

# **Zeitsynchronisation im Nanosekundenbereich mit GNSS-Antennen zur Anwendung in autonomen Astroteilchenphysik-Detektoren**

**Bachelorarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

der Universität Siegen



**Department Physik**

vorgelegt von

Noah Siegemund

Version von: Januar 2023

**Gutachter**

Prof. Dr. Markus Cristinziani

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1	Kosmische Strahlung . . . . .	2
2.2	Luftschauer . . . . .	3
2.2.1	Elektromagnetische Komponente . . . . .	4
2.2.2	Myonische Komponente . . . . .	6
2.3	Experimentelle Nachweise von Luftschauern . . . . .	6
2.3.1	Oberflächendetektoren . . . . .	7
2.3.2	Fluoreszenzdetektoren . . . . .	8
2.3.3	Radiodetektoren . . . . .	8
2.4	Zeitsynchronisation von autonomen Detektoren . . . . .	9
2.5	Funktionsweise des Global Navigation Satellite Systems (GNSS) . .	11
2.5.1	Grundprinzipien der Satellitennavigation . . . . .	12
2.5.2	Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum . . . . .	12
2.5.3	Die Satellitensysteme Galileo und GPS . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Das Pierre-Auger-Observatorium</b>	<b>15</b>
3.1	Verwendete Detektorsysteme . . . . .	15
3.2	Zeitsynchronisation am Pierre-Auger-Observatorium . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Positionsbestimmung mit einer GNSS-Antenne</b>	<b>17</b>
4.1	Die verwendeten Komponenten . . . . .	17
4.2	Inhalte von GNSS-Nachrichten . . . . .	19
4.3	Koordinatensysteme zur Angabe von Positionen . . . . .	21
4.4	Versuchsaufbau zur Bestimmung der Position . . . . .	22
4.5	Messreihen zur Bestimmung der Position . . . . .	23
4.5.1	Positionsbestimmung mit allen verfügbaren Systemen . . . . .	23
4.5.2	Positionsbestimmung mit allen verfügbaren Systemen und voreingestellten Filtern . . . . .	26
4.5.3	Anpassung der verwendeten Satellitensysteme . . . . .	27
4.6	Zeitliche Korrelationen in den Messungen mit GPS und SBAS . . .	33
<b>5</b>	<b>Timing-Messung mit mehreren GNSS-Antennen</b>	<b>39</b>
5.1	Anpassung des Aufbaus an die Timing-Messung . . . . .	39
5.2	Durchführung der Messung . . . . .	39
5.3	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	41
5.4	Positionsbestimmung während der Timing-Messung . . . . .	43
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>44</b>

---

# 1 Einleitung

Zeitsynchronisation spielt heutzutage in immer zahlreicheren Anwendungen eine zentrale Rolle. Dabei liegt das Hauptziel darin, einzelne Geräte oder Stationen, die sich zu einem Netzwerk zusammenschließen, mit möglichst genauen Zeitstempeln zu versorgen.

Zur Realisierung dieser Vorhaben wird in Anwendungen wie zum Beispiel Telekommunikation, Industriebetriebe, aber auch in Experimenten der Astroteilchenphysik auf den Einsatz von *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS) gesetzt. Diese ermöglichen als vertrauenswürdige Quelle für Zeitstempel neben akkurater Zeitauflösung zusätzlich auch einen autonomen und kabellosen Betrieb.

In der vorliegenden Bachelorarbeit soll die Anwendbarkeit von GNSS im Rahmen von Astroteilchenphysik-Detektoren genauer untersucht werden. Dabei liegen die Hauptziele darin, die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit GNSS-Antennen zu überprüfen, sowie die Anwendung der Zeitsynchronisation von mehreren GNSS-Antennen zu untersuchen.

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Kosmische Strahlung

Der Weg zur Entdeckung der kosmischen Strahlung begann in der Zeit um das Jahr 1900. Mit der Hilfe von Elektroskopen konnte die Ionisation der Luft nachgewiesen werden. Dabei ist die Rate der Abstoßung zweier Zeiger ein Maß für die Anzahl der Ionen in der Luft.

Als Ursache für die Ionisation wurde zunächst die kurz zuvor entdeckte Radioaktivität vermutet. Diese Theorie konnte jedoch 1910 von Theodor Wulf widerlegt werden, indem er bei einem Experiment auf dem Eiffelturm die Ionisation in Abhängigkeit der Höhe maß. Die Ergebnisse der Messung widersprachen der Theorie, irdische Radioaktivität sei die Quelle, da die Ionisation nicht so stark wie erwartet abnahm.

Zur genaueren Untersuchung der Ursache waren Messungen in größerer Höhe notwendig. Diese Messungen wurden im Jahr 1912 von Victor Franz Hess auf einer Reihe von Ballonflügen bis zu einer Höhe von ca. 5000 m durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Ionisation ab einer Höhe von etwa 1000 m wieder zunimmt. Hess nannte diese Strahlung *Höhenstrahlung* und wurde für deren Entdeckung 1936 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Weitere Messungen durch Bothe und Kohlhörster im Jahr 1929 ergaben, dass es sich bei der kosmischen Strahlung um durchdringende, geladene Teilchen handeln muss. Einige Zeit später, im Jahr 1938, konnte Pierre Auger mittels Koinzidenzmessungen im Abstand von bis zu 300 m nachweisen, dass es sich bei den detektierten Teilchen um Sekundärteilchen von hochenergetischen Teilchen handeln muss. Dies führte zur Entdeckung der ausgedehnten Luftschauer.

Das Spektrum der kosmischen Strahlung erstreckt sich sowohl in der Energie, als auch im differentiellen Fluss  $F$  über viele Größenordnungen. Durch zahlreiche verschiedene Experimente ist das Spektrum heutzutage über große Bereiche in der Energie der Primärteilchen gut bekannt [1].

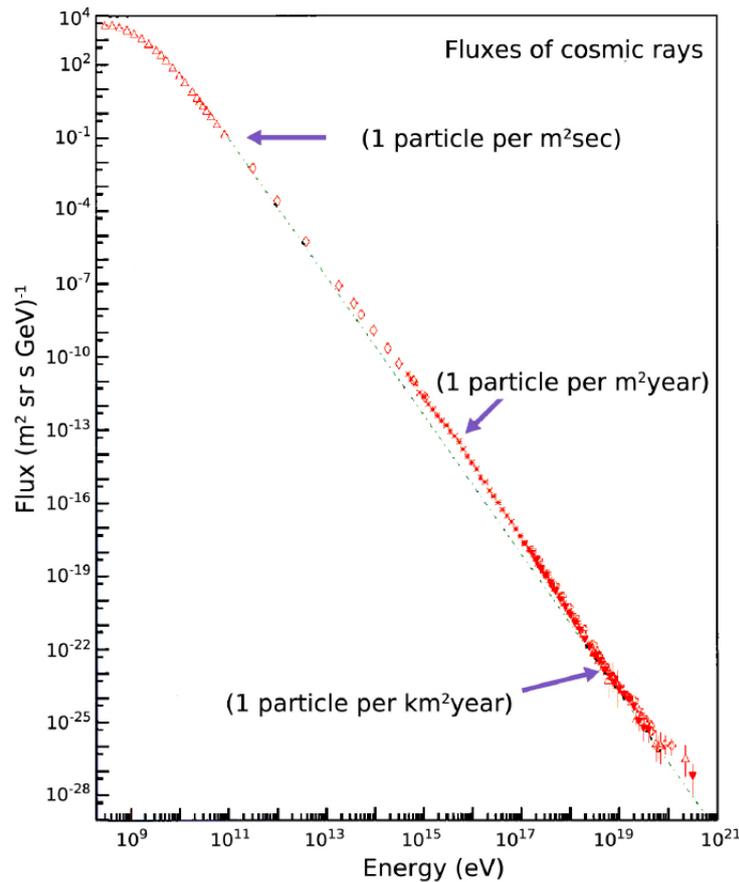


Abbildung 1: Differentieller Fluss der kosmischen Strahlung in Abhängigkeit der Energie des Primärteilchens [2].

Der differentielle Fluss wird für verschiedene Energiebereiche mit unterschiedlichen Methoden vermessen. Ist die Energie gering, so kann die kosmische Strahlung direkt, mittels Satellitenexperimenten, vermessen werden, da dort auch auf eine kleine Detektorfläche viele Teilchen treffen. Zu hohen Energien nimmt der Fluss jedoch rapide ab, so dass diese Art von Messungen der kosmischen Strahlung nicht mehr möglich sind. Um dennoch bei hohen Energien Teilchen nachzuweisen, nutzt man großflächige Detektoren auf der Erdoberfläche. Hier weist man die Teilchen nicht mehr direkt, sondern über die induzierten Luftschauer nach.

## 2.2 Luftschauer

Treffen primäre Teilchen der kosmischen Strahlung, hauptsächlich Protonen und Heliumkerne, aus dem Weltraum auf die Erde, so wechselwirken sie mit den Kernen der Atome in der Atmosphäre. Dabei entstehen mehrere Sekundärteilchen, die wiederum mit weiteren Atomkernen wechselwirken.

Die Energie des Primärteilchens wird dabei — nicht immer gleichmäßig — auf die entstehenden Sekundärteilchen aufgeteilt. So entsteht eine Kaskade aus Teilchen, die durch ein primäres, hochenergetisches Teilchen ausgelöst wird. Alle Teilchen der

Kaskade bewegen sich nahezu mit Lichtgeschwindigkeit entlang der Schauerachse auf die Erde zu und befinden sich somit näherungsweise in einer Ebene, die als Schauerfront bezeichnet wird.

Ein Luftschauer kann im Wesentlichen in drei Komponenten aufgeteilt werden:

- 1) Hadronische Komponente
- 2) Elektromagnetische Komponente
- 3) Myonische Komponente

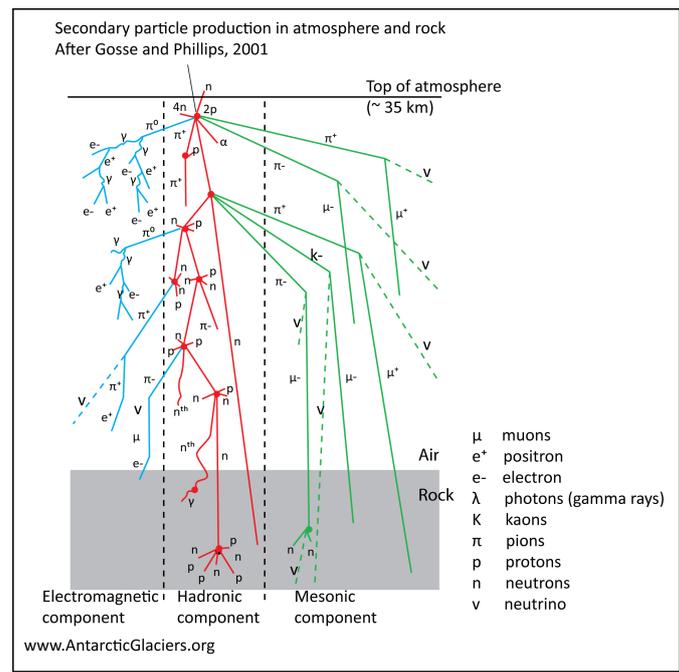


Abbildung 2: Entstehung und Ausbreitung eines ausgedehnten Luftschauers in der Erdatmosphäre [3].

Abbildung 2 zeigt schematisch die Entstehung eines Luftschauers und dessen Aufteilung in drei Komponenten. Dabei wechselwirken die verschiedenen Komponenten über unterschiedliche Mechanismen. Die hadronische Komponente bildet das Rückgrat des Schauers. Hier entstehen über die starke Wechselwirkung immer wieder neutrale und geladene Pionen, die als Startpunkt für die elektromagnetische und myonische Komponente dienen.

### 2.2.1 Elektromagnetische Komponente

Die elektromagnetische Komponente des Schauers entsteht über den Zerfall neutraler Pionen in zwei Photonen:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma. \quad (1)$$

Jedes so entstandene Photon erzeugt dann über Paarbildung ein  $e^+/e^-$  Paar, welches nach dem Durchlaufen der Strahlungslänge  $X_0$  über Bremsstrahlung weitere

Photonen erzeugt. Die abgestrahlten Photonen erzeugen dann wiederum weitere  $e^+/e^-$  Paare. Dadurch entsteht eine elektromagnetische Kaskade, welche in guter Näherung mit dem Heitler-Modell beschrieben werden kann.

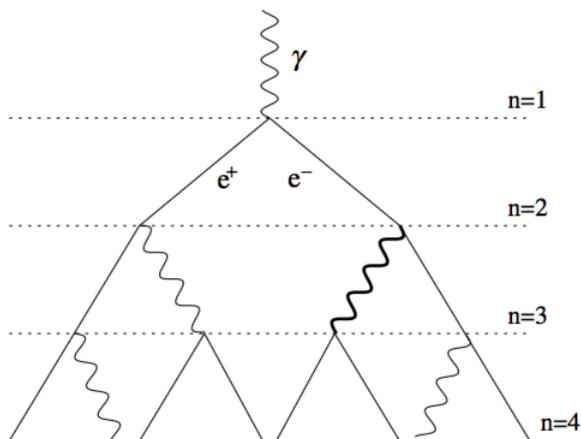


Abbildung 3: Schematische Darstellung der elektromagnetischen Komponente im Heitler-Modell [4].

Dabei wird angenommen, dass sich die Energie des wechselwirkenden Teilchens stets gleichmäßig auf die beiden Teilchen nach der Wechselwirkung aufteilt.

Nach dem Durchlaufen einer Strecke  $L = n \cdot X_0$  durch die Atmosphäre besteht die Kaskade also aus

$$N_n = 2^n \quad (2)$$

Teilchen, deren Energie gleichmäßig aufgeteilt ist, so dass jedes Teilchen die Energie

$$E_n = \frac{E_0}{2^n} \quad (3)$$

besitzt. Dabei entspricht  $E_0$  der Energie des primären Teilchens, welches die Kaskade ausgelöst hat. Der Prozess läuft so lange weiter, bis die Teilchen eine kritische Energie  $E_{\text{crit}}$  erreichen. Aus der kritischen Energie lässt sich die maximale Anzahl an durchlaufenen Wechselwirkungslängen folgendermaßen bestimmen:

$$E_{\text{crit}} = \frac{E_0}{2^{n_{\text{max}}}} \Rightarrow n_{\text{max}} = \frac{\ln(\frac{E_0}{E_{\text{crit}}})}{\ln(2)}. \quad (4)$$

Nach dem Unterschreiten dieser Grenze reicht die Energie der einzelnen Teilchen nicht mehr aus, um die Vermehrung im Gang zu halten. Der Schauer erreicht hier seine maximale Anzahl an Teilchen  $N_{\text{max}}$  und seine maximale Eindringtiefe  $X_{\text{max}}$ . Im Heitler-Modell lassen sich diese Werte wie folgt berechnen:

$$N_{\text{max}} = 2^{n_{\text{max}}} = \frac{E_0}{E_{\text{crit}}} \quad (5)$$

$$X_{\max} = X_0 \cdot n_{\max} = X_0 \cdot \frac{\ln(\frac{E_0}{E_{\text{crit}}})}{\ln(2)}. \quad (6)$$

Die Anzahl der Teilchen im Schauermaximum  $N_{\max}$  ist also direkt proportional zur Energie des Primärteilchens, während die maximale Eindringtiefe  $X_{\max}$  proportional zum Logarithmus der Energie ist.

Trotz der vereinfachten Annahmen im Heitler-Modell können diese Parameter genutzt werden, um eine Abschätzung für die Energie des Primärteilchens zu treffen.

### 2.2.2 Myonische Komponente

Im Gegensatz zur elektromagnetischen Komponente entsteht die myonische Komponente über den Zerfall geladener Pionen:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad (7)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu. \quad (8)$$

Da die Myonen leptonischer Natur sind, unterliegen sie nicht der starken Wechselwirkung und können die Atmosphäre nach ihrer Entstehung nahezu ungehindert durchqueren. Trotz ihrer geringen Lebensdauer von  $\tau = 2,2 \mu\text{s}$ , kann ein großer Teil der Myonen aufgrund der relativistischen Zeitdilatation den Erdboden erreichen. Dort dienen sie zur Detektion des kosmischen Teilchenschauers.

Myonen mit geringerer Energie schaffen es nicht, den Erdboden zu erreichen, sondern zerfallen bereits in der Atmosphäre in ein Elektron beziehungsweise Positron und ein entsprechendes Neutrino:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (9)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu. \quad (10)$$

Die dabei entstehenden Elektronen und Positronen können anschließend zur elektromagnetischen Komponente des Schauers beitragen.

## 2.3 Experimentelle Nachweise von Luftschauern

Um die kosmische Strahlung auch auf der Erde zu vermessen, bedient man sich mehrerer indirekter Nachweismethoden. Dabei werden unter Ausnutzung verschiedener physikalischer Phänomene die Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung detektiert. Aus deren Eigenschaften lassen sich Rückschlüsse auf wichtige Kenngrößen wie Energie, Masse oder Ankunftsrichtung des primären Teilchens ziehen.

### 2.3.1 Oberflächendetektoren

Die Oberflächendetektoren, engl. *surface detectors* (SD), bestehen aus großen, meist mit Wasser gefüllten Tanks, die über eine weite Fläche auf dem Erdboden verteilt sind. Sie dienen zum Nachweis geladener Teilchen, die beim Durchqueren des Wassers im Tank Photonen erzeugen. Grund für die Emission der Photonen ist der Cerenkov-Effekt.

Durchqueren geladene Teilchen mit einer hohen Geschwindigkeit  $v = \beta \cdot c$  ein dielektrisches Medium, so werden die Moleküle im Medium durch das elektrische Feld des geladenen Teilchens entlang dessen Flugbahn polarisiert. Nach dem passieren des Teilchens reorientieren sich die Moleküle wieder. Dabei wird elektromagnetische Strahlung emittiert. Ist die Geschwindigkeit des geladenen Teilchens höher als die Lichtgeschwindigkeit im entsprechenden Medium mit Brechungsindex  $n$  ( $v \geq \frac{c}{n}$ ), so findet zwischen den einzelnen Kugelwellen keine destruktive Interferenz mehr statt. Es bildet sich eine kegelförmige Wellenfront, welche das emittierte Licht unter dem für den Effekt charakteristischen Cerenkov-Winkel abstrahlt.

