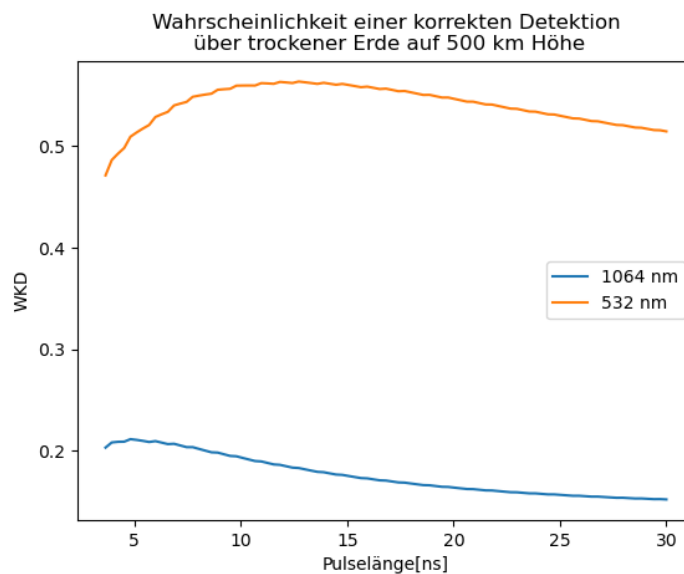


**Abbildung 4.12:** Verteilung von 6 Hintergrundevents bei 4 Signalevents

Nun ist es möglich, in Abhängigkeit der Parameter die WKD vorherzusagen. In Abbildung 4.13 wird in Abhängigkeit von der Pulslänge diese Wahrscheinlichkeit angegeben.

#### 4.4 Messgenauigkeit

Es ist keine analytische Methode bekannt, welche eine Aussage darüber trifft, wie genau der Sensor die Entfernung messen kann. Um dennoch eine Aussage über die Genauigkeit des Sensors treffen zu können, sollen numerische Simulationen durchgeführt werden. Dafür wird ein Zeitfenster von  $6 \mu\text{s}$  angenommen, dieses wieder in kleine Zeitschritte unterteilt und für jeden Schritt die Wahrscheinlichkeit berechnet, dass zu diesem Zeitpunkt ein Photon detektiert wird. In einem zufälligen Zeitabschnitt wird dabei die Wahrscheinlichkeit nach dem Modell des Gaußpulses erhöht, um das zurückkehrende Signal zu simulieren. Wenn nun bei jedem Schritt zufällig bestimmt wird, ob ein Photon detektiert wird, so kann nach einem Puls innerhalb dieser Simulation gesucht werden. Von dieser Simulation können nun ei-

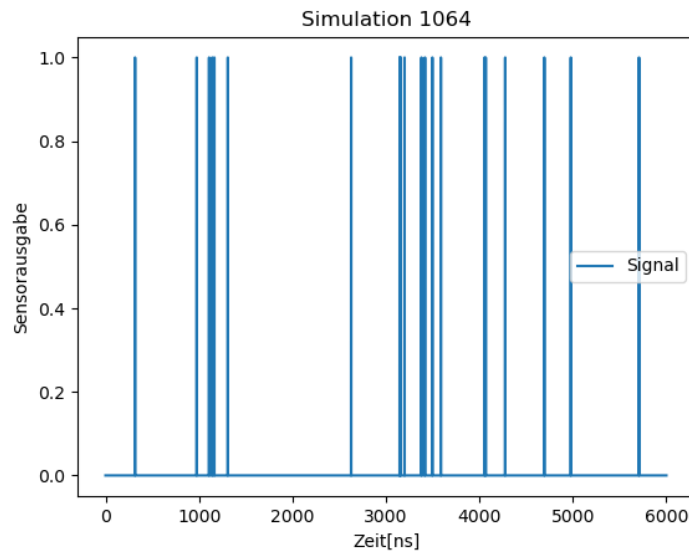


**Abbildung 4.13:** Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Detektion

ne große Anzahl durchgeführt werden, um einen mittleren Abstand von dem realen Puls ermitteln zu können. Die Anzahl pro Szenario beträgt 5000. Dabei besteht die Möglichkeit, dass der Puls korrekt vom Hintergrund unterschieden werden kann, die Möglichkeit, dass es innerhalb des Zeitfensters mehrere Abschnitte gibt, in denen gleich viele Photonen detektiert wurden und dass der Puls falsch detektiert wurde. Falls mehrere Abschnitte existieren mit gleicher Photonenanzahl, so wird diese Messung nicht weiter betrachtet, da das Signal nicht vom Rauschen unterschieden werden kann, aber erkennbar ist, dass der Messversuch gescheitert ist. Wenn es einen Abschnitt gibt, in dem mehr Photonen detektiert wurden als in allen anderen, so wird von diesem der Abstand zum realen Puls gemessen. Dabei sollen zwei verschiedene Abstände gemessen werden; einer bei dem nur die korrekt gemessenen Pulsen erfasst werden und einer, in den auch die falsch gemessenen Pulse mit eingehen. Auf diese Weise soll gemessen werden, wie stark die Genauigkeit verbessert werden kann, wenn man eine Filterung falscher Pulse durchführt, z.B. mit einer Kamera, durch welche reale starke Höenschwankungen erkannt werden könnten.