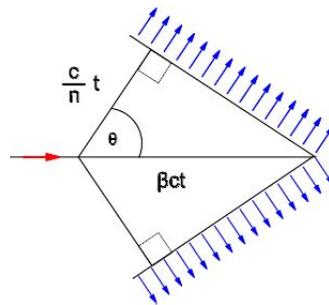


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Abstrahlcharakteristik des Cerenkov-Effekts, der rote Pfeil zeigt die Flugrichtung des Teilchens, die blauen Pfeile die Abstrahlrichtung des Lichtes [5].

Der Cerenkov-Winkel hängt von der Geschwindigkeit  $v$  des geladenen Teilchens und dem Brechungsindex  $n$  des durchquerten Mediums ab. Er ist über die folgende Relation gegeben:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}. \quad (11)$$

Benannt wurde dieser Effekt nach seinem Entdecker Pavel Cerenkov [6].

Die schwachen Lichtsignale, die durch den Cerenkov-Effekt entstehen, werden anschließend mit Hilfe eines Photomultipliers (PM) detektiert und verstärkt. Ein PM besteht aus einer Photokathode, mehreren Dynoden und einer Anode. Trifft ein Photon auf die Photokathode, so kann es dort über den photoelektrischen Effekt ein Elektron lösen. Das nun freie Elektron wird über die Spannung zwischen Kathode und erster Dynode beschleunigt und kann so beim Auftreffen auf die Dynode weitere Elektronen lösen. Diese werden dann wiederum zur nächsten Dynode beschleunigt,

wo sie erneut Elektronen lösen können. Dieser Prozess wiederholt sich mehrere Male im PM, bis die Elektronen schließlich auf die Anode treffen. Die Anode dient hier als Kapazität, welche die Ladung sammelt und dadurch einen Spannungspuls erzeugt, dessen Höhe proportional zur Intensität des Lichtsignals ist [7]. Jeder SD ist mit mehreren solcher PMs ausgestattet.

### 2.3.2 Fluoreszenzdetektoren

Zusätzlich zu den SD kann die Entwicklung von Luftschauern auch innerhalb der Atmosphäre mit der Hilfe von Fluoreszenzteleskopen beobachtet werden. Ihr Prinzip beruht auf der Emission von Fluoreszenzlicht welches durch die Wechselwirkung zwischen Teilchen des Luftschauers und den Stickstoffatomen der Atmosphäre erzeugt wird. Dabei werden die Stickstoffatome energetisch angeregt und fallen wenig später wieder zurück in ihren Grundzustand. Beim Übergang in den Grundzustand wird das Fluoreszenzlicht, welches sich im UV-Bereich befindet, emittiert und von den Teleskopen am Boden vermessen. Der Nachteil dieser Detektionsmethode besteht jedoch darin, dass die Fluoreszenzteleskope nur in klaren, mondlosen Nächten arbeiten können und somit nur einen *duty cycle* von etwa 15% haben [8].

### 2.3.3 Radiodetektoren

Neben der Abstrahlung von Cerenkov-Licht in Wassertanks und der Fluoreszenz gibt es noch weitere Mechanismen, die zur Emission von elektromagnetischer Strahlung führen und ebenfalls zur Detektion der Luftschaue verwendet werden. Es handelt sich dabei um die Emission von Radiostrahlung, welche am Boden durch Antennen detektiert werden kann. Im Wesentlichen tragen zwei Mechanismen zur Emission von Radiostrahlung aus Luftschauern bei. Die beiden Effekte sollen im Folgenden kurz erläutert werden.

#### Ladungsüberschuss

Dieses Konzept beruht auf der Annahme, dass durch Comptonstreuung Elektronen aus den Molekülen der Luft herausgeschlagen werden. Diese zusätzlichen Elektronen breiten sich im Anschluss zusammen mit der Schauerfront aus. Außerdem kommt es aufgrund von Paarvernichtung mit Positronen aus der elektromagnetischen Kaskade zu einer Verringerung der Anzahl an Positronen im Schauer. Die beiden Prozesse summieren sich auf und so kommt es insgesamt zu einem Ladungsüberschuss von mehreren 10%. Da sich die Schauerfront jedoch mit annähernd Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, kommt es zur Emission von elektromagnetischer Strahlung im Radiobereich. Die dafür verantwortlichen Effekte sind der bereits zuvor erwähnte Cerenkov-Effekt sowie die zeitliche Änderung der Ladungsmenge innerhalb des Schauers [9].

### Geomagnetische Ablenkung

Auf seinem Weg zur Erdoberfläche bewegt sich der Schauer durch das Magnetfeld der Erde. Dabei wirkt auf die geladenen Teilchen die Lorentz-Kraft:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (12)$$

Diese Kraft bewirkt eine Beschleunigung der geladenen Teilchen, orthogonal zum Magnetfeld der Erde und der Ausbreitungsrichtung des Schauers. Durch zufällig verteilte Kollisionen mit den Luftmolekülen führt dies zu einem Strom mit annähernd konstanter Driftgeschwindigkeit im Bezugssystem des Luftschauers. Die Stromdichte im Luftschauder steigt proportional mit der Anzahl der geladenen Sekundärteilchen an und wächst somit bis der Schauer sein Maximum erreicht. Durch die zeitliche Variation der Stromdichte kommt es zu einer Emission von Radiostrahlung, die mit der Kenntnis der Stromdichte berechnet werden kann. Da sich der Luftschauder jedoch mit nahezu Lichtgeschwindigkeit in Richtung der Erde bewegt, kommt es durch die Transformation ins Bezugssystem des Beobachters auf der Erde zu einer Bündelung der Strahlung, so dass die Abstrahlung kegelförmig und stark komprimiert in Bewegungsrichtung des Schauers stattfindet [10], [11].

Abbildung 5 stellt die beiden Mechanismen zur Emission von Radiostrahlung durch Luftschauder graphisch dar:

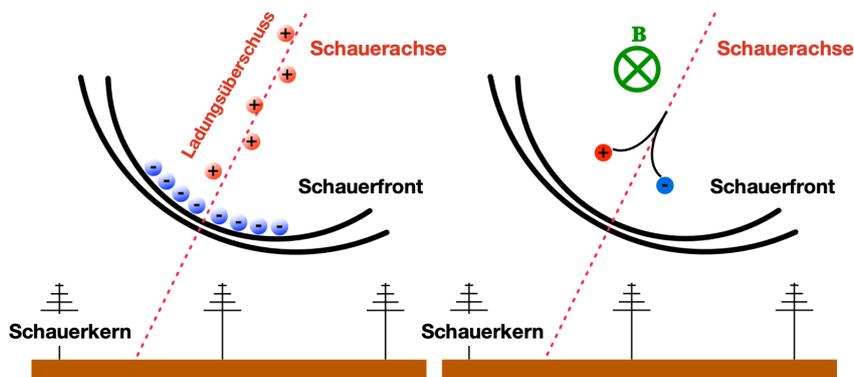


Abbildung 5: Graphische Darstellung der beiden Mechanismen zur Emission von Radiostrahlung in Luftschauern [12].

## 2.4 Zeitsynchronisation von autonomen Detektoren

Zur genauen Vermessung der oben genannten Parameter eines Teilchenschauers ist es notwendig, die einzelnen Detektoren untereinander zeitlich zu synchronisieren. Insbesondere bei der Rekonstruktion der Ankunftsrichtung, sowie bei der Bestimmung der Primärmasse der kosmischen Strahlung durch Radiostationen,

spielt das Timing eine wichtige Rolle. So steht beispielsweise die Messung der Ankunftszeitpunkte der Signale in direkter Verbindung mit der Bestimmung des Winkels [13].

Der Zenitwinkel kann aus der Differenz der Ankunftszeiten bei bekanntem Abstand der Detektoren errechnet werden:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{ct}{d}\right). \quad (13)$$

Dabei entspricht  $\theta$  dem Zenitwinkel,  $t$  der Differenz der Ankunftszeiten und  $d$  dem Abstand der Detektoren. Es wurde vereinfacht angenommen, dass sich die Schauerfront mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet und einer Ebene entspricht.

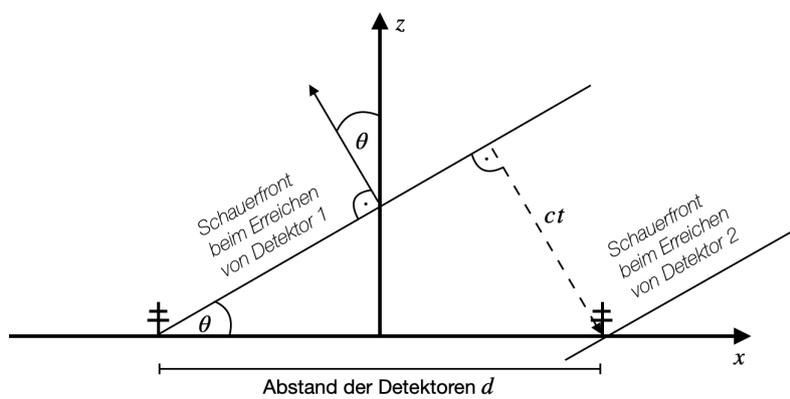


Abbildung 6: Bestimmung des Einfallswinkels einer Schauerfront über die Ankunftszeitpunkte an zwei Detektorstationen.

Mittels der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung kann man nun die Genauigkeit der Winkelauflösung  $\Delta\theta$  in Abhängigkeit der Zeitauflösung  $\Delta t$  bestimmen:

$$\Delta\theta = \frac{c \cdot \Delta t}{d \cdot \cos(\theta)}. \quad (14)$$

Die Winkelauflösung ist also direkt proportional zur Zeitauflösung, hängt jedoch auch stark vom Einfallswinkel selbst ab, sodass selbst bei sehr kleinem  $\Delta t$  die Winkelauflösung für  $\theta \rightarrow 90^\circ$  divergiert. Abbildung 7 zeigt die Winkelauflösung in Abhängigkeit des Einfallswinkels für verschiedene Abstände  $d$  der Detektoren. Dabei wurde eine Zeitauflösung von 3 ns angenommen, die, wie sich später herausstellen wird, einen realistischen Wert darstellt.

Zeitsynchronisation im Nanosekundenbereich konnte bereits in kabelgebundenen Systemen zur Radiodetektion von kosmischen Strahlen implementiert werden [14]. Um Detektorstationen jedoch autonom zu betreiben, muss auf die Verbindung mit Kabeln verzichtet werden. Zur Realisierung dieses Vorhabens setzt man auf den Einsatz von satellitenbasierten Systemen zur Positionsbestimmung, deren Funktionsweise im folgenden Abschnitt erläutert werden soll.

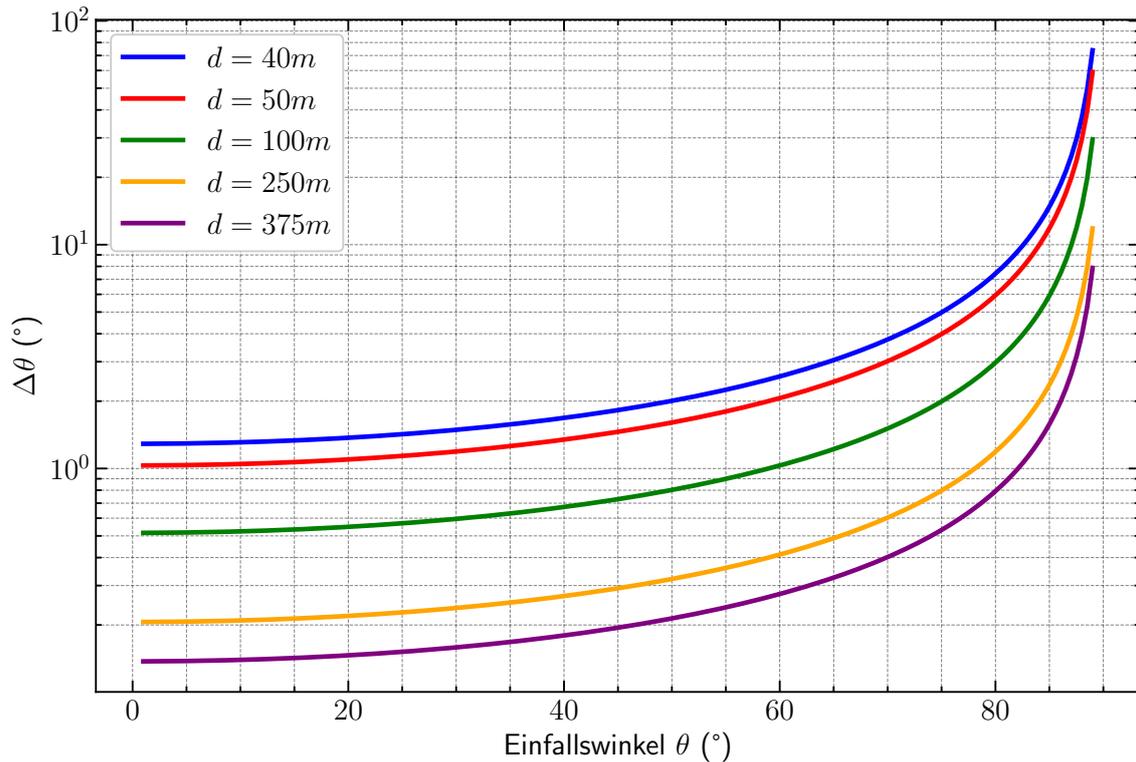


Abbildung 7: Auflösung des Einfallswinkels in Abhängigkeit des Einfallswinkels für verschiedene Abstände der Detektoren für  $\Delta t = 3$  ns.

## 2.5 Funktionsweise des Global Navigation Satellite Systems (GNSS)

Die Satelliten basierte Navigation hat ein breites Anwendungsspektrum. Es ermöglicht Benutzern auf der ganzen Welt in verschiedenen Anwendungsbereichen präzise Orts- und Zeitmessungen, sowie Navigation und Geschwindigkeitsmessungen, durchzuführen. Aktuell gibt es vier solcher GNSS, welche Benutzern zur Verfügung stehen:

- 1) GPS-NAVSTAR (USA)
- 2) Galileo (Europäische Union)
- 3) GLONASS (Russland)
- 4) Beidou (Volksrepublik China)

Zusätzlich zu diesen Systemen gibt es weitere, spezielle Systeme, die zur Übermittlung von Korrekturdaten dienen. Alle vier oben genannten Systeme basieren auf denselben Grundprinzipien der Navigation. Diese sollen im Folgenden genauer erläutert werden.

### 2.5.1 Grundprinzipien der Satellitennavigation

Das Grundprinzip der Satellitennavigation basiert auf der Laufzeitmessung von regelmäßig ausgesendeten Zeitstempeln. Hierbei dient der Satellit als Sender, während der Benutzer der Empfänger ist. Befinden sich Empfänger und Sender in einem eindimensionalen Raum, sprich auf einer Linie, so kann aus der Differenz der Ankunfts- und Sendezeit gemäß

$$D = \Delta\tau \cdot c \quad (15)$$

die Entfernung  $D$  zwischen Sender und Empfänger berechnet werden. Dabei ist  $\Delta\tau$  die Laufzeit und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit. Diese Berechnung ist jedoch nur dann korrekt, wenn die Uhren des Senders und Empfängers synchronisiert sind. Um dieses Problem zu umgehen, braucht man einen weiteren, synchronisierten Sender. Der zweite Sender schickt ebenfalls, gleichzeitig mit dem ersten, ein Signal zum Empfänger. Ist der Abstand  $A$  der beiden Sender bekannt, so kann aus den beiden Laufzeiten der Signale eindeutig die Position des Empfängers bestimmt werden. Abbildung 8 stellt die Abstände zwischen Sendern und Empfänger sowie die Laufzeiten der Signale graphisch dar. Dabei wurden die beiden im Bild zu sehenden Türme bei der Berechnung des Abstands ohne Höhe angenommen, sodass es sich um eine eindimensionale Berechnung handelt. Mittels der Gleichung

$$D = \frac{(\Delta\tau_1 - \Delta\tau_2) \cdot c + A}{2} \quad (16)$$

kann in diesem Fall die Position des Empfängers bestimmt werden.

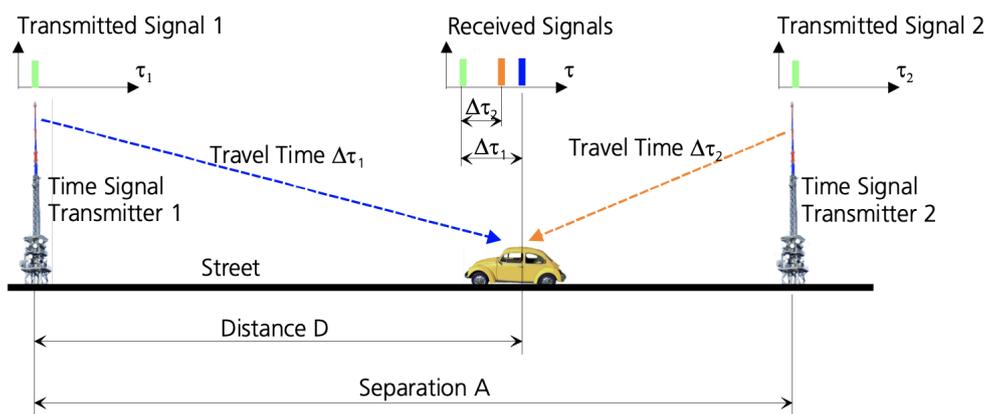


Abbildung 8: Positionsbestimmung eines Empfängers im eindimensionalen Fall, die Höhe der Türme wird in der Berechnung vernachlässigt [15].

### 2.5.2 Positionsbestimmung im dreidimensionalen Raum

Da sich die Positionsbestimmung in realen Anwendungen nicht auf einen eindimensionalen Raum beschränkt, bedarf es zur Ortsmessung im dreidimensionalen Raum

weiterer Satelliten. Mit der Hilfe von drei Satelliten kann die Position im Raum bestimmt werden. Durch die Signallaufzeiten ergibt sich für jeden Satelliten eine Sphäre, deren Radius der Abstand zwischen dem Satelliten und dem Empfänger ist.

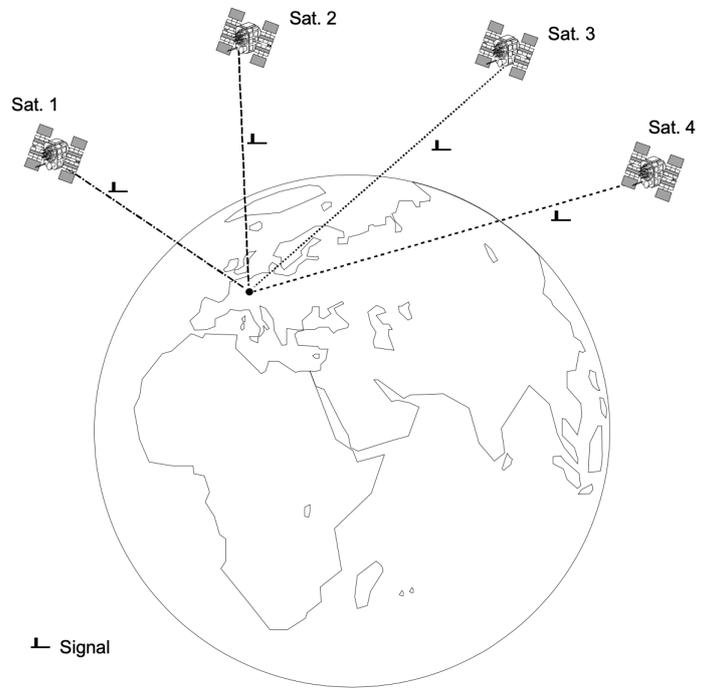


Abbildung 9: Positionsbestimmung eines Empfängers mit vier Satelliten im dreidimensionalen Fall [15].

Geometrisch gesehen befindet sich die Position des Empfängers nun an der Stelle, wo sich die Sphären der drei Satelliten schneiden. Wie im eindimensionalen Fall ist diese Position jedoch nur dann korrekt, wenn alle Uhren der Satelliten und die Uhr des Empfängers synchronisiert sind. Da dem im Regelfall jedoch nicht so ist, wird ein vierter Satellit benötigt, um den zeitlichen Offset zwischen den Uhren der Satelliten und der des Empfängers zu eliminieren. Aus mathematischer Sicht handelt es sich hier also um vier unbekannte Variablen, die drei Raumkoordinaten und den zeitlichen Offset der Empfängeruhr. Um diese Unbekannten zu bestimmen, werden vier Gleichungen benötigt, welche durch die Signallaufzeiten der vier Satelliten gegeben sind.

### 2.5.3 Die Satellitensysteme Galileo und GPS

Das Global Positioning System (GPS) ist das erste satellitenbasierte Navigationssystem. Es wurde seit den 1970er-Jahren vom US-Verteidigungsministerium entwickelt und ist seit Mitte der 1990er-Jahre voll funktionsfähig. Zunächst nur für militärische Zwecke entwickelt, wurde es im Jahr 2000 schließlich auch zur zivilen Nutzung freigegeben. Das System besteht aus drei Segmenten: Dem Weltraumsegment, dem

Kontrollsegment und dem Nutzersegment. Das Weltraumsegment besteht aus einer Konstellation von 24 Satelliten, welche die GPS-Signale aussenden. Das Kontrollsegment besteht aus fünf weltweit verteilten Beobachtungs- und Kontrollstationen, welche die Satellitenbahnen steuern und die Uhren an Bord korrigieren, sowie drei ebenfalls auf der Welt verteilten Bodenantennen. Die gesammelten Informationen werden genutzt, um präzise Berechnungen zur Korrektur der Satellitenbahnen durchzuführen. Diese korrigierten Daten werden anschließend zurück an die Satelliten gesendet.

Das Benutzersegment schließlich besteht aus dem Empfänger, der anhand der übertragenen Daten die Position bestimmt [16],[17].

Bei Galileo handelt es sich um das europäische Satellitennavigationssystem. Es besteht aus 26 Satelliten und ist seit dem Jahr 2016 betriebsbereit. Ähnlich wie beim GPS System besitzt auch Galileo zwei Kontrollzentren, die sich beide auf europäischem Grund befinden. Gesammelte Daten aus einem Netzwerk von Sensor Stationen werden hier verarbeitet und zur Synchronisation der Satelliten mit den Uhren der Bodenstationen verwendet [18].

Die beiden Systeme GPS und Galileo arbeiten eng zusammen, basieren auf derselben Grundtechnologie und sind untereinander kompatibel.

## 3 Das Pierre-Auger-Observatorium

Das Pierre-Auger-Observatorium ist aktuell das weltweit größte Experiment zur Detektion von ultrahochenergetischer kosmischer Strahlung. Das Experiment basiert auf der Vermessung ausgedehnter Luftschauer, ausgelöst durch primäre Teilchen der kosmischen Strahlung. Das Observatorium befindet sich in der Nähe der argentinischen Stadt Malargüe in der Provinz Mendoza. Es besteht aus mehreren, unabhängigen Detektorsystemen, die bei Kombination der Messdaten zur Verbesserung der Auflösung führen [19].

### 3.1 Verwendete Detektorsysteme

Der größte, am Pierre-Auger-Observatorium verwendete Detektor, ist der Oberflächendetektor. Dabei handelt es sich um ein etwa  $3000 \text{ km}^2$  großes Areal, in dem sich 1660 wassergefüllte Tanks jeweils im Abstand von 1,5 km befinden. In den Tanks werden durch die Ausnutzung des Cerenkov-Effekts Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung detektiert. Die Tanks haben einen Durchmesser von 3,6 m und eine Wassertiefe von 1,2 m. In jedem Tank befinden sich 3 Photomultiplier zur Detektion des Cerenkov-Lichts [20].

Ergänzt werden die Oberflächendetektoren durch 27 Fluoreszenzteleskope, die sich über vier Standorte verteilt am Rand des Areals befinden. Die Fluoreszenzteleskope dienen insbesondere dazu, die longitudinale Entwicklung des Luftschauers zu vermessen [8].

Ein weiteres Detektorsystem am Pierre-Auger-Observatorium ist das AERA (Auger Engineering Radio Array) System [21]. Dabei handelt es sich um einen Detektor, welcher Radiopulse, emittiert durch Luftschauer bei höchsten Energien, vermisst. Die verwendeten Antennen sind sensitiv im Frequenzbereich von 30 MHz bis 80 MHz. Wie beim Oberflächendetektor, sind auch die Radioantennen 24 Stunden am Tag aktiv. AERA wurde in zwei Ausbaustufen entwickelt und zunächst mit 24 Stationen im Abstand von 144 m betrieben. Nach der Erweiterung besteht das System nun aus 124 Antennen mit vergrößertem Abstand von 250 m und 375 m [19].

### 3.2 Zeitsynchronisation am Pierre-Auger-Observatorium

Sowohl der Oberflächendetektor, als auch der Fluoreszenzdetektor, besitzen bereits eine Schaltung zur Bestimmung der Ankunftszeit von Luftschauersignalen. Ein GPS-Receiver bildet das Herzstück der Timing-Einheit. Individuelle Trigger werden über das GPS-Signal mit einem 1 Puls-pro-Sekunde Clocksignal versorgt. Zwischen den einzelnen Empfängern kann es jedoch zu einem Offset von bis zu 100 ns kommen. Um dies zu überprüfen wurde eine Methode entwickelt, mit der es möglich ist, diese Offsets zu messen. Mit der Hilfe von sogenannten Zwillingstationen, bei denen sich zwei Oberflächendetektoren in unmittelbarer Nähe befinden, ist es gelungen,

einen direkten Vergleich der Zeitmessungen durchzuführen. Dabei wurde ermittelt, dass die Zeitauflösung der Oberflächendetektoren weniger als 15 ns beträgt [22]. Eine weitere Methode, die bei AERA zum Einsatz kommt, ist die Zeitsynchronisation mit der Hilfe eines Referenz Beacons. AERA arbeitet zwar ebenfalls mit GPS-Antennen, jedoch ist deren Genauigkeit nicht ausreichend, um beispielsweise interferometrische Analysen durchzuführen. Um die Synchronisation zu verbessern, wird hier mit einem Referenz Beacon gearbeitet, welcher monochromatische, sinusförmige Wellen auf verschiedenen Frequenzen aussendet [23]. Wird ein Luftschauer aufgezeichnet, so werden gleichzeitig auch die Signale des Beacons registriert und gespeichert. Diese Signale werden später in der Analyse der Daten zur Zeitrekonstruktion verwendet und anschließend herausgefiltert, so dass sie die Analyse des Radiosignals nicht beeinträchtigen. Über den festen Abstand zwischen den Detektorstationen kann die Phasendifferenz zwischen einer definierten Referenzstation und den weiteren Stationen gemessen, und folglich die Zeitverschiebung berechnet werden. Die GPS-Zeiten werden dann unter Berücksichtigung der Zeitverschiebung und der geometrischen Zeitverzögerung, die sich aus der Entfernung zwischen jeder Station und der Referenzstation ergeben, korrigiert.

Um die Methode des Referenz Beacons zu überprüfen, werden weitere Referenzsignale aus Flugzeugen ausgesendet. Dabei ist die Position der Flugzeuge bekannt, woraus die Ankunftszeit der Signale berechnet werden kann. Diese werden dann mit den gemessenen Ankunftszeiten an den Detektorstationen verglichen, um so den Timing-Offset zu bestimmen [23].

## 4 Positionsbestimmung mit einer GNSS-Antenne

Als vorbereitende Maßnahme auf die Timing-Messung wurden zunächst einige Messungen zur Positionsbestimmung einer GNSS-Antenne durchgeführt. Im Folgenden sollen der Aufbau des Versuchs, sowie die einzelnen Hardware-Komponenten kurz diskutiert werden.

### 4.1 Die verwendeten Komponenten

Zur Bestimmung der Position wurde ein Aufbau aus drei Hauptkomponenten verwendet. Der Aufbau besteht aus der GNSS-Antenne ANN-MB-01-00 des Herstellers u-blox, sowie einem GNSS-Timing-Gerät, dessen Herzstück das Timing-Modul ZED-F9T bildet. Dieses stammt ebenfalls vom Hersteller u-blox. Zur Datennahme dient ein Computer, auf dem die u-center Software, eine GNSS Evaluationssoftware, installiert ist.

#### Die GNSS-Antenne

Bei der GNSS-Antenne ANN-MB-01-00 handelt es sich um eine aktive Multiband Antenne, die auf den Bändern L1 und L2/E5b/B2I arbeitet. Die Antenne ist speziell für die u-blox F9 Serie ausgelegt [24].

Die Antenne ist in zwei Sektionen aufgeteilt. Sie besteht aus einer Patchantenne und einer Verstärkersektion. Die Patchantenne funktioniert ähnlich wie eine Dipolantenne wobei bei der Patchantenne jedoch meist ein rechteckiges Metallplättchen als Resonator dient. Das empfangene Signal wird dann in der Verstärkersektion durch einen Bandpass gefiltert, durch einen Low-Noise-Amplifier (LNA) verstärkt und noch einmal gefiltert. Am Ende der Verstärkersektion befindet sich ein weiterer LNA, bevor das Signal über eine 5 m lange Koaxialleitung weitergegeben wird.



Abbildung 10: u-blox GNSS Antenne ANN-MB-01-00 [25].

## Das GNSS-Timing Gerät

Das GNSS-Timing-Gerät besteht aus einem Evaluationsboard, dem RCB-F9T-timing-board, auf dessen Mitte das ZED-F9T Timing-Modul sitzt und einem Motherboard. Das Motherboard, gebaut vom Elektronikentwicklungslabor der Universität Siegen, dient unter anderem zur Stromversorgung. Des Weiteren befinden sich eine USB-auf-RS232 Schnittstelle sowie zwei RF-Clock-Verstärker und ein Steckplatz für das Evaluationsboard auf dem Motherboard. Das ZED-F9T Timing-Modul ist in der Lage, Signale der GNSS-Systeme GPS, Galileo, GLONASS und Beidou gleichzeitig zu empfangen. Neben Positionsbestimmung und Navigation werden GNSS Signale auch für Timing Anwendungen verwendet. Durch die Nutzung der Atomuhren an Bord der Satelliten können GNSS-Signale, welche eingebettete Timing-Informationen enthalten, verwendet werden, um Geräte zu synchronisieren. Das ZED-F9T Timing-Modul besitzt zwei Zeitpuls SMA-Ausgänge, welche in Dauer und Frequenz der Pulse konfigurierbar sind.

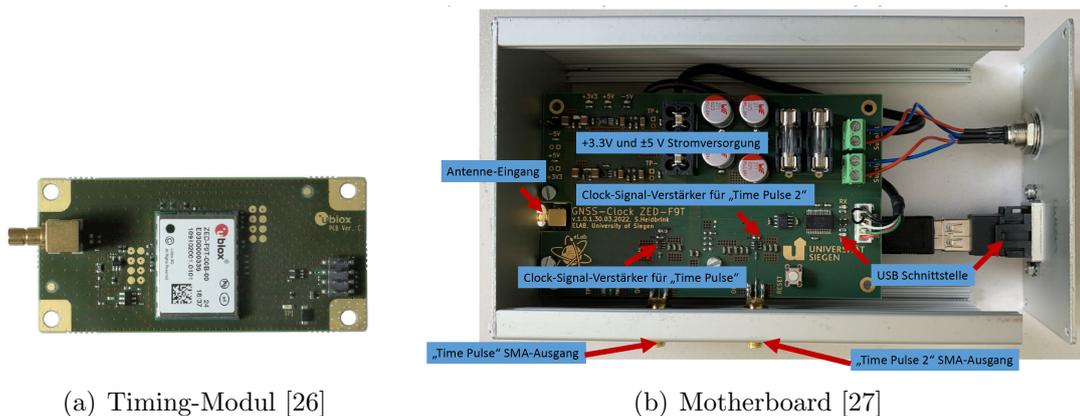


Abbildung 11: u-blox Timing-Modul ZED-F9T aufgebracht auf dem Evaluationsboard RCB-F9T (links) und Motherboard mit Stromversorgung und zwei Clock-Signal-Verstärkern (rechts).

Zum mechanischen Schutz der elektronischen Komponenten befinden sich das Motherboard und das auf ihm aufgebrachte Timing-Modul in einem eigens dafür angefertigten Gehäuse aus Aluminium. Diese besitzt verschiedene Aussparungen und Anschlüsse für die Stromversorgung und die Datenübertragung.

## Die GNSS-Evaluationssoftware u-center-v22.02

Bei u-center-v22.02 handelt es sich um eine GNSS-Evaluationssoftware des Herstellers u-blox. Die Hauptanwendungen dieser Software bestehen darin, Performance Tests an GNSS-Geräten durchzuführen, die Firmware von GNSS-Modulen zu updaten, sowie GNSS-Module des Herstellers u-blox zu konfigurieren. Dabei ist es beispielsweise möglich, gewisse Satellitensysteme aus der Positionsbestimmung auszuschließen, oder Filter einzustellen, die automatisch in den Berechnungen

angewendet werden. Auch der Betriebsmodus der Antenne kann hier konfiguriert werden. Um die Position des Empfängers zu messen, wird dieser in den sogenannten *Survey-in* Modus gesetzt. Dieser Vorgang muss durchgeführt werden, bevor der Empfänger in den *Timing* Modus gesetzt werden kann. Außerdem ermöglicht die Software, von den Satelliten empfangene Nachrichten in einem Logfile zu speichern und zu einem späteren Zeitpunkt wieder einzulesen, um sie dann zu analysieren und nachzubearbeiten.

## 4.2 Inhalte von GNSS-Nachrichten

Jede Sekunde erhält der Empfänger Nachrichten von den in diesem Moment verwendeten Satelliten. Eine Nachricht kann in verschiedene Abschnitte aufgespalten werden. Die Information wird über das sogenannte NMEA-Protokoll übertragen [15]. Dabei handelt es sich um einen Übertragungsstandard, der hauptsächlich zum Austausch von Navigationsdaten dient, und unter anderem bei GNSS zum Einsatz kommt. Die Abkürzung NMEA stammt vom Entwickler dieses Protokolls und steht für dessen Namen (National Marine Electronics Association, deutsch *Nationale Vereinigung für Marineelektronik*). Im Folgenden sollen die Inhalte dieses Protokolls anhand eines Beispiels genauer erläutert werden. Im Falle der GNSS-Nachrichten beginnt jeder Datensatz mit einem Log-Header. Darin befinden sich Informationen über die verwendeten GNSS-Systeme, sowie über den Inhalt des Logs. Anschließend folgen, durch Kommas getrennt, die übermittelten Daten.

```

13:59:32 $GNRMC,135932.00,A,5052.42234,N,00800.43157,E,0.006,,010622,,A,V*17
13:59:32 $GNVTG,,T,,M,0.006,N,0.010,K,A*3A
13:59:32 $GNGGA,135932.00,5052.42234,N,00800.43157,E,1,12,1.67,291.0,M,46.9,M,,*42
13:59:32 $GNGSA,A,3,23,10,08,27,32,21,01,,,,,3.05,1.67,2.55,1*0B
13:59:32 $GNGSA,A,3,25,36,11,04,02,09,12,,,,,3.05,1.67,2.55,3*09
13:59:32 $GPGSV,3,1,12,01,19,264,16,08,73,280,48,10,56,069,51,14,08,329,,1*6D
13:59:32 $GPGSV,3,2,12,15,00,019,,16,12,185,39,21,50,272,46,22,06,140,36,1*6D
13:59:32 $GPGSV,3,3,12,23,27,049,30,27,61,143,50,30,02,302,,32,19,124,43,1*65
13:59:32 $GPGSV,3,1,12,01,19,264,28,08,73,280,48,10,56,069,44,14,08,329,,6*63
13:59:32 $GPGSV,3,2,12,15,00,019,,16,12,185,,21,50,272,,22,06,140,,6*67
13:59:32 $GPGSV,3,3,12,23,27,049,22,27,61,143,44,30,02,302,,32,19,124,41,6*66
13:59:32 $GAGSV,3,1,11,02,39,270,32,04,31,104,46,09,10,154,37,10,40,079,46,7*79
13:59:32 $GAGSV,3,2,11,11,68,067,44,12,15,083,21,19,20,042,,25,24,213,19,7*77
13:59:32 $GAGSV,3,3,11,30,18,324,,34,05,269,,36,55,279,44,7*4A
13:59:32 $GAGSV,3,1,11,02,39,270,,04,31,104,44,09,10,154,33,10,40,079,47,2*7A
13:59:32 $GAGSV,3,2,11,11,68,067,43,12,15,083,23,19,20,042,19,25,24,213,41,2*72
13:59:32 $GAGSV,3,3,11,30,18,324,,34,05,269,,36,55,279,42,2*49
13:59:32 $GNGLL,5052.42234,N,00800.43157,E,135932.00,A,A*75

```

Abbildung 12: Beispiel einer GNSS-Nachricht, aufgezeichnet in einer Messung mit den Systemen Galileo und GPS.