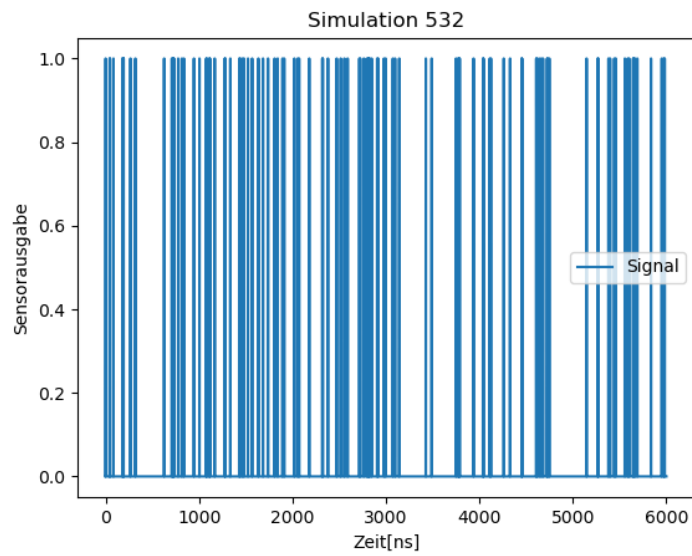
In Abbildung 4.14 und 4.15 werden je eine Simulation für 1064 nm und 532 nm gezeigt, sowie ein Ausschnitt der Zeit, in der der Puls ankam in Abbildung 4.16 und



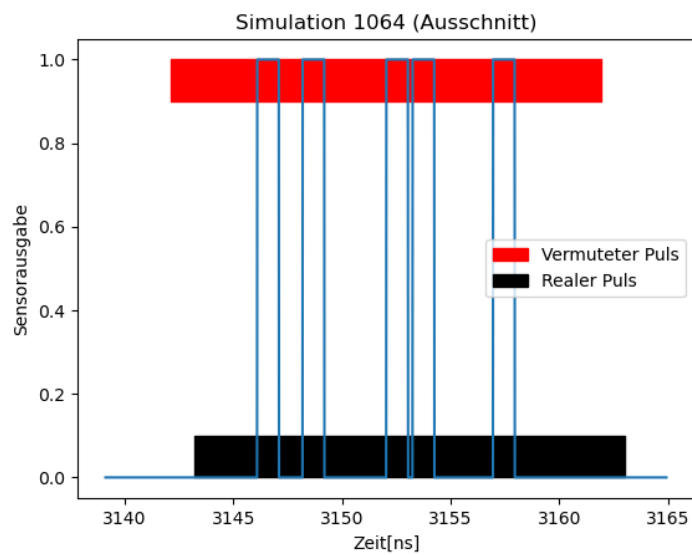


**Abbildung 4.14:** Simulation mit der Wellenlänge 1064

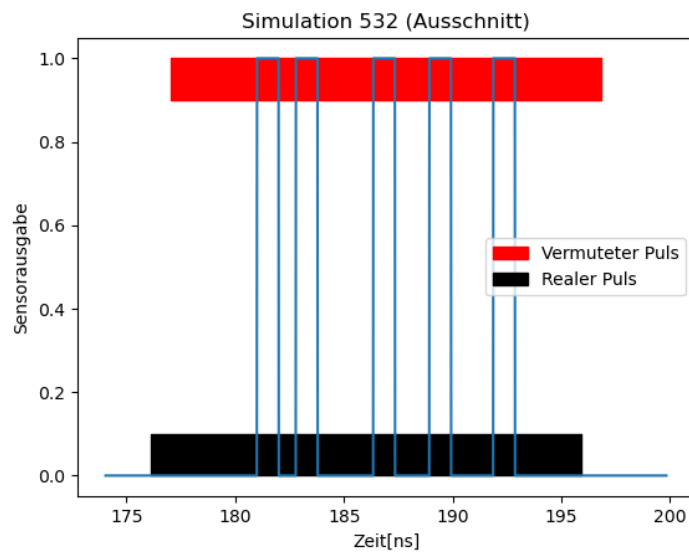
4.17. In den Abbildungen wird die Zeit, in der der Sensor sich in der Totzeit befindet, auf 1 gesetzt und 0 während er auf ein Photon wartet. In den Ausschnitten ist die Zeit, in der der reale Puls stattfand, schwarz markiert und rot, wo der Puls vermutet wird. Bei dem Szenario in den Simulationen wurde eine Orbithöhe von 500 km, der Albedo von frisch gefallen Schnee und ein 15 cm Teleskop gewählt.



**Abbildung 4.15:** Simulation mit der Wellenlänge 532



**Abbildung 4.16:** Ausschnitt des Pulses von Abbildung 4.14



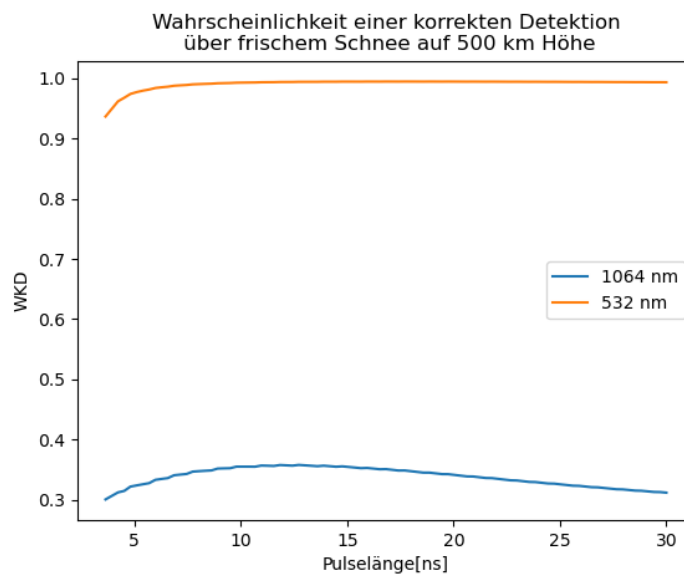
**Abbildung 4.17:** Ausschnitt des Pulses von Abbildung 4.15

## 5 Auswertung

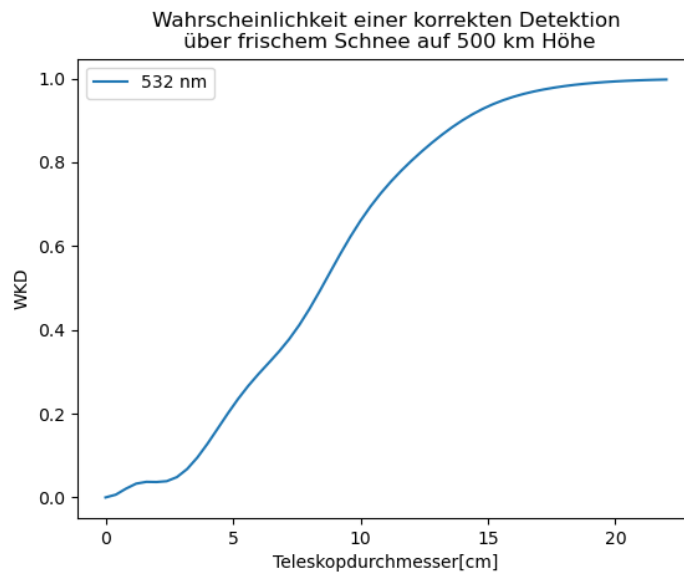
In diesem Abschnitt sollen nun die in Abschnitt 4 gewonnenen Methoden angewendet werden, um die Parameter für ein funktionierendes Laseraltimeter zu bestimmen.

### 5.1 Wahl der Wellenlänge

In der Abbildung 5.1 wird die WKD beim Flug über frischem Schnee auf 500 km Höhe mit einem 20 cm Teleskop dargestellt. In Abbildung 4.13 wurde dies ebenfalls bereits angewandt, allerdings beim Flug über trockener Erde. In beiden Diagrammen ist zu erkennen, dass die Wellenlänge 532 nm der 1064 nm überlegen ist.



**Abbildung 5.1:** Blick auf Schnee auf 500 km Höhe in Abhängigkeit der Pulslänge



**Abbildung 5.2:** Blick auf Schnee auf 500 km Höhe in Abhängigkeit des Teleskops

Dieses Diagramm kann man auch mit anderen Szenarien wie anderen Teleskopgrößen und anderen Orbithöhen erstellen. Dabei ist zu erkennen, dass in jedem Szenario die Wellenlänge 532 nm der anderen überlegen ist. Darum wird für die weiteren Rechnungen nur noch die Wellenlänge 532 nm betrachtet.

## 5.2 Wahl des Teleskops

In Abbildung 5.2 wird die WKD in Abhängigkeit des Teleskopdurchmessers angegeben. Nun kann ein Schwellwert definiert werden, wie groß die WKD sein soll. Es soll nun ein Schwellwert von 95 % angenommen werden. Für vier Szenarien wurde in Tabelle 5.1 der erforderliche Teleskopdurchmesser ermittelt, wenn die Pulslänge 10 ns beträgt. In Tabelle 5.2 werden die Ergebnisse von je 5000 numerischen Simulationen aus Abschnitt 4.4 gezeigt, welche mit den jeweiligen Teleskopen und den Pulslängen 5 ns, 10 ns und 20 ns durchgeführt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die in Abschnitt 4.3 beschriebene Methode zur Vorhersage der WKD gut funktioniert. Des Weiteren ist zu sehen, dass der Unterschied zwischen den gefilterten und ungefilterten Ergebnissen sehr groß ist. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass

| Tag    | Schnee  | Erde    |
|--------|---------|---------|
| 500 km | 15,7 cm | 35 cm   |
| 250 km | 6,3 cm  | 13,9 cm |

**Tabelle 5.1:** erforderlicher Teleskopdurchmesser bei Tag

| Untergrund | Orbithöhe | Pulslänge | Korrekt Detektiert | wissend Falsch | unwissend Falsch | Korrekt Detektiert[%] | Berechnete WKD[%] | Genauigkeit ohne Filter[m] | Genauigkeit mit Filter[m] |
|------------|-----------|-----------|--------------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| Schnee     | 500 km    | 5 ns      | 4579               | 380            | 41               | 91,6                  | 90,9              | 2,16                       | 0,13                      |
|            |           | 10 ns     | 4780               | 184            | 36               | 95,6                  | 95,0              | 2,69                       | 0,26                      |
|            |           | 20 ns     | 4775               | 161            | 59               | 95,5                  | 95,1              | 4,68                       | 0,60                      |
|            | 250 km    | 5 ns      | 4647               | 320            | 33               | 92,9                  | 93,9              | 2,46                       | 0,13                      |
|            |           | 10 ns     | 4759               | 205            | 36               | 95,1                  | 95,4              | 2,99                       | 0,25                      |
|            |           | 20 ns     | 4797               | 173            | 30               | 95,9                  | 95,4              | 2,21                       | 0,51                      |
| Erde       | 500 km    | 5 ns      | 4601               | 353            | 46               | 92,0                  | 90,9              | 3,11                       | 0,13                      |
|            |           | 10 ns     | 4754               | 201            | 45               | 95,1                  | 95,1              | 2,79                       | 0,27                      |
|            |           | 20 ns     | 4800               | 157            | 43               | 96,0                  | 95,1              | 3,28                       | 0,27                      |
|            | 250 km    | 5 ns      | 4663               | 303            | 34               | 93,3                  | 93,7              | 2,49                       | 0,12                      |
|            |           | 10 ns     | 4723               | 232            | 45               | 94,5                  | 95,1              | 2,90                       | 0,24                      |
|            |           | 20 ns     | 4773               | 189            | 38               | 95,5                  | 95,1              | 3,13                       | 0,52                      |