Am Anfang jeder Zeile befindet sich ein \$ Zeichen, welches den Beginn des Logs kennzeichnet. Anschließend folgen zwei Buchstaben, die angeben, welche Satellitensysteme verwendet wurden. Hier gibt es verschiedene Abkürzungen für die unterschiedlichen Systeme:

- 1) GP: Nur GPS

- 2) GL: Nur GLONASS
- 3) GA: Nur Galileo
- 4) GB/BD: Nur Beidou
- 5) GN: Mehrere Systeme

Die erste Zeile einer Nachricht enthält die empfohlenen Mindest Navigationsdaten, die von einem GNSS-Empfänger bereitgestellt werden müssen. Hierin befinden sich ein Zeitstempel im UTC Format, eine Kennung, ob die empfangen Daten gültig sind, sowie Informationen über den Längen- und Breitengrad des Empfängers. Außerdem werden die Geschwindigkeit und die zurückgelegte Strecke des Empfängers, sowie Datum und zwei Kennzahlen zur magnetischen Variation angegeben. Der Log endet mit einer Modusanzeige der Positionsbestimmung, zum Beispiel A für autonom, oder D für differentiell und einer Prüfsumme, anhand derer die Integrität der Daten überprüft werden kann.

Die zweite Zeile enthält Informationen über die zurückgelegte Strecke und die Geschwindigkeit des Empfängers. Diese Parameter sind jedoch für die hier durchgeführten Messungen nicht weiter interessant, da sich alle Antennen auf festen Positionen befinden und sich während der Messungen nicht bewegen.

Die dritte Zeile, beginnend mit \$GNGGA, enthält erneut einen Zeitstempel, sowie den Längen- und Breitengrad des Empfängers. Zusätzlich enthält sie die Länge der Liste der Satelliten ID's, eine geometrische Kennzahl zur Qualität der Lösung (hdop = horizontal dilution of precision), die Höhe des Empfängers über N.N. und den Abstand zwischen Geoid und Ellipsoid, zwei unterschiedlichen Modellen zur Beschreibung der Form der Erde. Sie endet, wie alle anderen Logs, ebenfalls mit einer Prüfsumme.

Die vierte Zeile der Nachricht beginnt mit \$GNGSA. Sie beinhaltet den Betriebsmodus, der angibt, welche Arten von Lösungen genutzt werden sollen. Hier kann entweder ein A für Automatik 2D/3D oder ein M für Manuell stehen. Direkt dahinter befindet sich die Art der Lösung, welche durch eine Zahl gekennzeichnet ist. Eine eins steht für keine Lösung gebildet, eine zwei steht für eine 2D Lösung eine drei für eine 3D Lösung. Der Unterschied zwischen einer 2D und einer 3D Lösung besteht darin, dass bei der 2D Lösung nur der Längen- und Breitengrad bestimmt wurden, bei einer 3D Lösung jedoch zusätzlich noch die Höhe. Anschließend folgen die Identifikationsnummern der Satelliten, die zum Bilden der Lösung benutzt wurden. Hiefür sind zwölf Felder vorgesehen. Wurden mehr als zwölf Satelliten oder mehrere Systeme verwendet, so gibt es auch mehrere Zeilen, die mit \$GNGSA beginnen. Die einzelnen Zahlen können jeweils eindeutig einem Satelliten zugeordnet werden. Nach der Auflistung der Satelliten befinden sich drei Werte, welche die Geometrie der Positionen der Satelliten charakterisieren und ebenfalls Kennzahlen zur Qualität der Lösung sind. Unter anderem befindet sich dort die

bereits oben erwähnte Kennzahl  $hdop$ , sowie zwei weitere, nämlich  $pdop$  und  $vdop$  (positional/horizontal dilution of precision).

Die folgenden Zeilen beginnen jeweils mit  $\$GxGSV$  ( $x = P,L,A,B,N$ ) und enthalten spezifische Informationen über die einzelnen Satelliten. Sie enthalten unter anderem die ID der einzelnen Satelliten, sowie deren Elevation- und Azimutwinkel und geben somit die Positionen am Himmel an. Außerdem wird hier das Signal zu Untergrund Verhältnis jedes Satelliten angegeben.

Die letzte Zeile einer Nachricht beginnt mit  $\$GNGLL$  und enthält noch einmal den Längen- und Breitengrad sowie einen Zeitstempel. Außerdem enthält sie erneut die Modusanzeige der Positionsbestimmung [28].

### 4.3 Koordinatensysteme zur Angabe von Positionen

Zur Angabe von Positionen auf der Erde, ist es notwendig, ein geodätisches Referenzsystem als einheitliche Grundlage zu verwenden. GNSS verwenden das World Geodetic System 1984 (WGS 84) als Referenzsystem. Dieses System besteht aus einem Referenzellipsoid, welches die Abflachung der Erde an den Polen aufgrund der Erdrotation berücksichtigt, sowie einem Geoid, der ein detaillierteres Modell der Erde darstellt. Bei dem Koordinatensystem handelt es sich um ein sogenanntes *Earth-centered, Earth-fixed* (ECEF) System, also ein geozentrisches System.

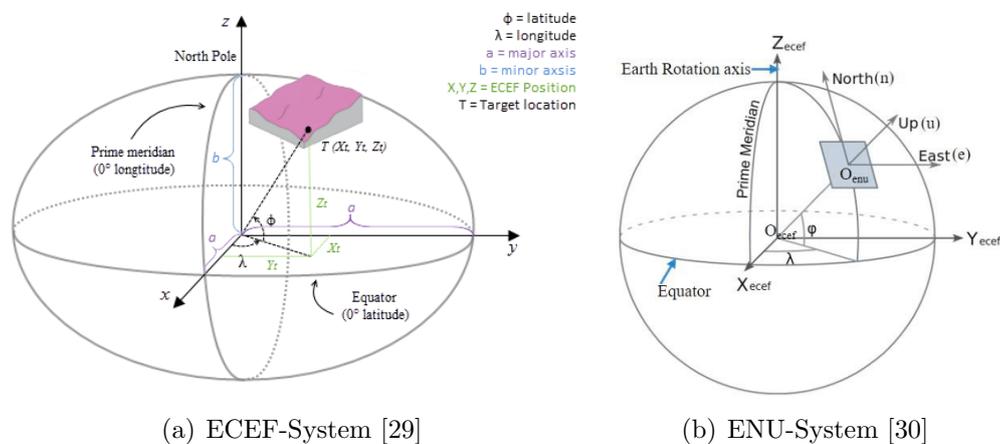


Abbildung 13: Koordinatensysteme zur Angabe der Empfänger- (links) und Satellitenpositionen (rechts).

Der Ursprung dieses Koordinatensystems liegt im Massenmittelpunkt der Erde. Die  $z$ -Achse verläuft von dort durch den geografischen Nordpol. Die  $x$ -Achse ist so festgelegt, dass sie senkrecht zur  $z$ -Achse verläuft und den Nullmeridian schneidet. Der Nullmeridian wurde vom *Internationalen Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme* festgelegt und bildet den geographischen Längengrad  $0^\circ$ . Die  $y$ -Achse ist dann eindeutig festgelegt, denn  $x$ ,  $y$  und  $z$  bilden ein Rechtssystem. Mit dem Referenzellipsoiden und dem festgelegten Nullmeridian, sowie dem Breitengrad

$0^\circ$ , der über den Äquator definiert ist, ist es möglich, Positionen auf der Erde sowohl in kartesischen Koordinaten, als auch in Längen- und Breitengrad anzugeben. Während man die Position des GNSS-Empfängers in einem global definierten Koordinatensystem angibt, wird die Position der Satelliten am Himmel durch zwei Winkel, dem Elevation- sowie dem Azimutwinkel, angegeben. Die beiden Winkel sind in einem lokalen Koordinatensystem, dem sogenannten *ENU*-System, definiert. Das System basiert auf einer lokalen Tangentialebene, die am Ort des Empfängers an der Erde anliegt. Die drei Achsen, East, North und Up des Rechtssystems definieren sich darüber, dass die East-Achse parallel zu den Breitengraden und die North-Achse parallel zu den Längengraden verläuft. Der Azimutwinkel  $\lambda_{\text{ENU}}$  liegt dabei zwischen der Projektion der Satellitenrichtung auf die North-East-Ebene und der North-Achse, während der Elevationwinkel  $\varphi_{\text{ENU}}$  zwischen der North-East-Ebene und der Satellitenrichtung definiert ist.

#### 4.4 Versuchsaufbau zur Bestimmung der Position

Um die Position einer GNSS-Antenne zu bestimmen, wurde diese auf einem Flachdach eines Gebäudes am Emmy Noether Campus der Universität Siegen positioniert. Die Antenne befindet sich etwa 3 m entfernt von der Wand des nächsten Gebäudes. Das 5 m lange Koaxialkabel stellt die Verbindung zwischen der Antenne und dem GNSS-Timing-Gerät her. Die Verwendung eines Koaxialkabels bringt den Vorteil, dass das Signal auf dem Weg von der Antenne zum Timing-Gerät vor Quellen elektromagnetischer Strahlung geschützt ist und somit eine Störung des GNSS-Signals vermieden werden kann. Anschließend wird das Timing-Gerät über ein stromversorgtes USB-Kabel an einen PC angeschlossen. Während die Antenne draußen auf einer geerdeten Metallplatte angebracht ist, befinden sich das Timing-Gerät, sowie der Agilent DC-Power-Supply und der Computer innerhalb des Gebäudes. Die Metallplatte, die eine Größe von ca. 20 cm · 20 cm hat, dient dazu, Reflexionen der Signale in der direkten Umgebung der Antenne zu minimieren. Dadurch soll verhindert werden, dass die Antenne Informationen der Satelliten falsch verarbeitet. Die Metallplatte ist mit einem Kabel direkt an den geerdeten Blitzableiter des Gebäudes angeschlossen. Reflexionen von weiter entfernten Objekten können auf diese Weise jedoch nicht verhindert werden.

Der DC-Power-Supply versorgt das Timing-Gerät mit zwei Spannungsquellen von jeweils +7 V. Diese Versorgungsspannung wird intern auf dem Motherboard mit Hilfe eines DC-DC-Wandlers auf die benötigte Betriebsspannung von +3,3 V und  $\pm 5$  V transformiert. Über die USB-Schnittstelle am Timing-Gerät wird dieses mit dem Computer verbunden. Dort kann innerhalb der u-center Software die Kommunikation zur Antenne hergestellt werden und Befehle und Einstellungen werden über die Software an die Antenne gesendet.

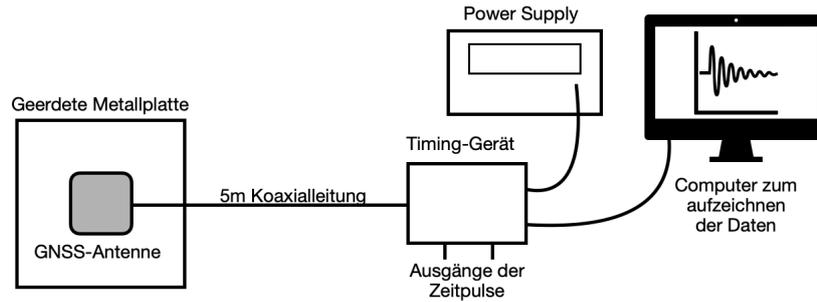


Abbildung 14: Schematischer Aufbau der Antenne auf dem Flachdach.

## 4.5 Messreihen zur Bestimmung der Position

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Messreihen durchgeführt, bei denen, teilweise mit verschiedenen Konfigurationen, die Position der Antenne auf dem Flachdach bestimmt wurde. Dabei war das Ziel, die Präzision der Ergebnisse möglichst zu erhöhen. Hierfür wurden verschiedene Methoden angewandt. So wurden Messungen durchgeführt, bei denen alle verfügbaren GNSS-Systeme verwendet wurde, aber auch Messungen, bei denen gewisse Konstellationen von Satelliten ausgeschlossen wurden.

### 4.5.1 Positionsbestimmung mit allen verfügbaren Systemen

In einer ersten Messung wurde die Antenne so konfiguriert, dass sie alle verfügbaren GNSS-Systeme zur Bestimmung der Position verwendet. In den Einstellungen wurden hierbei keine Filter angewandt, welche die Bildung einer Lösung bei gewissen Konstellationen der Satelliten ausschließen. Es wurden die GNSS-Systeme Galileo, GPS, GLONASS und Beidou verwendet. Die Messung wurde über drei Tage durchgeführt, es kam jedoch nach ca. anderthalb Tagen zum Abbruch der Datennahme aufgrund eines vollgelaufenen Zwischenspeichers. Dies lag an einem internen Problem der verwendeten Software u-center zum Aufzeichnen der Daten und trat auch in späteren Messungen wieder auf. Das Problem ist bereits bei anderen Nutzern bekannt, kann jedoch nicht einfach behoben werden. Nach drei Tagen wurde die Datennahme beendet und die Daten wurden ausgewertet. Abbildung 15 zeigt den graphischen Verlauf der x-Koordinate des Empfängers.

In der graphischen Darstellung der Koordinaten wird im Histogramm der absolute Wert der bestimmten x-Koordinate angegeben, während im zeitlichen Verlauf nur ein relativer Abstand zu einem willkürlich festgelegtem Referenzpunkt angegeben wird. Die lange Gerade im zeitlichen Verlauf zwischen den Zeitpunkten 22.05, 04:54 und 23.05, 12:19 beschreibt den Zeitraum, in dem aufgrund des Speicherfehlers keine Daten von der Antenne aufgenommen wurden. Im Verlauf der Messung schwankt die x-Koordinate der Antenne immer wieder um einige Meter.

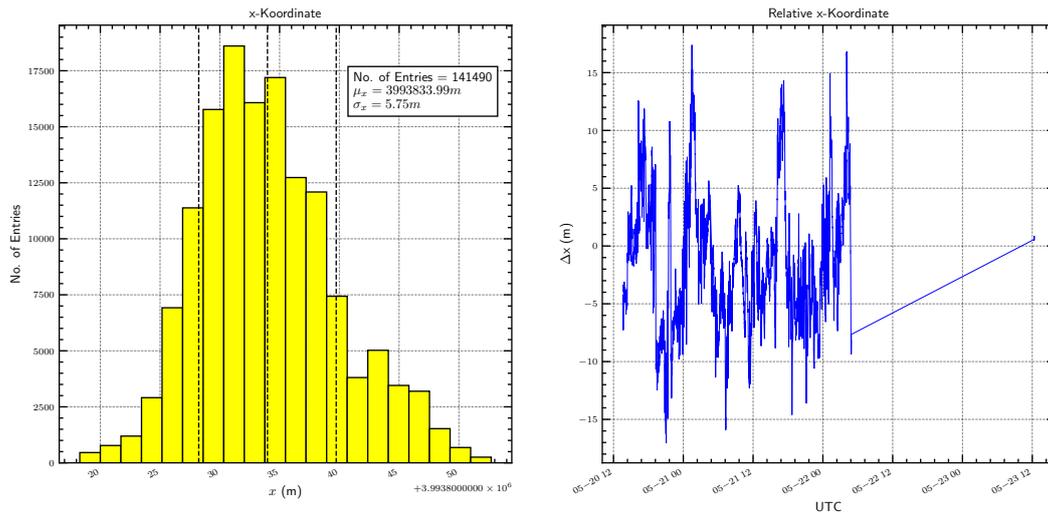


Abbildung 15: Histogramm und zeitlicher Verlauf der x-Koordinate bei der ersten Messung.

Dieses Verhalten kann auch bei den anderen Koordinaten festgestellt werden, s. Abb. 16 und 17.

Die Breiten der Verteilungen sind für alle drei Koordinaten ähnlich und liegen im Bereich von etwa 3 m bis 6 m. Auch die zeitlichen Verläufe weisen in allen drei Koordinaten Ähnlichkeiten auf. So können beispielsweise Ausreißer in allen drei Graphen zu ähnlichen Zeiten beobachtet werden. Eine genauere Analyse solcher Muster erfolgt in einem späteren Kapitel. Eine Positionsbestimmung mit dieser Genauigkeit ist jedoch nicht ausreichend, um ein Timing im Nanosekundenbereich zu realisieren. Deshalb wurden weitere Messungen durchgeführt, in denen die Einstellungen der Antenne verändert wurden.

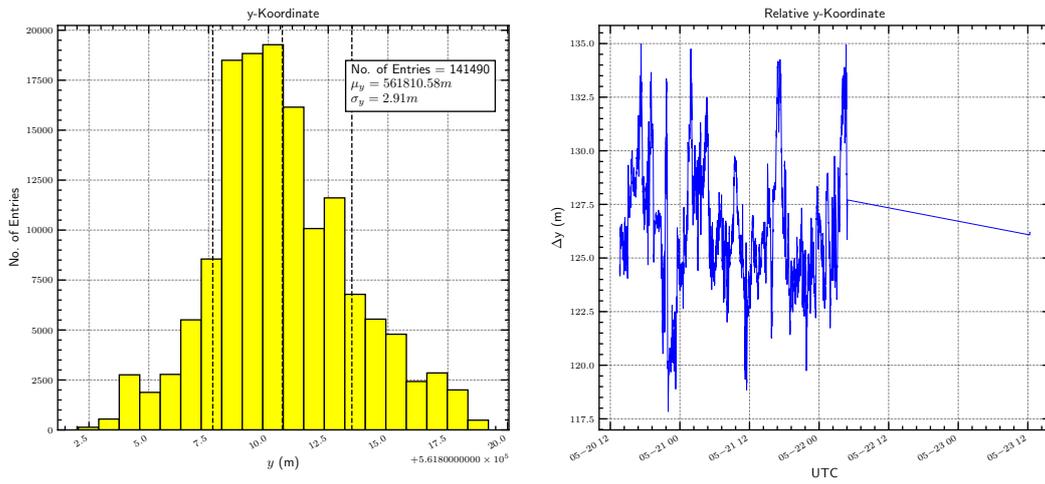


Abbildung 16: Histogramm und zeitlicher Verlauf der y-Koordinate bei der ersten Messung.