**Tabelle 5.2:** Simulationsergebnisse bei Tag

bei der Auslegung auf eine Kamera oder irgendeiner anderen Version zur Unterscheidung von falschen Ergebnissen nicht verzichtet werden darf oder eine höhere Schwelle als 95 % gewählt werden muss. Unterschiede zwischen den Pulsängen sind in den ungefilterten Ergebnissen nicht zu erkennen, es lässt sich jedoch eine höhere Genauigkeit in den gefilterten Ergebnissen beobachten. Es ist daher für eine bessere Genauigkeit zu empfehlen, die Pulslänge nur so lang wie nötig zu halten, um eine ausreichend hohe WKD zu haben.

---

| Nacht  | Schnee | Erde    |
|--------|--------|---------|
| 500 km | 8,4 cm | 18,7 cm |
| 250 km | 4,2 cm | 9,4 cm  |

**Tabelle 5.3:** geforderter Teleskopdurchmesser bei Nacht

### 5.3 Betrieb im Schatten der Erde

Eine weitere Möglichkeit für den Betrieb des Laseraltimeters ist es, ihn ausschließlich in der Schattenphase seiner Umlaufbahn zu verwenden. Das Hintergrundlicht wird nun im Worst Case durch den Vollmond verursacht, dies kann als ein 100000stel des Sonnenlichts abgeschätzt werden (Althaus 2023). Wird nun der geforderte Teleskopdurchmesser erneut berechnet, so ergeben sich die Werte aus Tabelle 5.3. In Tabelle 5.4 sind die Ergebnisse der selben Simulation wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, aber unter Nacht-Bedingungen und für die Nacht ausgelegten Teleskopen. Anders als am Tag fand in der Nacht keine unwissende falsche Detektion statt. Das heißt, dass in diesem Szenario eine Filterung überflüssig ist. Die restlichen Erkenntnisse sind mit denen aus Tabelle 5.2 vergleichbar.

| Untergrund | Orbithöhe | Pulslänge | Korrekt Detektiert | wissend Falsch | unwissend Falsch | Korrekt Detektiert[%] | Berechnete WKD[%] | Genauigkeit ohne Filter[m] | Genauigkeit mit Filter[m] |
|------------|-----------|-----------|--------------------|----------------|------------------|-----------------------|-------------------|----------------------------|---------------------------|
| Schnee     | 500 km    | 5 ns      | 4759               | 241            | 0                | 95,2                  | 95,0              | 0,17                       | 0,17                      |
|            |           | 10 ns     | 4723               | 277            | 0                | 94,5                  | 95,0              | 0,31                       | 0,31                      |
|            |           | 20 ns     | 4737               | 263            | 0                | 95,2                  | 95,0              | 0,63                       | 0,63                      |
|            | 250 km    | 5 ns      | 4718               | 282            | 0                | 94,4                  | 95,1              | 0,17                       | 0,17                      |
|            |           | 10 ns     | 4764               | 236            | 0                | 95,3                  | 95,1              | 0,33                       | 0,33                      |
|            |           | 20 ns     | 4774               | 226            | 0                | 95,5                  | 95,1              | 0,64                       | 0,64                      |
| Erde       | 500 km    | 5 ns      | 4745               | 218            | 0                | 94,9                  | 95,1              | 0,17                       | 0,17                      |
|            |           | 10 ns     | 4782               | 256            | 0                | 95,6                  | 95,1              | 0,32                       | 0,32                      |
|            |           | 20 ns     | 4765               | 235            | 0                | 95,3                  | 95,1              | 0,65                       | 0,65                      |
|            | 250 km    | 5 ns      | 4761               | 239            | 0                | 95,2                  | 95,3              | 0,17                       | 0,17                      |
|            |           | 10 ns     | 4754               | 246            | 0                | 95,6                  | 95,3              | 0,32                       | 0,32                      |
|            |           | 20 ns     | 4784               | 216            | 0                | 95,7                  | 95,3              | 0,64                       | 0,64                      |

**Tabelle 5.4:** Simulationsergebnisse bei Nacht



## 6 Ressourcen Abschätzung

In diesem Abschnitt soll nun eine Abschätzung über die geforderte elektrische Leistung und der Masse der einzelnen Komponenten durchgeführt werden.

Es wird mit der Abschätzung der Laserleistung begonnen. Dafür soll folgendes Modell angenommen werden (Koechner 2006, S.120). Dafür wird zunächst die Energie  $E_{\text{pump}}$  berechnet, die benötigt wird, um einen Schuss zu generieren.  $E_{\text{pump}}$  setzt sich zusammen aus einer Schwellenergie  $E_{\text{thr}}$ , der Energie des erzeugten Pulses  $E_{\text{out}}$  und dem Wirkungsgrad  $\eta_{\text{slope}}$ , welcher die Verluste des Laserlichts durch den Resonator und der Frequenzverdopplung beschreibt. Dies setzt sich so zusammen:

$$E_{\text{pump}} = \frac{E_{\text{out}}}{\eta_{\text{slope}}} + E_{\text{thr}}$$

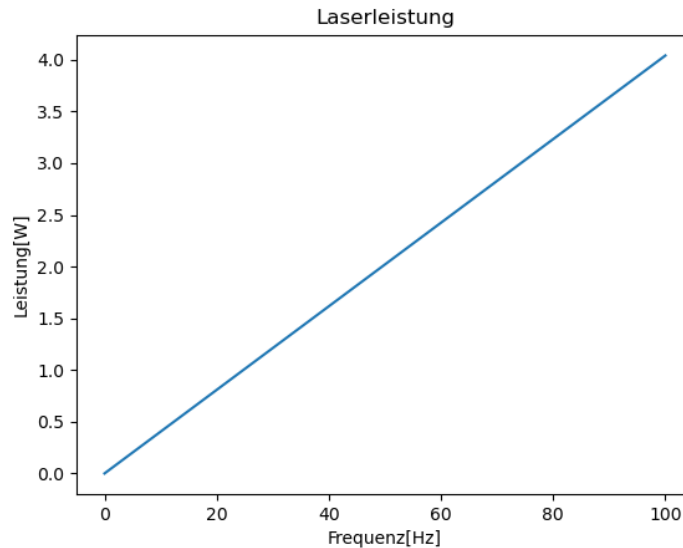
$\eta_{\text{slope}}$  wird für die Wellenlänge 1064 nm mit 1/3 und für 532 nm mit 1/6 abgeschätzt. Wird nun  $E_{\text{out}}$  auf 1 mJ für 1064 nm und 500  $\mu\text{J}$  für 532 nm festgelegt, so beträgt der Summand  $\frac{E_{\text{out}}}{\eta_{\text{slope}}}$  genau 3 mJ.

$E_{\text{thr}}$  wird berechnet mit:

$$E_{\text{thr}} = \frac{\pi r_0^2 h c (g_0 l)_{\text{thr}}}{\sigma_{\text{em}} \lambda \eta_Q \eta_{\text{Stokes}} \eta_{\text{store}}}$$

Für einen Mikrochiplaser können dafür folgende Werte angenommen werden (Althaus 2023).  $r_0$  ist der Radius des Lasermediums, er wird mit 0,2 mm abgeschätzt.  $\sigma_{\text{em}}$  ist der Emissionsquerschnitt und wird mit  $6,5 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$  abgeschätzt.  $\lambda$  ist die Wellenlänge des Laserlicht vor der Frequenzverdopplung, also 1064 nm.  $\eta_{\text{store}}$  ist zum Abschätzen des Verlusts durch den Anteil an Elektronen, die beim Puls sich noch in angeregtem Laserniveau befinden, es wird mit 50 % abgeschätzt.  $\eta_Q$  ist zum Abschätzen des Verlusts durch den Anteil an Elektronen, welche sich in angeregtem Pumpniveau befinden, es wird mit 90 % abgeschätzt.  $\eta_{\text{Stokes}}$  ist das Verhältnis zwischen der Energie der Pumpphotonen und den Laserphotonen. In einem Nd:YAG Laser ist dies 808/1064.  $(g_0 l)_{\text{thr}}$  ist der Signalverstärkungskoeffizient. Dieser wird vom Resonator bestimmt:

$$(g_0 l)_{\text{thr}} = \frac{L + \ln(m^2)}{2}$$



**Abbildung 6.1:** Elektrische Leistung eines 1mJ Mikrochip Lasers

$L$  ist der dissipative Verlust durch den Resonator und des Lichtanteils, welches den durchlässigen Spiegel verlässt. Es wird auf 0,01 abgeschätzt.  $m$  ist die Verstärkung eines instabilen Verstärkungsmediums. Es wird mit  $\sqrt{\frac{1}{0,9}} \approx 1,05$  abgeschätzt. Damit ergibt sich  $E_{thr}$  zu  $60,68 \mu\text{J}$  und  $E_{pump}$  zu  $6,061 \text{ mJ}$ .

Um die durchschnittliche optische Pumpleistung zu erhalten, wird  $E_{pump}$  mit der Schussfrequenz  $f_{rep}$  multipliziert. Bei der Umwandlung von elektrischer Leistung in optische wird 50 % Verlust  $\eta_{LD}$  angenommen und weitere Verluste in der Elektronik  $\eta_{el}$  von 0,3. Damit kann nun die elektrische Leistung des Lasers berechnet werden mit:

$$P_{el} = E_{pump} f_{rep} \eta_{LD} \eta_{el}$$

Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung und der Frequenz wird in Abbildung 6.1 dargestellt. Zusätzlich wird noch eine Leistung von 8 W für die Datenverarbeitung angenommen. Damit ergibt sich folgender Zusammenhang für die gesamte elektrische Leistung des Geräts:

$$P_{ges} = 0,0404 J \cdot f_{rep} + 8W$$

Grundsätzlich lässt sich nun die Frequenz so anpassen, dass die Leistung, die vom Satellitenbus maximal bereitgestellt werden kann, nicht überschritten wird.