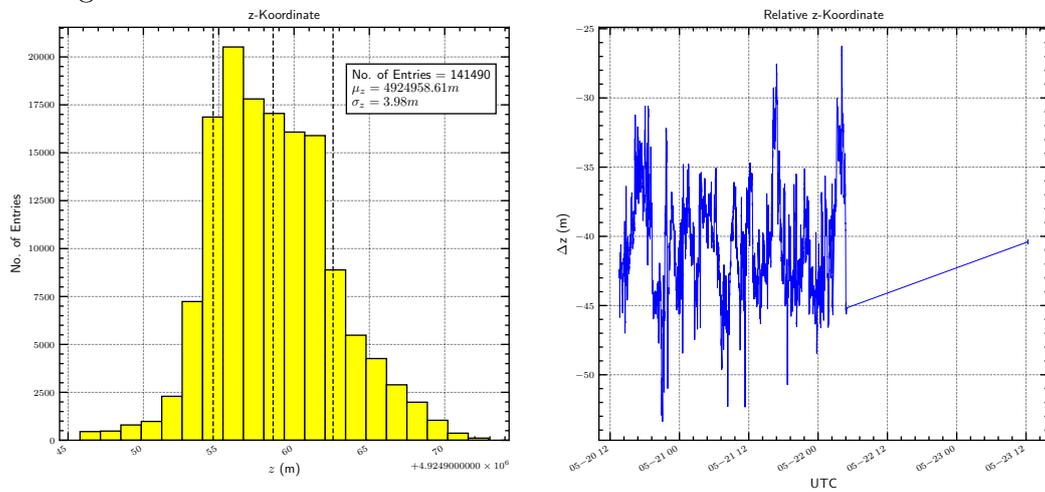
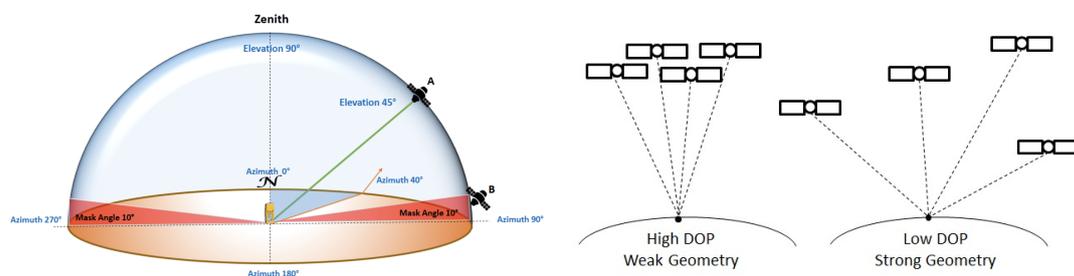


Abbildung 17: Histogramm und zeitlicher Verlauf der z-Koordinate bei der ersten Messung.

### 4.5.2 Positionsbestimmung mit allen verfügbaren Systemen und voreingestellten Filtern

Um zu überprüfen, ob die Genauigkeit der Positionsbestimmung verbessert werden kann, wurde eine weitere Messung mit den Systemen Galileo, GPS, GLONASS und Beidou durchgeführt. Zuvor wurden jedoch Änderungen an der Konfiguration der Antenne vorgenommen. Es wurden zwei Filter eingestellt, welche gewisse Lösungen nicht zulassen. Zum einen wurden nur Satelliten zugelassen, deren Elevationwinkel mehr als  $15^\circ$  betrug. Der Elevationwinkel gibt an, wie hoch die Satelliten über dem Horizont stehen. Der Wert des Winkels wird im *ENU*-System, s. Kap. 4.3, angegeben. Um eine Störung des Empfangs durch umstehende Bäume, sowie sich in der Umgebung befindende Berge zu vermeiden und eine freie Sicht auf die Satelliten zu gewährleisten, wurde ein minimaler Elevationwinkel festgelegt.



(a) Elevation- und Azimutwinkel [31]      (b) Satellitengeometrie und PDOP Wert [32]

Abbildung 18: Geometrische Parameter zur Bestimmung der Qualität einer Lösung.

Neben dem Winkelfilter wurde ein weiterer, ebenfalls geometrischer Filter, eingestellt. Hierbei wurde der PDOP (Position Dilution of Precision) Wert beschränkt. Dieser Wert beschreibt die Geometrie der Satelliten am Himmel. Es handelt sich dabei um eine dimensionslose Größe, die antiproportional zum Volumen ist, welches vom Empfänger und den verwendeten Satelliten aufgespannt wird. Er dient als Parameter zur Quantifizierung der Qualität und Präzession einer Lösung. Dabei steht ein hoher PDOP Wert für eine schlechte und ein niedriger PDOP Wert für eine gute Geometrie der Satellitenkonfiguration. Bei der Messung mit voreingestelltem PDOP Filter wurde dieser auf einen Wert von  $\leq 1,5$  gesetzt. Im Allgemeinen werden PDOP Werte von  $\geq 7$  als schlecht gewertet.

Diese zweite Messung lief über knapp 6 Tage. Dabei kam es nicht, wie bei der Messung zuvor, zu einer Unterbrechung der Datenaufnahme durch einen Speicherfehler. Ein möglicher Grund dafür, dass nicht jede Sekunde ein Messpunkt genommen wurde, liegt bei den Filtern. Diese sorgen dafür, dass eine Lösung nur gebildet wird, wenn beide Kriterien (minimaler Elevationwinkel und Begrenzung des PDOP Werts) erfüllt sind.

Die Ergebnisse der Messung zeigen, dass die Einstellung der Filter keine signifikante Verbesserung der Präzision mit sich brachten. Der zeitliche Verlauf der x-Koordinate

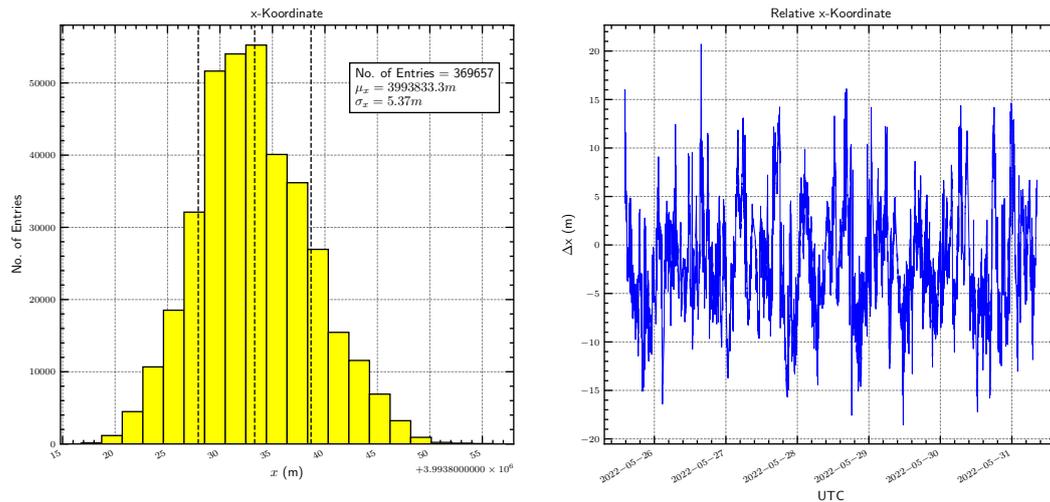


Abbildung 19: Histogramm und zeitlicher Verlauf der x-Koordinate bei der zweiten Messung.

enthält ähnliche Spitzen wie der der ersten Messung. Auch die Breite der Verteilung ist durch die Filter nur minimal gesunken und liegt weiterhin für alle Koordinaten im Bereich von ca. 3 m bis 6 m.

Aus diesen Messungen lässt sich schließen, dass sowohl die Beschränkung des PDOP-Wertes, als auch die Festlegung eines minimalen Elevationwinkels, nicht die Hauptursache für die geringe Präzision der Ergebnisse war. Andere Effekte haben also vermutlich einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Messung. Im Verlauf der Arbeit sollen daher weitere Ansätze überprüft und analysiert werden.

### 4.5.3 Anpassung der verwendeten Satellitensysteme

Ein weiterer Versuch, die Genauigkeit der Positionsbestimmung zu verbessern, lag darin, die Anzahl der verwendeten Satellitensysteme einzuschränken. Hierfür wurden zunächst Messungen, nur mit den Systemen Galileo und GPS durchgeführt. Später wurde die Zahl der verwendeten Systeme noch weiter reduziert und es wurden nur noch GPS Satelliten zur Bestimmung der Position verwendet. Dabei wurde überprüft, welche Konfiguration die genauesten Ergebnisse liefert.

### Messungen mit den Systemen Galileo und GPS

Zunächst wurden drei Messungen zur Bestimmung der Position mit beiden Systemen durchgeführt. Die Messdauer lag jeweils bei etwa 24 h. Die Messungen wurden im Abstand von mehreren Tagen durchgeführt, die Position der Antenne jedoch währenddessen nicht verändert, um die Bedingungen bei allen drei Messungen möglichst gleich zu halten. Anschließend wurden die Ergebnisse der Messungen ausgewertet und miteinander verglichen. Abbildung 20 und Abbildung 21 zeigen die Histogramme der Messungen im Vergleich, sowie eine Überlagerung der zeitlichen

Verläufe der Messungen. Die Koordinaten sind wieder am Abstand zum zuvor gewählten Referenzpunkt angegeben.

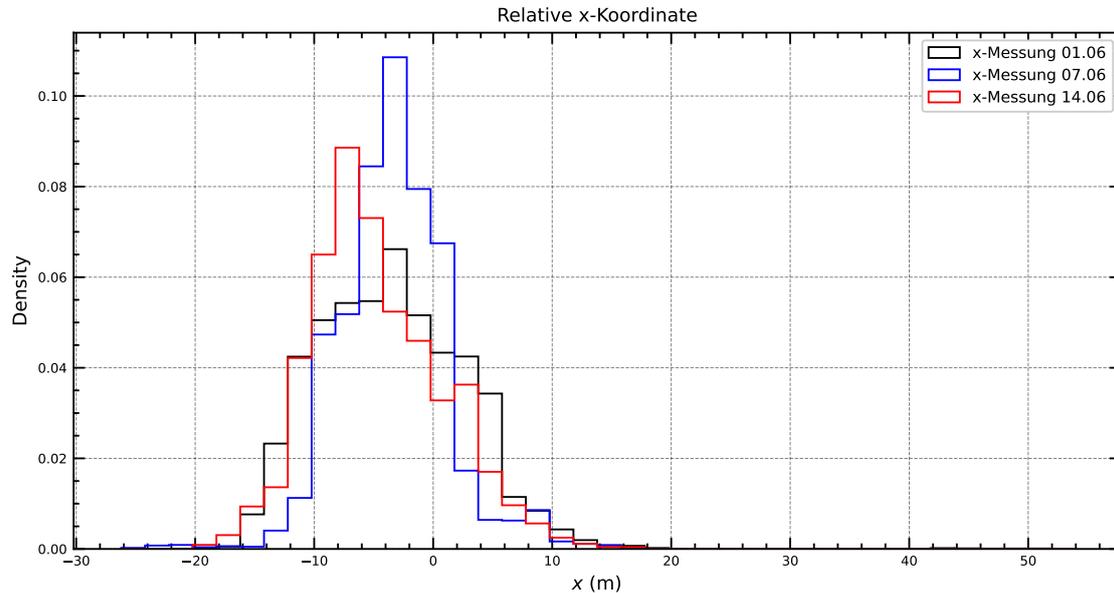


Abbildung 20: Histogramm der Messungen der x-Koordinate mit den Systemen Galileo und GPS.

Die Ergebnisse der Messungen liegen über große Zeiträume der Messdauer im Bereich von wenigen Metern beieinander, jedoch gibt es immer wieder Zeitpunkte, an denen einzelne Messpunkte stark von den anderen abweichen, vgl. Abb. 21. Dies deutet darauf hin, dass es hier zu Problemen beim Bilden der Lösung kam, die bisher noch nicht verstanden sind. Solche starken Abweichungen konnten auch in darauffolgenden Messungen beobachtet werden und wurden daraufhin genauer analysiert.

Ein Vergleich der Mittelwerte der drei Messungen zeigt, dass diese sich alle im  $1\sigma$ -Bereich überschneiden, vgl. Abb. 22. Ebenfalls liegen die Ergebnisse der Messungen nur wenige Meter von denen der Messung mit allen Systemen, sowie der Messung mit voreingestellten Filtern, entfernt.

Der Vergleich der Messungen zeigt jedoch auch, dass es durch die Verwendung von nur zwei Systemen nicht zu einem signifikanten Unterschied in der Genauigkeit der Messung kam, denn die Standardabweichungen der einzelnen Messungen liegen weiterhin im Bereich von 2 m bis 6 m.

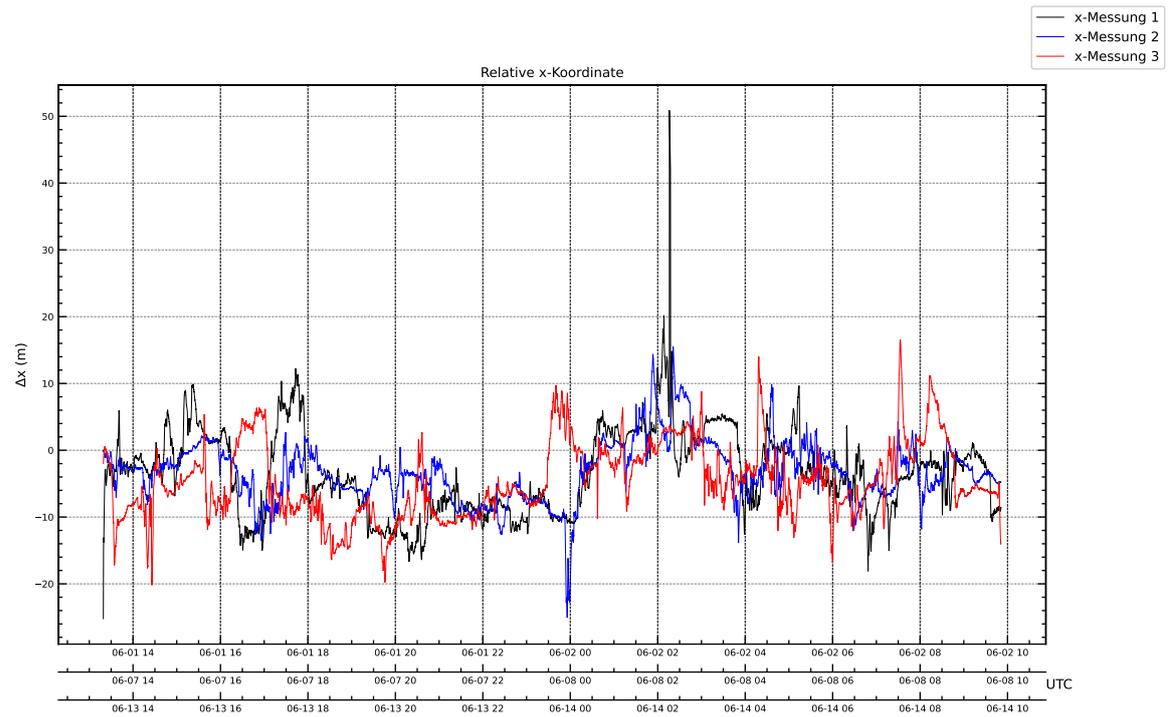


Abbildung 21: Zeitlicher Verlauf der Messungen der x-Koordinate mit den Systemen Galileo und GPS.

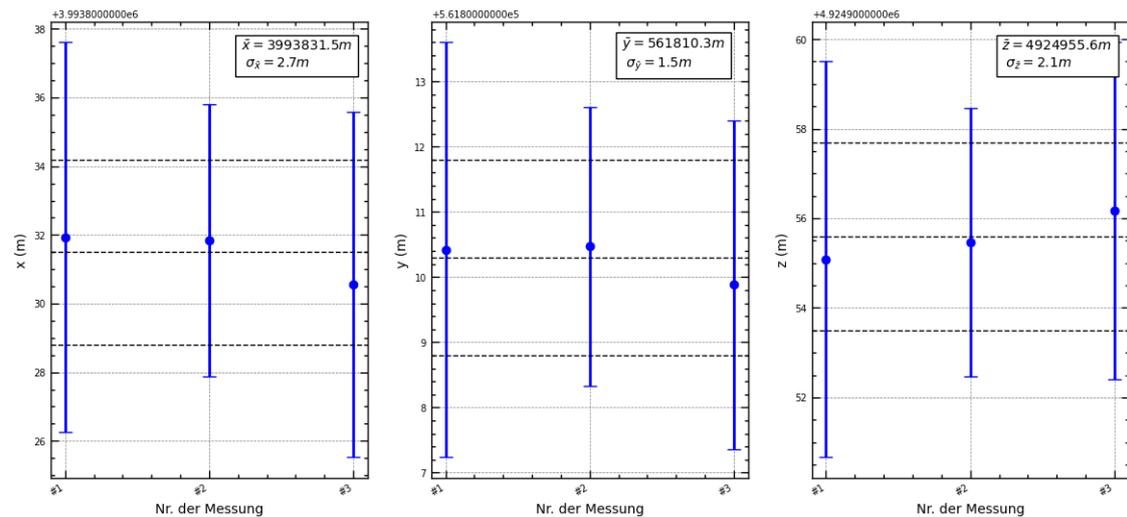


Abbildung 22: Vergleich der Messungen mit den Systemen Galileo und GPS, die gestrichelten Linien zeigen den gewichteten Mittelwert der Messungen, sowie dessen Fehler.

### Messungen nur mit GPS

Für weitere Messungen wurde das Galileo System ebenfalls deaktiviert und nur noch GPS verwendet. Hiermit wurden zwei Messungen durchgeführt, die zur genaueren Analyse der starken Sprünge in den Verläufen der Koordinaten dienen sollten. Um die Genauigkeit der Messung zu erhöhen, wurde zusätzlich zu GPS ein weiteres Satellitensystem verwendet, dessen Aufgabe es ist, Korrekturdaten an den Empfänger zu senden. Dabei handelt es sich um ein sogenanntes SBAS (Satellite-based Augmentation System) [33]. SBAS ist ein Erweiterungssystem und arbeitet mit geostationären Satelliten. Die Besonderheit an geostationären Satelliten besteht darin, dass ihre Umlaufbahn an die Erdrotation gebunden ist. Sie befinden sich also im Idealfall immer an der selben Position über der Erdoberfläche. Sie liefern dem Empfänger verschiedene Daten zur Korrektur der Position. Die Korrekturdaten können in drei verschiedene Arten aufgeteilt werden:

- 1) Schnelle Korrekturen, zuständig für kurzzeitige Störungen der GPS-Signale;
- 2) Langfristige Korrekturen, sie beinhalten Probleme der Atomuhren auf den Satelliten oder übertragen Fehler in den Umlaufbahnen;
- 3) Ionosphärische Korrekturen, welche Informationen über die Aktivität der Ionosphäre und dadurch bedingte Laufzeitfehler enthalten.