Um die Masse des Geräts zu untersuchen, muss das Gerät in seine Bestandteile zerlegt werden. Zunächst wird das Teleskop untersucht. Für die Masse des Teleskops werden zwei Arten untersucht, einem Linsenteleskop und einem Spiegelteleskop. Für das Linsenteleskop wird eine Linse mit dem errechneten Durchmesser  $d$  und einer Dicke von einem Fünftel des Durchmessers und einem Aluminiumhohlkegel als Gehäuse mit einer Wandstärke von 2 mm und einer Länge vom 1,8fachen des Linsendurchmessers (Althaus 2023). Damit lässt sich die Masse eines Linsenteleskops  $m_{LT}$  berechnen mit:

$$m_{LT} = \frac{d^2}{4} \pi \frac{d}{5} \rho_{\text{Glas}} + \frac{(d + 2mm)^2 - d^2}{4} \pi \frac{1,8d}{3} \rho_{\text{Alu}}$$

$$m_{LT} = \frac{d^3}{20} \pi \rho_{\text{Glas}} + 0,15\pi \cdot (d^2 \cdot 4mm + d \cdot 4mm^2) \rho_{\text{Alu}}$$

Mit  $2,5 \text{ g/cm}^3$  als Dichte für Glas  $\rho_{\text{Glas}}$  und  $2,7 \text{ g/cm}^3$  als Dichte für Aluminium  $\rho_{\text{Alu}}$  (Gomeringer et al. 2019, S. 124).

Für die Massenabschätzung des Spiegelteleskops wird ein ähnliches Teleskop herangezogen. Hierfür wird das Spiegelteleskop von GALA herangezogen. Dieses Teleskop besitzt einen Durchmesser von 25 cm  $d_0$  und hat eine Masse  $W_0$  von 3,6 kg (Althaus 2023). Um einen Massenvergleich mit einem anderen Teleskop durchzuführen, kann folgende Gleichung verwendet werden (Wertz und Larson 2008, S.285f.):

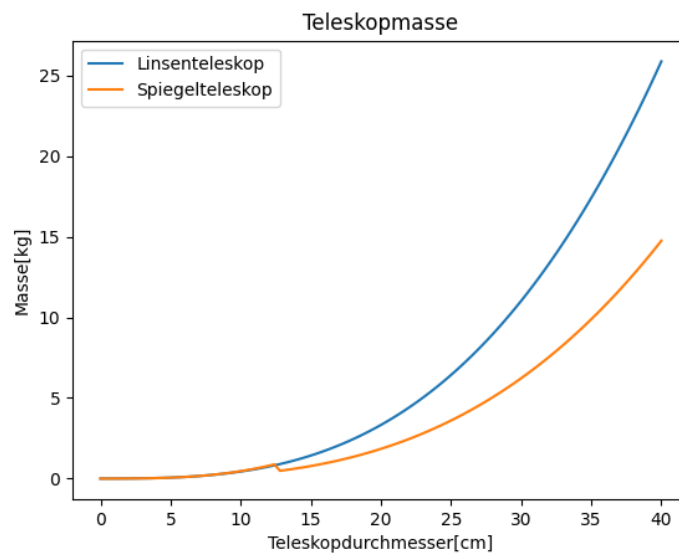
$$W_i = KR^3W_0$$

R steht für das Verhältnis des neuen Objektes zum Vergleichsobjekt und K ist ein Zusatzfaktor, der 2 für  $R < 0,5$  und sonst 1 ist. Damit ergibt sich:

$$m_{ST} = 2 \cdot \left( \frac{d}{25cm} \right)^3 \cdot 3,6kg \quad (\text{für } d \leq 12,5 \text{ cm})$$

$$m_{ST} = 1 \cdot \left( \frac{d}{25cm} \right)^3 \cdot 3,6kg \quad (\text{für } d > 12,5 \text{ cm})$$

In Abbildung 6.2 werden die Massen der beiden Teleskoptypen verglichen. Es ist zu erkennen, dass das Linsenteleskop leichter als das Spiegelteleskop, wenn es kleiner als 12,5 cm groß ist, sonst umgekehrt. Die Massen der Teleskope für die bisher betrachteten Szenarien sind in Tabelle 6.1 dargestellt. Neben dem Teleskop hat das System auch noch einem Laserkopf ( $m = 500 \text{ g}$ ), einem Laserdriver ( $m = 200 \text{ g}$ ), einer Datenverarbeitungsplatine ( $m = 200 \text{ g}$ ), einer SPAD ( $m = 100 \text{ g}$ ) und zwei



**Abbildung 6.2:** Masse der Teleskops

| Tag    | Schnee | Erde   | Nacht  | Schnee | Erde   |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 500 km | 900 g  | 9900 g | 500 km | 270 g  | 1500 g |
| 250 km | 115 g  | 620 g  | 250 km | 34 g   | 345 g  |

**Tabelle 6.1:** Teleskopmassen der gewählten Szenarien

Aluminiumgehäusen für den Laserdriver und Datenverarbeitungsplatine ( $m = 56$  g und  $m = 109$  g). Ohne das Teleskop hat das Gerät dann eine Masse von 1165 g.

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, eine Auslegung eines Laseraltimeters mit einer SPAD und einem Mikrochiplaser mit 1 mJ Pulsenergie durchzuführen, um künftig kleiner und leichter Laseraltimeter bauen zu können. Um zu verstehen, warum eine SPAD und ein Mikrochiplaser verwendet werden sollen, wurden Konzepte von Lasern und Photodetektoren miteinander verglichen und realistische Parameter für beide ausgewählt.

Weiterhin wurde ein Verfahren zur Vorhersage der WKD entwickelt und eine Methode zur Bestimmung der Messgenauigkeit. Diese Vorhersage erfordert die Parameter der SPAD, des Lasers und der Umgebungsbedingungen. Damit konnte nachgewiesen werden, dass durch die Frequenzverdopplung eines 1 mJ Lasers mit einer Wellenlänge von 1064 nm zu 500  $\mu$ J mit der Wellenlänge 532 nm bessere Ergebnisse erzielt werden können. Weiterhin konnte durch die Auswahl eines selbstgewählten Schwellwerts für die WKD bei möglichen Umgebungsbedingungen des Satelliten ein erforderlicher Teleskopdurchmesser berechnet werden. Dabei musste festgestellt werden, dass im worst case (kleiner Albedo, große Orbithöhe und durch die Sonne verursachtes Hintergrundlicht) das erforderliche Teleskop größer wird als das von BELA und GALA. Da die Laser jedoch mit größerer Pulsenergie arbeiten, sollte für weitere Auslegungen ein stärkerer Laser in Betracht gezogen werden.

Im nächsten Schritt wurden einige Simulationen durchgeführt, um die Messgenauigkeit des Sensors zu überprüfen. Diese haben ergeben, dass für den Einsatz im Tageslicht eine Form von Filterung falscher Messergebnisse erforderlich ist, um die mittlere Abweichung auf wenige Meter zu begrenzen. Dies ist in der Nacht nicht erforderlich. Die Simulationen haben außerdem ergeben, dass eine kürzere Pulslänge zu genaueren Messwerten führt, es muss jedoch bei kürzer werdenden Pulsen auch auf WKD geachtet werden.

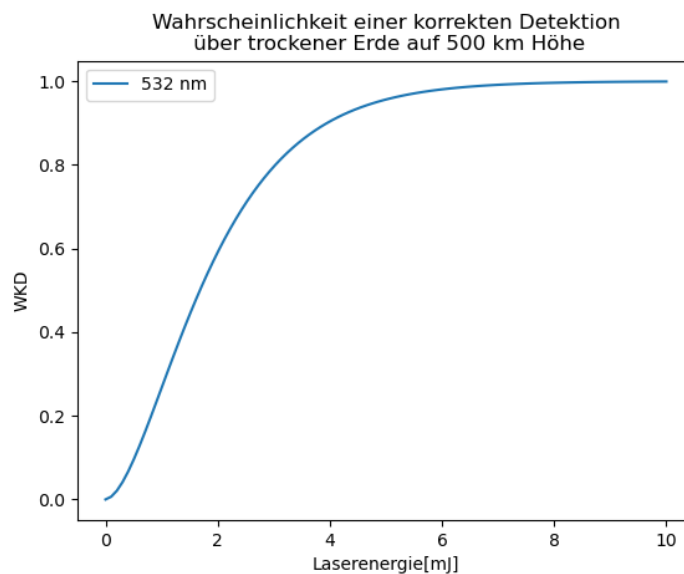
Zum Schluss der Arbeit konnte mit Modellen ein Power- und Massen-Budget aufgestellt werden.

## 8 Ausblick

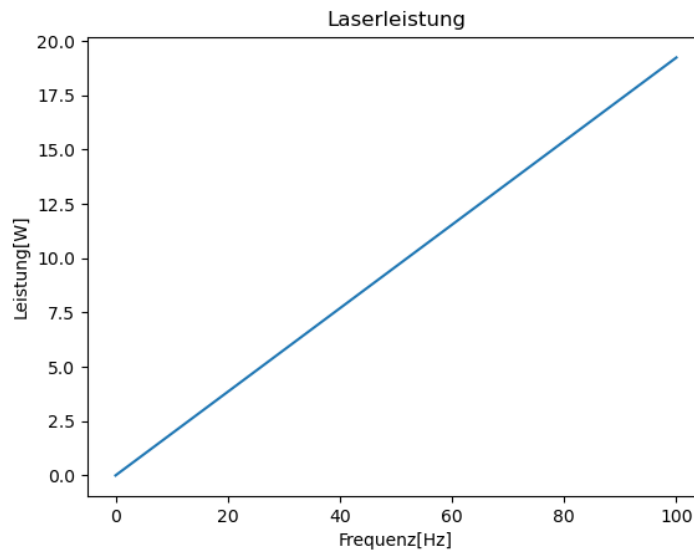
In diesem Abschnitt sollen einige weitere Ansätze zur Auslegung eines möglichen Altimeters kurz betrachtet werden, welche von der Aufgabenstellung nicht abgedeckt werden.

### 8.1 Variation der Laserstärke

In diesem Abschnitt soll nun die Größe des Teleskops konstant gehalten und stattdessen die Energie der Laserpulse angepasst werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 8.1 für einen 500 km Orbit über Erde mit einem 8 cm Teleskop dargestellt. Um nun eine Treffersicherheit von 95 % zu erreichen, wird ein Laser mit 4,8



**Abbildung 8.1:** Variation der Laserenergie



**Abbildung 8.2:** Elektrische Leistung eines 1mJ Mikrochip Lasers

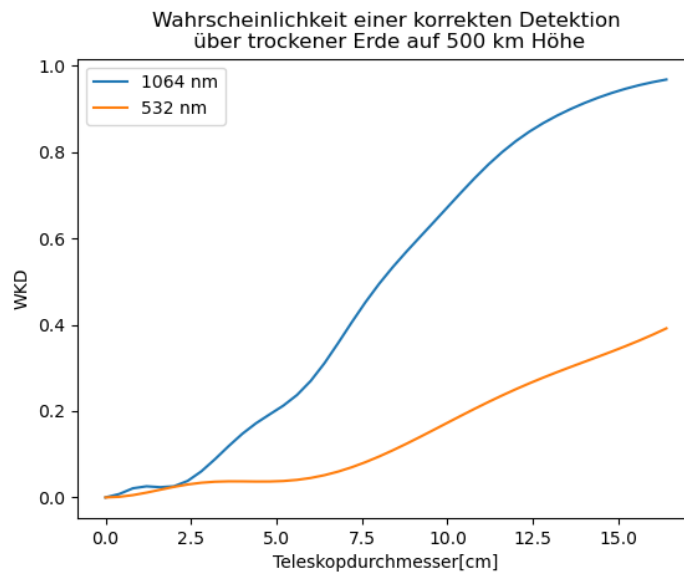
mJ benötigt.