In Europa ist das SBAS EGNOS aktiv [34]. Es besteht aus drei solcher geostationären Satelliten, von denen sich jedoch einer seit 2020 zunächst in einer Testphase befindet, und einem Netzwerk von Bodenstationen. EGNOS steht Nutzern in Europa seit dem Jahr 2009 zur Verfügung und soll dabei helfen, die von GPS Satelliten bestimmte Positionsgenauigkeit zu verbessern. Um die Signale der SBAS Satelliten zu empfangen, ist eine freie Sicht in Richtung Süden notwendig. Dies ist am Ort der Antenne auf dem Flachdach gegeben.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei jeweils länger als 24 h laufende Messungen zur Positionsbestimmung der GNSS-Antenne mit dem System GPS und zusätzlichen Korrekturen durch EGNOS Satelliten durchgeführt. Dabei wurde die Antenne zunächst auf ihrer Position etwa 3 m von der Wand entfernt stehen gelassen. In einer zweiten Messung wurde die Position der Antenne verändert, und sie wurde näher an der Wand des Gebäudes platziert. Dabei sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Nähe zum Gebäude und die möglichen Reflexionen der Wände auf die Messgenauigkeit haben.

Abbildung 23 zeigt den Verlauf der x-Koordinate für die erste Messung, bei der sich die Antenne noch von der Wand entfernt befand.

Der Mittelwert der Messung ergab sich zu

$$\mu_x = (3993839,4 \pm 11,2)\text{m}$$

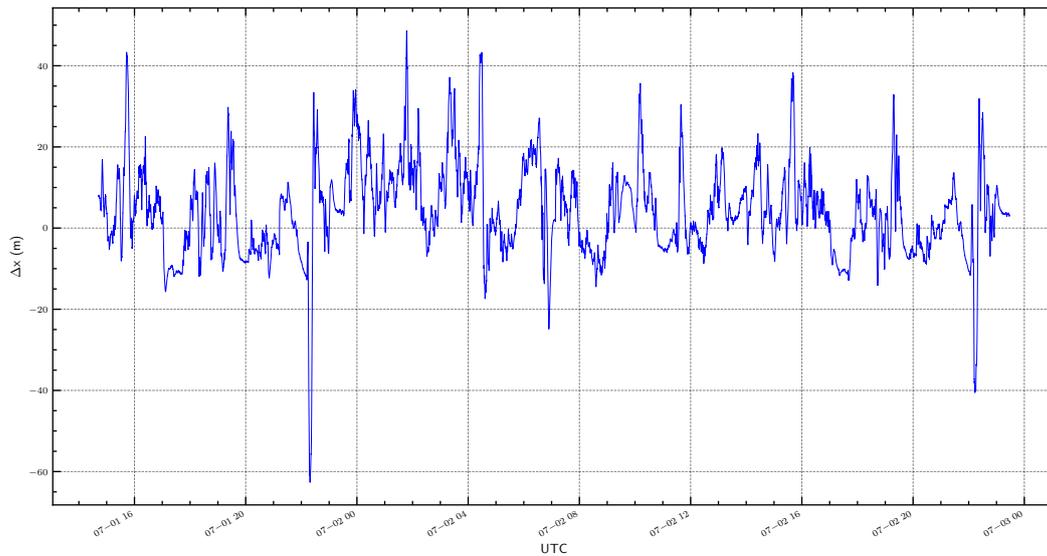


Abbildung 23: Zeitlicher Verlauf der x-Koordinate bei der ersten Langzeitmessung mit den Systemen GPS und SBAS.

und weicht damit um etwa  $\Delta x = 8$  m von den zuvor bestimmten Mittelwerten ab. Innerhalb der Fehler stimmen die Messwerte jedoch miteinander überein, denn die Standardabweichung der Messung ist im Vergleich zu den vorherigen Messungen etwa doppelt so groß. Auch die Anwendung eines Filters auf die Messdaten, so dass nur diejenigen Lösungen zugelassen wurden, deren PDOP-Wert höchstens 5,0 betrug, führte lediglich zu einer Veränderung der Standardabweichung im Zentimeterbereich und somit zu keiner signifikanten Verbesserung des Ergebnisses. Besonders auffällig ist jedoch bei dieser Messung, dass im zeitlichen Verlauf der Koordinaten gewisse Strukturen auftauchen, die sich nach einiger Zeit wiederfinden lassen. Betrachtet man den Bereich vom 01.07. zwischen 19:00 und 23:00 und vergleicht diesen mit dem selben Zeitraum am 02.07., so stellt man fest, dass sich der zeitliche Verlauf in beiden Bereichen sehr ähnlich verhält. Insbesondere fallen die beiden Spitzen in der Messung auf, die sich etwa zur selben Zeit an beiden Tagen ereignen. Aber auch andere Strukturen im selben Zeitraum lassen vermuten, dass es sich hierbei um einen systematischen Effekt handelt. Ein Zoom in den Bereich der ersten Spitze am 01.07. zeigte, dass diese sich um etwa 22:15 ereignete und insgesamt eine Dauer von mehr als 10 Minuten hat. Dabei sank der Wert der x-Koordinate zunächst von 22:14 bis 22:19 um circa 59 m. Anschließend stieg er bis etwa 22:27 um 96 m. Dies ergibt eine Änderungsrate auf der fallenden Flanke von  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx -22 \text{ cm s}^{-1}$  und auf der steigenden Flanke von  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx 20 \text{ cm s}^{-1}$ . Die Spitze am zweiten Tag ereignete sich zwischen 22:07 und 22:22. Hier fiel der Wert der x-Koordinate zunächst von 22:07 bis 22:13 um 46,3 m mit einer Rate von  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx 12 \text{ cm s}^{-1}$ . Anschließend stieg er wieder bis 22:22 um etwa 72,5 m mit einer Rate von  $\frac{\Delta x}{\Delta t} \approx 13,5 \text{ cm s}^{-1}$ .

Die Struktur dieser Spitzen ist ähnlich, jedoch weichen die absoluten Werte der

Veränderung in diesen Bereichen sowie die absolute Position voneinander ab. Auch im Verlauf der y- und z-Koordinate ließen sich im selben Zeitraum ähnliche Strukturen beobachten, die ebenfalls am nächsten Tag erneut auftraten.

Des Weiteren wurde bei dieser Messung aufgrund der auffallenden Sprünge in den Koordinaten eine weitere Untersuchung durchgeführt. Dabei wurde jeweils die Differenz der Werte der Koordinaten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Lösungen gebildet und in einem Histogramm aufgetragen.

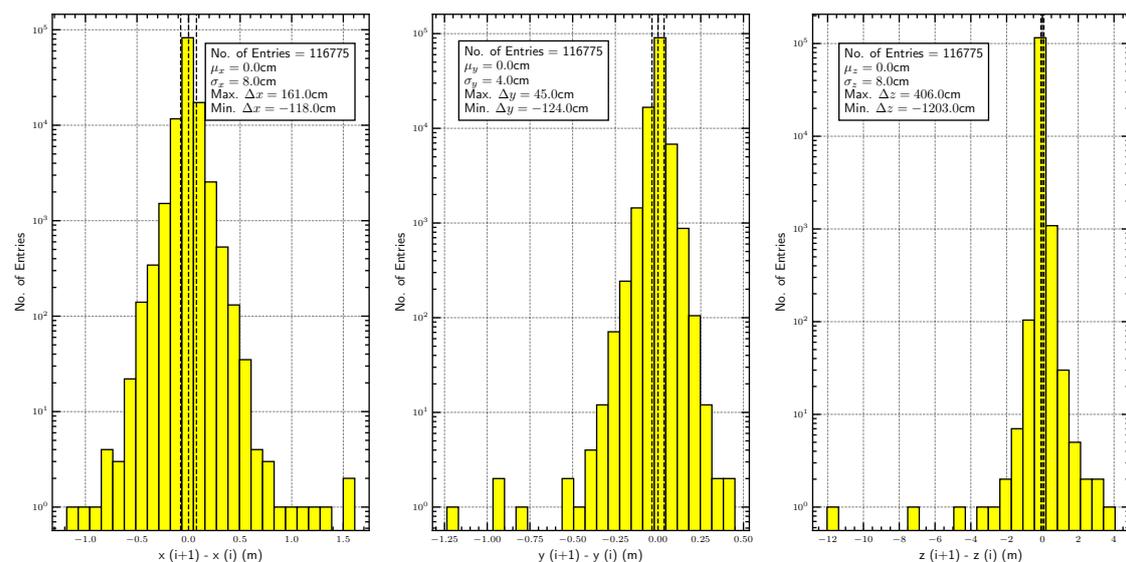


Abbildung 24: Histogramme der Differenzen zweier aufeinanderfolgender Lösungen.

Es stellte sich heraus, dass die Verteilungen aller drei Koordinaten um einen Mittelwert von 0 cm liegen. Ihre Standardabweichungen betragen jeweils 4 cm beziehungsweise 8 cm. Auffällig ist jedoch, dass es in allen drei Koordinaten Ausreißer von bis zu mehreren Metern gibt, insbesondere in der z-Koordinate. Ursache dieser Ausreißer sind möglicherweise kurzzeitige Störungen der Signale oder Reflexionen, da diese nur in sehr geringer Anzahl auftauchen.

Bei der zweiten Messung wurde die Position der Antenne verändert. Sie wurde hierfür näher an das Gebäude gebracht, so dass ihr Abstand zur Wand nur wenige Zentimeter betrug. Diese Messung dauerte etwa 33 h, bevor es erneut zu einem Abbruch der Datennahme aufgrund eines Speicherfehlers kam. Abbildung 25 zeigt den zeitlichen Verlauf dieser Messung.

Trotz der nur wenigen Meter Verschiebung der Antenne ( $\leq 3$  m) erkennt man im Vergleich zur vorangegangenen Messung, dass sich der Wert der x-Koordinate im Mittel deutlich nach unten verschoben hat. Der Mittelwert der Messung beträgt

$$\mu_x = (3993826,0 \pm 16,8)\text{m}$$

und weicht somit knapp 13 m von der vorherigen Messung ab. Betrachtet man jedoch die im Vergleich zur vorherigen Messung um mehr als 5 m gestiegene

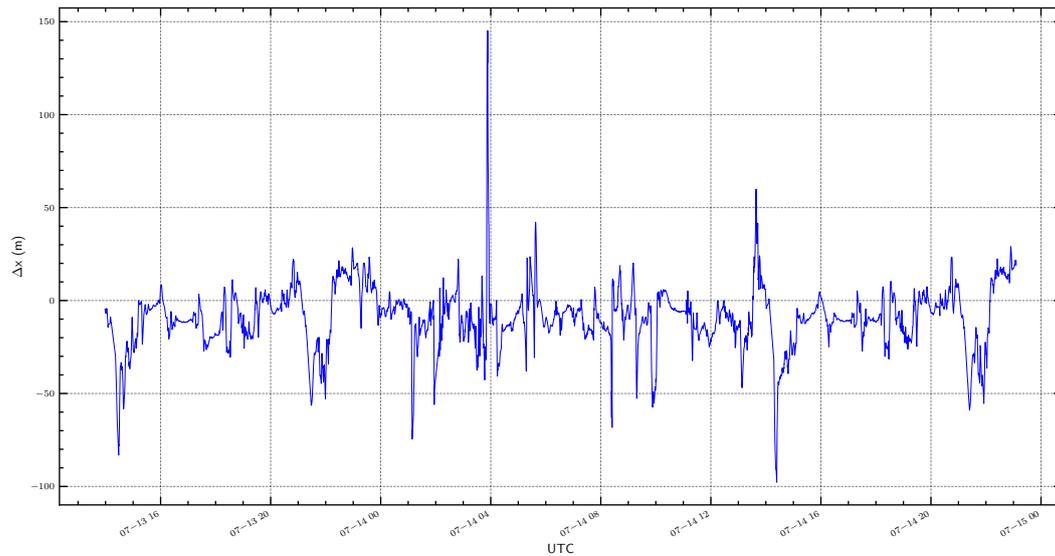


Abbildung 25: Zeitlicher Verlauf der zweiten Messung mit GPS und SBAS.

Standardabweichung, so stimmen beide Messungen immer noch im  $1\text{-}\sigma$  Bereich überein und können im Rahmen der Messgenauigkeit nicht unterschieden werden. Auch die Mittelwerte von  $y$ - und  $z$ -Koordinate unterschieden sich um mehrere Meter, jedoch nicht so viel wie die  $x$ -Koordinate. Auch sie stimmen im  $1\text{-}\sigma$  Bereich überein. Die Messung zeigt also, dass es eine Änderung sowohl im absoluten Wert der Position, als auch in der Standardabweichung gibt. Im Rahmen der Messgenauigkeit können die Messungen jedoch nicht klar getrennt werden. Trotzdem lässt sich anhand der höheren Standardabweichung schließen, dass die Nähe zum Gebäude einen starken Einfluss auf die Präzision der Messung hat, was schon anhand des eingeschränkten Sichtfeldes der Antenne zu erwarten war.

Ähnlich wie bei der Messung zuvor lassen sich auch hier im zeitlichen Verlauf der Koordinaten immer wieder Muster erkennen, welche zu späteren Zeitpunkten erneut auftauchen. Im folgenden Abschnitt sollen diese Muster hinsichtlich zeitlicher Korrelationen sowie möglicher Ursachen genauer untersucht werden.

## 4.6 Zeitliche Korrelationen in den Messungen mit GPS und SBAS

In den beiden Messungen mit den Systemen GPS und SBAS war in mehreren Zeiträumen ein Muster zu erkennen, welches sich am Folgetag in ähnlicher Weise wiederholte. Aufgrund dieser Auffälligkeiten wurde eine Zeitanalyse der beiden Messungen durchgeführt, in der zunächst der Abstand zwischen den Mustern genauer bestimmt werden sollte. Durch die Betrachtung der zeitlichen Verläufe wurden zunächst die Zeiträume bestimmt, in denen Übereinstimmungen in den Mustern erkennbar waren. Anschließend wurde mit der Methode der Cross-Correlation die Zeitdifferenz zwischen den sich wiederholenden Mustern bestimmt.

### Die Methode der Cross-Correlation

Die Cross-Correlation [35] ist eine Methode aus der Signalanalyse und beschreibt die Korrelation zweier zeitlich gegeneinander verschobener Signale. Sie kann ebenfalls als Maß für die Ähnlichkeit zweier Signale verstanden werden. Mathematisch gesehen ist die Cross-Correlation für diskrete Signale, wie sie hier bei der Messung der Position vorkommen, wie folgt definiert:

$$R_{xy}[k] = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x[m]y[m-k]. \quad (17)$$

Dabei bezeichnet  $x[m]$  den  $m$ -ten Messpunkt des Signals  $x$  und  $k$  die Verschiebung der Signale zueinander. Die Cross-Correlation ist also eine Funktion der Verschiebung  $k$  zwischen den zwei Signalen. Ihr Maximum liegt an dem Punkt, an dem die Korrelation der beiden Signale maximal ist.

Diese Methode ist also dafür geeignet, die zuvor beobachteten Muster hinsichtlich ihrer zeitlichen Verschiebung zu untersuchen, um die Periodizität zu bestimmen. Die Cross-Correlation wurde dabei derart normiert, dass ihr Maximum gerade bei einem Wert von 1 liegt. Es gilt also

$$R_{xy}^{\text{norm.}}[k] = \frac{R_{xy}[k]}{\max(R_{xy}[k])}. \quad (18)$$

### Bestimmung der zeitlichen Verschiebung zwischen den Mustern

Die Zeitfenster, in denen die Messungen Übereinstimmungen zeigen, wurden zunächst durch Vergleichen bestimmt und ausgeschnitten. Anschließend wurde die Methode der Cross-Correlation auf diese Zeiträume angewandt. In der ersten Messung vom 01.07. bis 03.07. konnten im Zeitraum 19:00 - 23:00 am 01.07. und am 02.07. ähnliche Muster entdeckt werden. Abbildung 26 zeigt die Ausschnitte der beiden Tage sowie die Cross-Correlation zwischen den Signalen.

In der Überlagerung der beiden Verläufe sind eindeutige Spitzen und Täler nahezu identischer Form zu erkennen. Der untere Graph zeigt die Cross-Correlation in Abhängigkeit der Zeitverschiebung in Sekunden. Da es sich bei den Kurven um zwei aufeinanderfolgende Tage handelt, bedeutet eine Zeitverschiebung von 0 Sekunden, dass sich ein Muster nach genau 24 h wiederholt. Die Cross-Correlation ist derart normiert, dass ihr Maximum gerade 1 beträgt. Es lässt sich ein eindeutiges Maximum als scharfen Peak erkennen. Das Maximum liegt bei einer Zeitverschiebung von  $-278$  s, was bedeutet, dass sich die Muster nach 23 h, 55 min und 21 s wiederholen. Ähnliche Muster, die bei der zweiten Messung beobachtet werden konnten, sind mit der selben Methode analysiert worden. Hier wurden im Zeitfenster von 15:00 bis 23:00 sich wiederholende Strukturen entdeckt. Diese wurden ebenfalls hinsichtlich ihrer Korrelation mit der Cross-Correlation Methode untersucht, um die zeitliche Verschiebung zu ermitteln.

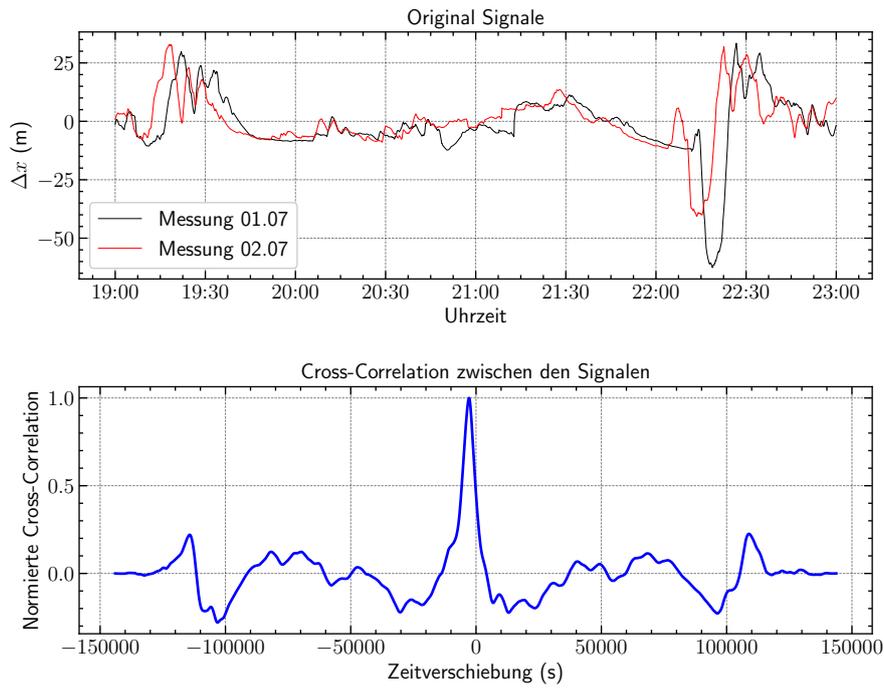


Abbildung 26: Korrelation zwischen den beiden Verläufen der x-Koordinaten in der ersten Messung mit GPS und SBAS.