Wenn die Pulsenergie des Lasers erhöht wird, muss auch die elektrische Leistung erneut berechnet werden. Die Ergebnisse werden in Abbildung 8.2 dargestellt. Hier muss darauf geachtet werden, dass die Annahmen aus Abschnitt 6 für einen Mikrochip-Laser gelten und sich daher für einen stärkeren Laser noch ändern können.

## 8.2 Hohe QE im Infraroten

In Abschnitt 3.2 wurde die QE von 1064 nm auf 2 % festgelegt. Es wurde aber auch auf eine SPAD mit deutlich besserer QE von 35 % erwähnt, die jedoch wegen der großen Totzeit nicht infrage kommt. Nun soll einmal angenommen werden, es gäbe eine SPAD mit einer QE von 35 % und einer Totzeit von einer Nanosekunde. In Abbildung 8.3 wird die Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion in Abhängigkeit des Teleskopdurchmessers von 1064 nm mit hoher QE mit der von 532 nm und unveränderter QE gezeigt. Um nun den 95 % zu erreichen ist ein 15,4 cm Teleskop erforderlich. Damit ist die Wellenlänge 1064 nm der 532 nm überlegen, welche unter gleichen Bedingungen ein 35 cm großes Teleskop benötigt.





**Abbildung 8.3:** Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion mit einer Hohen QE im Infraroten

### 8.3 Pixeldetektor

Bei einem Pixeldetektor geht es darum, dass  $n$ -SPADs gleichzeitig beleuchtet werden. Hierfür wird das vom Teleskop aufgefangene Licht auf diese SPADs verteilt. Damit können bis zu  $n$  Photonen gleichzeitig detektiert werden, und die Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Anzahl der detektierten Photonen nähert sich der Poissonverteilung an. Dadurch wird es möglich Detektoren mit längerer Totzeit als der Pulsdauer einzusetzen. Ein neuer Ansatz zur Vorhersage der Wahrscheinlichkeit einer korrekten Detektion wäre demnach die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelner Detektor in dem Puls ausgelöst  $p$  bzw. nicht ausgelöst wird  $(1 - p)$ , zu berechnen. Die Wahrscheinlichkeit  $P_i$ , dass  $i$  Events in dem Puls stattfinden, wäre demnach:

$$P_i = p^i \cdot (1 - p)^{n-i} \cdot \binom{n}{i}$$

Die Berechnung für die Hintergrundevents würde ähnlich wie in 4.3.3 ablaufen.

## 9 Quellen

Alphas (ohne Jahr), Sub-ns Passively Q-Switched Microchip Solid-State Lasers, [https://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Passively\\_Q-Switched\\_Microchip\\_DPSS\\_Lasers\\_PULSELAS-P\\_ALPHALAS.pdf](https://www.alphas.com/images/stories/products/lasers/Passively_Q-Switched_Microchip_DPSS_Lasers_PULSELAS-P_ALPHALAS.pdf), letzter Zugriff: 20.07.2023

Althaus, C., Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. Institut für Planetenforschung, Rutherfordstraße 2 12489 Berlin, Ingenieur für AIV und Optomechanik

Aurea Technology (ohne Jahr), SPD\_OEM\_NIR Compact NIR Single Photon Counter, [http://aureatechnology.com/images/produits/AUREA\\_Datasheet\\_OEM\\_NIR\\_2020\\_A4.pdf](http://aureatechnology.com/images/produits/AUREA_Datasheet_OEM_NIR_2020_A4.pdf), letzter Zugriff: 20.07.2023

Giggenbach, D. and Shrestha, A. Atmospheric absorption and scattering impact on optical satellite-ground links, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/sat.1426?af=R>, letzter Zugriff: 21.07.2023

Gomeringer, R. et al., Tabellenbuch Metall. 48. Auflage, Haan: Verlag Europa-Lehrmittel, 2019

Goward, S. (1998), Albedo and reflectivity, [https://link.springer.com/reference-workentry/10.1007/1-4020-3266-8\\_8](https://link.springer.com/reference-workentry/10.1007/1-4020-3266-8_8), letzter Zugriff: 21.07.2023

Hussman, Hauke et al. (2019), The Ganymede laser altimeter (GALA): key objectives, instrument design, and performance, <https://link.springer.com/article/10.1007/s12567-019-00282-8>, letzter Zugriff: 20.07.2023.

Koechner, W., Solid-State Laser Engineering, 6. Auflage, New York: Springer Verlag, 2006

National Renewable Energy Laboratory (1985), Wehrli Standart Extraterrestrial Solar Irradiance Spectrum, <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra->

wehrli.html, letzter Zugriff: 21.07.2023

Thomas, Nicolas. et al. (2020), The BepiColombo Laser Altimeter, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11214-021-00794-y>, letzter Zugriff: 20.07.2023

Severini, Fabio et al. (2021), SPAD Pixel With Sub-NS Dead-Time for High-Count Rate Applications, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9601277>, letzter Zugriff: 20.07.2023

Wertz, J. und Larson, W., Space Mission Analysis and Design. 3. Auflage, Hawthorne: Microcosm und Springer: New York, 2008