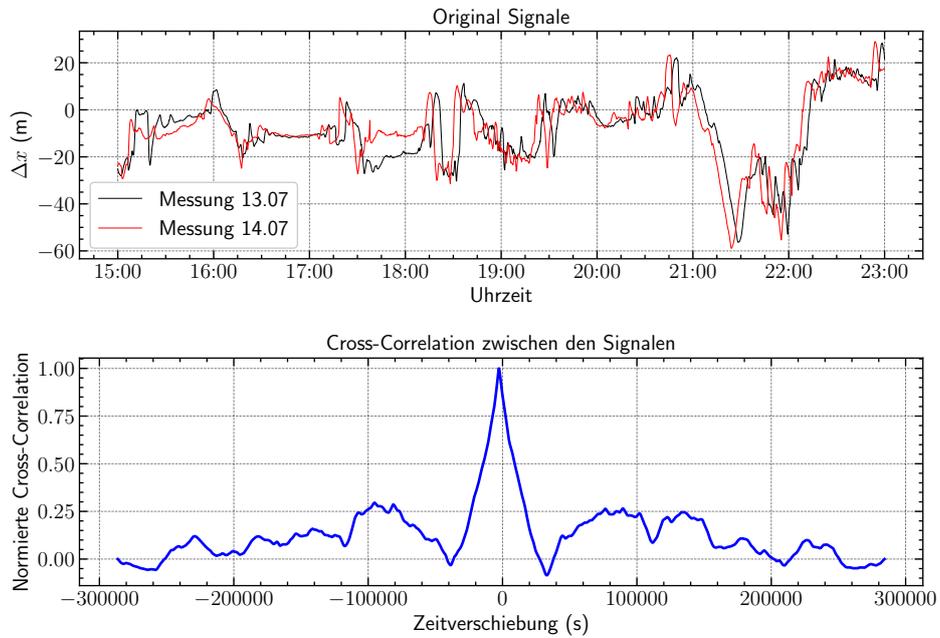


Abbildung 27: Korrelation zwischen den beiden Verläufen der x-Koordinaten in der zweiten Messung mit GPS und SBAS

Erneut ist ein Peak in der Cross-Correlation zu erkennen. Dieser ist jedoch im Vergleich zur ersten Messung deutlich breiter. Das Maximum liegt diesmal bei einer Zeitverschiebung von  $-272$ s, also wiederholen sich die Muster bei dieser Messung nach 23 h, 55 min und 28 s. Die Periodendauer stimmt also, bis auf wenige Sekunden, mit der der ersten Messung überein.

Um eine Ursache für das Verhalten der zeitlichen Verläufe zu finden, wurde der Fokus zunächst einmal im entsprechenden Zeitraum der Messung vom 13.07. und 14.07. auf die Verteilung der Satelliten am Himmel gelegt. Ein Vergleich der PDOP Werte an beiden Tagen, welcher repräsentativ für die Geometrie der Satellitenkonstellation steht, zeigte ebenfalls Muster, welche sich wiederholten. Außerdem lag der Wert zu

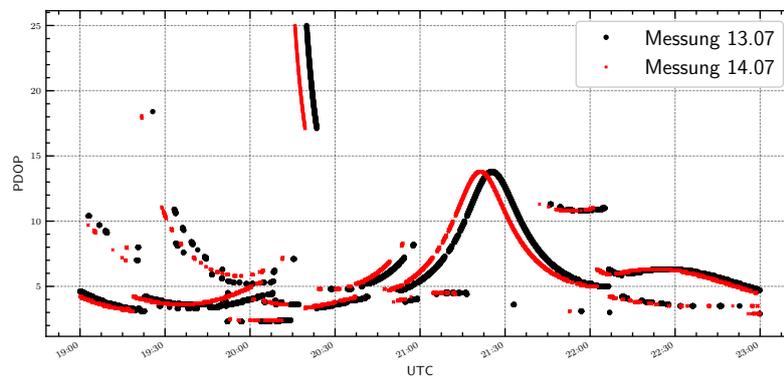


Abbildung 28: PDOP Werte an den beiden Messtagen im Vergleich.

vielen Zeiten deutlich höher, als es für eine gute Geometrie der Satelliten notwendig ist. Abbildung 28 zeigt den Verlauf des PDOP Wertes im entsprechenden Zeitraum. Das Verhalten des PDOP Wertes legt also nahe, dass die Ursache der Korrelationen in den Positionen der Satelliten liegt. Diese Vermutung wurde anschließend genauer untersucht.

### Vergleich der Satellitenpositionen

Durch die Nähe zum Gebäude, sowie umstehende Bäume, liegt ein großer Teil des Himmels nicht im direkten Sichtfeld der Antenne. Freie Sicht liegt hauptsächlich in Richtung Süden vor. Das Sichtfenster umfasst etwa  $150^\circ$  des Azimutwinkels und liegt im Bereich  $\lambda \in [100^\circ, 250^\circ]$ . Dabei ist der Winkel  $\lambda$  im ENU-Koordinatensystem angegeben, das heißt  $\lambda = 0^\circ$  zeigt in Richtung Norden und  $\lambda = 180^\circ$  in Richtung Süden. In Richtung Norden ist der Himmel durch das Gebäude verdeckt, und verhindert so die direkte Sicht auf die Satelliten.

Exemplarisch für die erste Messung zeigt Tabelle 1 die Positionen der verwendeten Satelliten am Himmel zu ausgewählten Zeitpunkten. Dabei wurden insbesondere Zeitpunkte gewählt, an denen der zeitliche Verlauf der x-Koordinate starke Schwankungen aufwies. Rot markiert sind diejenigen Satelliten, deren Position so liegt, dass sie sich nicht im direkten Sichtfeld der Antenne befinden.

Datum Uhrzeit	SV's	G2	G4	G6	G7	G9	G11	G20	G30
1.7.2022 19:21:00	$\varphi, \lambda$	42, 282	27, 71	42, 216	54, 165	62, 69	48, 276	38, 300	28, 191
2.7.2022 19:17:00	$\varphi, \lambda$	42, 282	27, 71	42, 216	54, 165	62, 69	48, 276	38, 300	28, 191
1.7.2022 19:26:00	$\varphi, \lambda$	42, 279	25, 72	40, 215	56, 164	59, 70	48, 272	40, 300	30, 191
2.7.2022 19:22:00	$\varphi, \lambda$	42, 279	25, 72	40, 215	56, 164	60, 70	48, 272	40, 300	30, 191
1.7.2022 19:28:00	$\varphi, \lambda$	42, 278	25, 72	39, 214	57, 163	59, 71	48, 271	40, 300	31, 191
2.7.2022 19:24:00	$\varphi, \lambda$	42, 278	24, 72	39, 214	57, 163	59, 71	48, 270	40, 300	31, 191
1.7.2022 21:31:00	$\varphi, \lambda$	56, 284	52, 63	10, 100	11, 219	41, 280	28, 151	58, 214	79, 110
2.7.2022 21:27:00	$\varphi, \lambda$	56, 284	52, 63	10, 100	11, 219	41, 280	27, 151	58, 214	80, 111
1.7.2022 22:18:00	$\varphi, \lambda$	58, 242	32, 64	61, 292	47, 137	25, 294	38, 197	62, 69	
2.7.2022 22:13:00	$\varphi, \lambda$	58, 243	32, 64	60, 292	46, 137	25, 294	38, 198	62, 69	
1.7.2022 22:26:00	$\varphi, \lambda$	56, 236	28, 65	65, 294	50, 132	29, 295	34, 196	59, 68	
2.7.2022 22:22:00	$\varphi, \lambda$	56, 236	28, 64	65, 294	50, 132	29, 295	34, 196	58, 68	
1.7.2022 22:29:00	$\varphi, \lambda$	55, 234	27, 65	66, 295	50, 131	30, 295	32, 195	57, 68	
2.7.2022 22:25:00	$\varphi, \lambda$	55, 233	27, 65	66, 295	51, 131	30, 295	32, 196	57, 68	
1.7.2022 22:34:00	$\varphi, \lambda$	54, 230	25, 65	68, 296	52, 128	32, 295	30, 195	55, 68	
2.7.2022 22:30:00	$\varphi, \lambda$	54, 230	25, 66	68, 296	52, 128	32, 295	30, 195	55, 68	

Tabelle 1: Positionen der verwendeten Satelliten in der ersten Messung mit GPS und SBAS an ausgewählten Zeitpunkten, die Winkel  $\varphi$  und  $\lambda$  sind dabei im ENU-Koordinatensystem angegeben. Der Winkel  $\varphi$  entspricht dem Elevationwinkel und der Winkel  $\lambda$  dem Azimutwinkel.

Eine Ursache dafür, dass sie trotzdem zum Bilden der Lösung verwendet wurden, könnte darin liegen, dass die Signale aufgrund von Reflexionen dennoch zur Antenne gelangt sind. Durch die Reflexionen kommt es jedoch zu einer Verfälschung der Laufzeit des Signals, welche verlängert erscheint und somit keine korrekte Angabe liefert. Dies führt im Anschluss zu falschen Berechnungen der Position der Antenne. Auffällig ist bei der Betrachtung der Positionen im Vergleich der beiden Tage außerdem, dass bei allen exemplarisch gewählten Punkten die verwendeten Satelliten sowie deren Positionen bis auf eine Abweichung von maximal  $1^\circ$  übereinstimmen. Die Untersuchung zeigt also eindeutig einen Zusammenhang zwischen den Spitzen im Koordinatenverlauf und den Positionen der Satelliten am Himmel.

Dasselbe Verhalten konnte auch bei der zweiten Messung nachgewiesen werden. Hier stimmten ebenfalls die verwendeten Satelliten sowie deren Positionen an den gewählten Zeitpunkten überein. Außerdem lag auch hier in allen Fällen jeweils mindestens ein Satellit außerhalb des Sichtfeldes.

Es kommt hinzu, dass in der zweiten Messung an den untersuchten Zeitpunkten insgesamt weniger Satelliten verwendet wurden, als bei der ersten Messung. So war es bei der Hälfte der untersuchten Zeitpunkte der Fall, dass insgesamt nur vier Satelliten zum Bilden der Lösung verwendet wurden, was gerade dem Minimum an notwendigen Satelliten entspricht (vgl. 2.5.2). Liegen nun zusätzlich ein oder mehrere Satelliten außerhalb des direkten Sichtfeldes, so können diese Lösungen nicht mehr als vertrauenswürdig gelten.

Das Gebäude hat also durchaus einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionsbestimmung. Es sorgt durch das Verdecken großer Teile des Himmels sowie durch Reflexionen dafür, dass im Empfänger verfälschte Informationen ankommen, die aber dennoch zur Berechnung der Position verwendet werden.

Um die Fehlerquelle des Gebäudes auszuschließen, musste also eine freie Fläche genutzt werden, damit die Genauigkeit verbessert werden kann und eine Messung vertrauenswürdige Ergebnisse liefert.

Abschließend lässt sich zur Positionsbestimmung sagen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse nicht nur von einem Parameter abhängt, sondern mehrere Effekte eine Rolle spielen. Den größten Einfluss haben jedoch offenbar große Objekte in der Nähe des Empfängers, die den Empfangsbereich der Antenne räumlich einschränken.

## 5 Timing-Messung mit mehreren GNSS-Antennen

Neben der Positionsbestimmung bestand eine weitere Aufgabe dieser Arbeit darin, die Genauigkeit des Timings zweier GNSS-Antennen zu untersuchen. Dabei wurden die vom Timing-Modul generierten und anschließend über Clock-Verstärker verstärkten Zeitpulse hinsichtlich ihrer Synchronisation vermessen. Da jedoch zuvor festgestellt wurde, dass Messungen nah am Gebäude erheblich durch dieses beeinträchtigt werden, sollte diese Messung auf einer freien Fläche auf einem Berg durchgeführt werden. Durch die Anpassung des Messortes wurde eine nahezu freie Sicht auf den Himmel in alle Richtungen garantiert, was den Empfang der Antennen verbessern und Fehlerquellen, wie zum Beispiel Bäume und Gebäude, reduzieren sollte. Um dieses Vorhaben zu realisieren, mussten zuvor jedoch einige Veränderungen am Aufbau des Experiments durchgeführt werden, denn der neue Ort des Aufbaus erforderte einen mobilen Betrieb der Antennen sowie der Messgeräte.

### 5.1 Anpassung des Aufbaus an die Timing-Messung

Im Aufbau zur Timing-Messung wurden insgesamt drei Antennen verwendet. Dabei dienten zwei von ihnen zur Vermessung der Zeitpulse und eine weitere zur Messung der Position. Die beiden Antennen zur Timing-Messung waren aufgrund einer Verlängerung des Koaxialkabels in einem Abstand von etwa 40 m voneinander entfernt auf geerdeten Metallplatten positioniert. Die dritte Antenne, die zur Positionsmessung diente, befand sich orthogonal zur Verbindungslinie der beiden anderen Antennen in einem Abstand von etwa 5 m. Bei dieser Antenne wurde auf eine Verlängerung des Koaxialkabels verzichtet. In der Mitte zwischen den Antennen befanden sich die Timing-Geräte, sowie die mobile Stromversorgung und ein Oszilloskop. Alle drei Timing-Geräte wurden über ein USB-Kabel mit dem Laptop zur Datennahme verbunden. Für die mobile Stromversorgung wurden zwei 9 V Blockbatterien, eine 12 V Autobatterie und ein DC-AC-Spannungswandler verwendet. Mit den 9 V Blockbatterien wurde die Versorgung der Antenne zur Positionsbestimmung sichergestellt. Der DC-AC-Wandler gibt am Ausgang eine Spannung von 230 V aus. Diese wird zur Versorgung des Oszilloskops sowie der beiden anderen Timing-Geräte verwendet. Die Geräte wurden jeweils über ein Netzteil an einer Mehrfachsteckdose angeschlossen. Über weitere Koaxialkabel wurden zwei der Timing-Geräte mit den Eingängen eins und zwei des Oszilloskops verbunden, um die Zeitpulse darzustellen und auszulesen.

### 5.2 Durchführung der Messung

In einer zuvor durchgeführten Probemessung, die am selben Ort wie die hier durchgeführte Timing-Messung stattfand, wurde bereits die Position der beiden

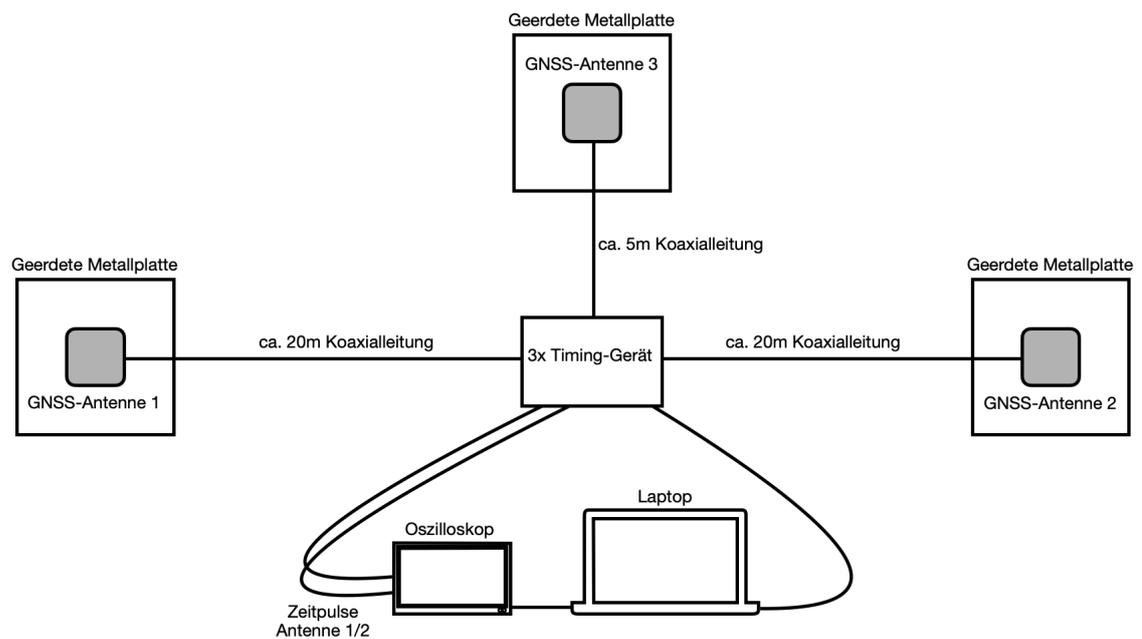


Abbildung 29: Schematischer Aufbau der Antennen und Messgeräte zur Timing-Messung.

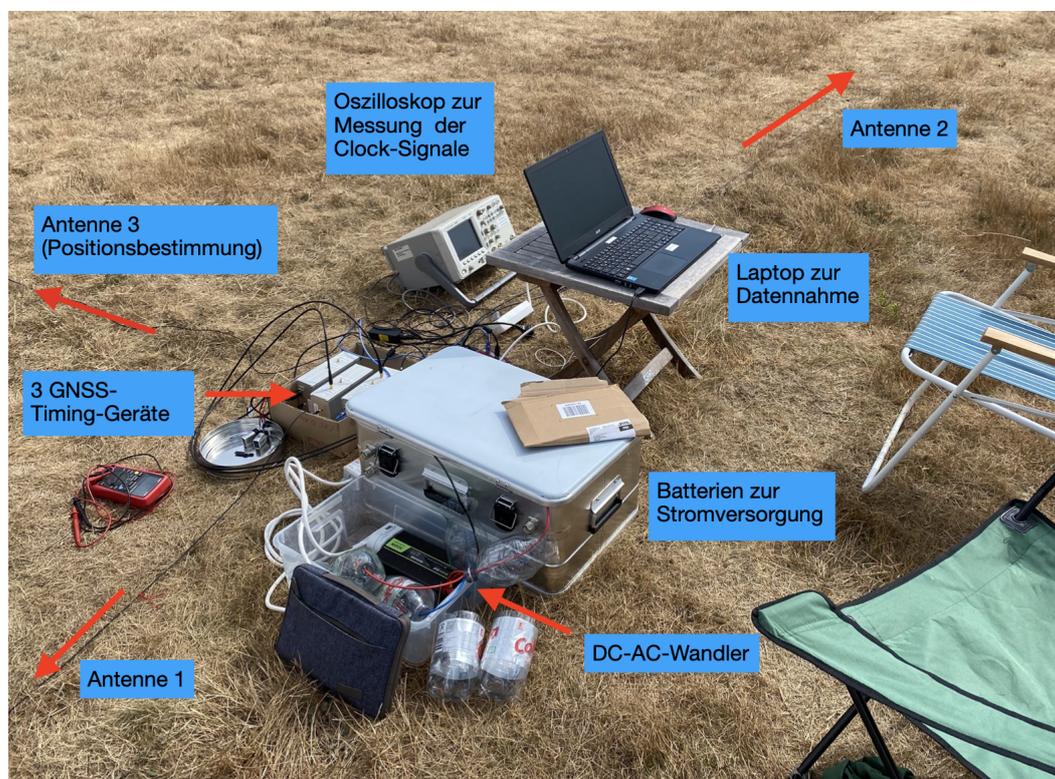


Abbildung 30: Gerätschaften und Aufbau am Ort der Messung.

zur Zeitsynchronisation verwendeten Antennen bestimmt. Diese Positionen wurden markiert und die Antennen erneut dort aufgestellt. So konnte der Schritt des Einmessens der Position zu Beginn übersprungen werden. Die Messung fand auf dem Wellersberg, einem der Universität nahegelegenen Berg, auf einer frei flächigen Wiese statt.

Mit Hilfe der u-center Software wurden die beiden Antennen in den Timing-Modus gesetzt. Dabei werden feste Koordinaten als Position der Antenne eingegeben. Es wurden bei dieser Messung alle verfügbaren Satellitensysteme zugelassen. Nur das Korrektursystem SBAS wurde für die Timing Messung nicht verwendet, da es negative Auswirkungen auf die Genauigkeit des Timings haben kann. Das Timing Modul ZED-F9T besitzt zwei Ausgänge die jeweils rechteckige Zeitpulse mit unterschiedlichen Frequenzen und Breiten ausgeben können. In diesem Fall wurde an beiden Modulen der Ausgang 1 mit einer Frequenz von 4 MHz verwendet. Das Oszilloskop wurde so eingestellt, dass es einmal pro Sekunde den Abstand zwischen den Flanken der Rechtecksignale beider Module misst und aufzeichnet. Dabei wird der Abstand immer auf der halben Höhe des Pulses gemessen. Anschließend wird dieser Wert in eine Datei eingetragen und gespeichert. Parallel dazu wurde die Position der dritten Antenne ebenfalls einmal pro Sekunde gemessen. Insgesamt wurde die Messung über einen Zeitraum von 6 h durchgeführt. Bei einem Wechsel des Laptop Akkus kam es jedoch zu einer ca. 15 minütigen Unterbrechung der Datennahme aufgrund eines Ausfalls des Oszilloskops. Nach Beendigung der Messung wurden alle Daten gespeichert, um diese im Anschluss zu analysieren.

### 5.3 Auswertung der Messergebnisse

Ziel dieser Messung war die Bestimmung der zeitlichen Differenz zwischen den Flanken der beiden Clocks.

Abbildung 31 zeigt die Verteilung der zeitlichen Differenz. Bei der Messung ergab sich ein mittlerer Abstand der beiden Flanken von

$$|\Delta t| = (3,5 \pm 3,3)\text{ns}$$

über den Zeitraum der Messung (s. Abb. 31).

Außerdem wurde der zeitliche Verlauf des Abstands der Flanken betrachtet, um zu überprüfen, ob es während der Messung zu einem Drift des Abstands kam. Dazu wurde in Intervallen von jeweils 10 min der Mittelwert des Offsets bestimmt und gegen die Zeit aufgetragen (s. Abb. 32).

Der zeitliche Verlauf zeigt, dass sich der Offset der Clocks während der gesamten Dauer der Messung im Mittel um weniger als 4 ns verschiebt. Zu einzelnen Zeitpunkten kam es jedoch während der Messung zu einem Offset im Bereich von +4 ns bis -12 ns. Eine systematische Verschiebung der Mittelwerte konnte über die Messdauer nicht beobachtet werden.

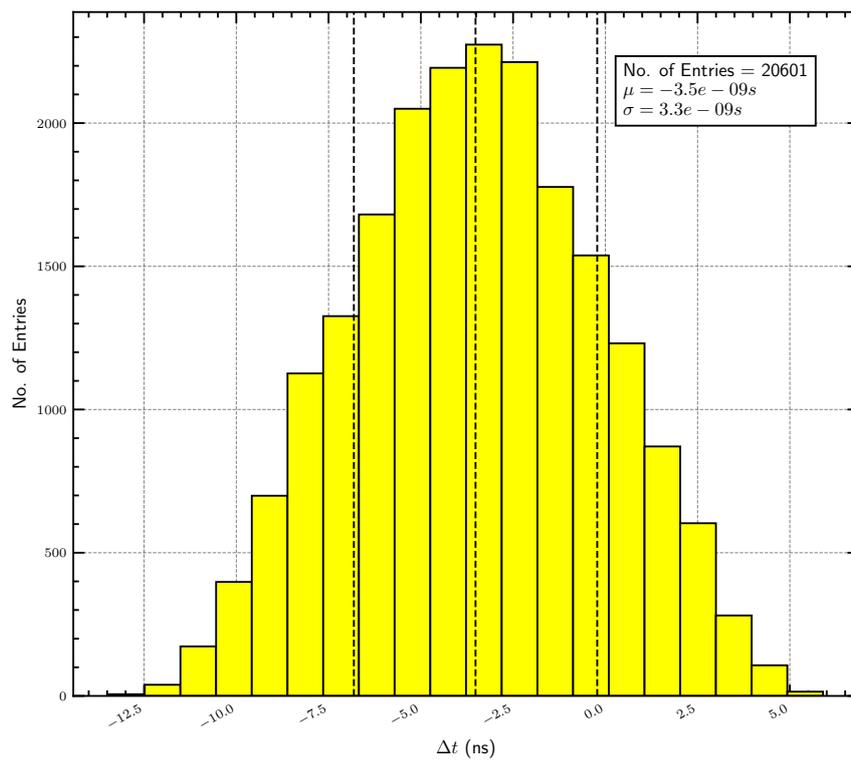


Abbildung 31: Verteilung der zeitlichen Differenz der Clock-Signale.

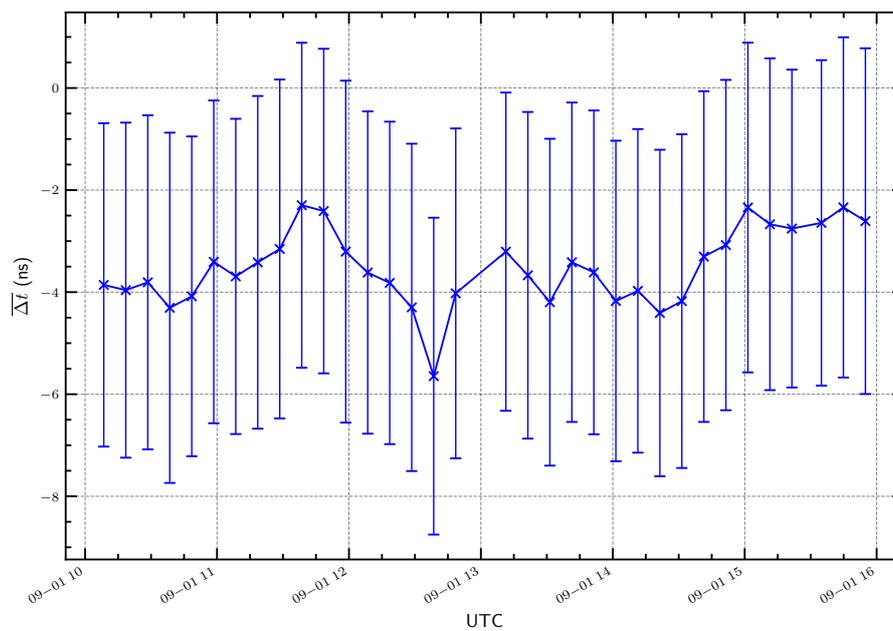


Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf des Timing Offsets über den Zeitraum der Messung in 10 min Intervallen.

## 5.4 Positionsbestimmung während der Timing-Messung

Parallel zur Timing-Messung wurde mit einer dritten Antenne die Position gemessen. Dabei wurden jedoch nicht wie bei der Timing-Messung alle Systeme verwendet, sondern nur die Systeme Galileo und GPS. Abbildung 33 zeigt den zeitlichen Verlauf der x-Koordinate dieser Messung. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen ergab sich im Bezug auf die Präzision der Position eine deutliche Verbesserung. Die Standardabweichung der Koordinaten lag für alle drei Koordinaten bei weniger als einem Meter. Es zeigte sich außerdem ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Verlauf der x-Koordinate und dem Verlauf des PDOP-Wertes. Der Korrelationskoeffizient zwischen dem Wert der x-Koordinate und dem PDOP-Wert beträgt

$$\rho = -0,69.$$

Dies deutet auf eine starke negative Korrelation hin. Trotz der Verbesserung in der Genauigkeit der Position zeigt sich jedoch immer noch ein Zusammenhang zwischen der Satellitengeometrie und dem Verlauf der x-Koordinate, wie es bereits zuvor festgestellt wurde.

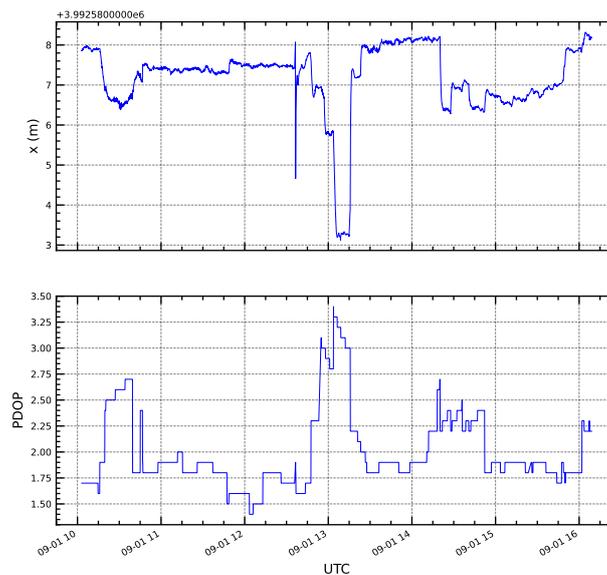


Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf der x-Koordinate in der parallelen Messung der Position.

Eine Korrelation zwischen dem zeitlichen Offset der Clocks und dem Verlauf der Koordinaten konnte jedoch nicht festgestellt werden. Ein möglicher Grund dafür ist die Verwendung von zusätzlichen Satellitensystemen bei der Timing-Messung im Vergleich zur Positionsbestimmung. Des Weiteren wird bei der Positionsbestimmung ein absoluter Wert bestimmt, während bei der Timing-Messung der relative Abstand der Clocks zueinander vermessen wurde. Dies führt dazu, dass eine globale Verschiebung der Zeiten in beiden Timing-Modulen durch das Bilden der Differenz eliminiert wird.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen zur Positionsbestimmung sowie zum Timing von GNSS-Antennen durchgeführt. Dafür wurde zunächst in mehreren Messreihen die Position einer einzelnen Antenne vermessen. Es stellte sich dabei heraus, dass am Ort der Antenne die Position mit einer Genauigkeit von etwa 2 m bis 6 m bestimmt werden konnte. Während dieser Messungen konnten in mehreren Fällen Muster in den Verläufen der Koordinaten gefunden werden, die in regelmäßigen Zeitabständen auftraten. Eine genauere Untersuchung dieser Muster ergab als mögliche Ursache Lösungen, bei denen es Beiträge von Satelliten gab, die außerhalb des direkten Sichtfeldes der Antenne lagen. Somit ließ sich der Schluss ziehen, dass eine Messung in der Nähe eines Gebäudes oder anderen blockierenden Objekten keine vertrauenswürdigen Ergebnisse liefert, und eine freie Fläche am Ort der Antenne zur Verbesserung der Genauigkeit notwendig ist.

Im Rahmen der Timing-Messung wurde mit Hilfe eines mobilen Setups und zwei Antennen der Abstand der beiden Clocksignale bestimmt.

Dabei wurde die Verschiebung zwischen den Flanken der Rechteckpulse zu

$$|\Delta t| = (3,5 \pm 3,3)\text{ns}$$

bestimmt, was den angegebenen Wert des Herstellers von

$$|\Delta t| \leq (5 \pm 4)\text{ns}$$

unterschreitet.

Im Rahmen von Folgeuntersuchungen zu diesem Thema besteht die Möglichkeit, weitere Timing-Messungen durchzuführen, bei denen beispielsweise die verwendeten Satellitensysteme eingeschränkt werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, zunächst die Position der Antennen mit einem dafür vorgesehenen Modul, ähnlich dem ZED-F9T, zu messen und anschließend auf das Timing-Modul zu wechseln und mit diesem die Timing-Messung durchzuführen. Eine genauere Vermessung der sich wiederholenden Muster würde zusätzlich die Möglichkeit bieten, diese zu quantifizieren und nachträglich in den Messdaten zu korrigieren.

Abschließend lässt sich festhalten, dass eine Realisierung des Timings von autonomen Detektorstationen mit GNSS-Antennen der neuesten Generation durchaus eine Möglichkeit ist, zumal die Bedingungen am Pierre Auger Observatorium aufgrund der weiten freien Fläche noch einmal eine Verbesserung der Synchronisation mit sich bringen könnte. Um diese Art des Timings im Rahmen eines großflächigen Experiments zu implementieren, sollte jedoch zunächst festgestellt werden, ob an den Orten der Detektoren genügend Satelliten zur Verfügung stehen, um durchgehend die Mindestanzahl an Satelliten zu empfangen.

## Literatur

- [1] M. Risse. „Vorlesung: Astroteilchenphysik“. Universität Siegen, 2020.
- [2] W. Bietenholz. *The flux of cosmic rays as a function of the energy over a very broad energy interval*. URL: <https://www.researchgate.net/profile/Wolfgang-Bietenholz/publication/236635142/figure/fig2/AS:299429753049098@1448401024880/The-flux-of-cosmic-rays-as-a-function-of-the-energy-Over-a-very-broad-energy-interval-it.png> (besucht am 16.09.2022).
- [3] *Cosmo Cascade*. 2014. URL: <https://www.antarcticglaciers.org/wp-content/uploads/2014/11/cosmo-cascade.png> (besucht am 16.09.2022).
- [4] J. Matthews. „A Heitler model of extensive air showers“. In: *Astroparticle Physics* 22.5-6 (2005), S. 387–397.
- [5] A. Horvath. *Tscherenkow-Strahlung*. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Tscherenkow-Strahlung> (besucht am 20.09.2022).
- [6] J. V. Jelley. „Cerenkov radiation and its applications“. In: *British Journal of Applied Physics* 6.7 (1955), S. 227–232. URL: <https://doi.org/10.1088/0508-3443/6/7/301>.
- [7] H. Kolanoski und N. Wermes. *Teilchendetektoren*. Springer, 2016.
- [8] Pierre Auger Collaboration. „The fluorescence detector of the Pierre Auger Observatory“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 620.2 (2010), S. 227–251. ISSN: 0168-9002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210008727>.
- [9] G. A. Askaryan. „EXCESS NEGATIVE CHARGE OF AN ELECTRON-PHOTON SHOWER AND THE COHERENT RADIO EMISSION FROM IT“. In: *Zhur. Eksptl'. i Teoret. Fiz.* (Aug. 1961). URL: <https://www.osti.gov/biblio/4833087>.
- [10] O. Scholten, K. Werner und F. Rusydi. „A macroscopic description of coherent geo-magnetic radiation from cosmic-ray air showers“. In: *Astroparticle Physics* 29.2 (2008), S. 94–103.
- [11] M. Ender. *Radiodetektion von Luftschauern unter dem Einfluss starker elektrischer Felder in der Atmosphäre*. Forschungszentrum Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft FZKA, 2009.
- [12] H. Schoorlemmer. „Tuning in on cosmic rays: polarization of radio signals from air showers as a probe of emission mechanisms“. Diss. 2012.
- [13] Pierre Auger Collaboration. „The angular resolution of the Pierre Auger Observatory“. In: *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements* 190 (2009), S. 20–25.

- [14] Pierre Auger Collaboration. „Nanosecond-level time synchronization of autonomous radio detector stations for extensive air showers“. In: *Journal of Instrumentation* 11 (2016), P01018. URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/11/01/p01018>.
- [15] J. Zogg. *GPS: Essentials of Satellite Navigation: Compendium: Theorie and Principles of Satellite Navigation, Overview of GPS/GNSS Systems and Applications*. U-blox, 2009.
- [16] National Oceanic und Atmospheric Administration. *The Global Positioning System*. 2021. URL: <https://www.gps.gov/systems/gps/> (besucht am 29.09.2022).
- [17] United States Coast Guard. *Global Positioning System (GPS) Overview*. URL: <https://www.navcen.uscg.gov/global-positioning-system-overview> (besucht am 29.09.2022).
- [18] ESA. *What is Galileo?* URL: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo) (besucht am 06.09.2022).
- [19] Pierre Auger Collaboration. *The Pierre Auger Observatory*. 2022. URL: <https://www.auger.org/observatory/observatory> (besucht am 15.09.2022).
- [20] Pierre Auger Collaboration. „The surface detector system of the Pierre Auger Observatory“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 586.3 (2008), S. 409–420. ISSN: 0168-9002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900207024680>.
- [21] S. Fliescher. „Radio detection of cosmic ray induced air showers at the Pierre Auger Observatory“. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 662 (2012). 4th International workshop on Acoustic and Radio EeV Neutrino detection Activities, S124–S129. ISSN: 0168-9002. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210025088>.
- [22] Pierre Auger Collaboration. „Timing calibration and synchronization of surface and fluorescence detectors of the Pierre Auger Observatory“. In: *29th International Cosmic Ray Conference (ICRC29), Volume 8*. Bd. 8. 2005, S. 307.
- [23] T. Huege. „Nanosecond-level time synchronization of AERA using a beacon reference transmitter and commercial airplanes“. In: *EPJ Web of Conferences*. Bd. 135. EDP Sciences. 2017, S. 01013.
- [24] *ANN-MB Series: Multi-band, high precision GNSS antennas*. u-blox. 2019.
- [25] u blox. *ANN-MB series*. URL: <https://www.u-blox.com/en/product/ann-mb-series?legacy=Current> (besucht am 26.09.2022).

- [26] u-blox. *RCB-F9T timing board*. URL: <https://www.u-blox.com/en/product/rcb-f9t-timing-board> (besucht am 26.09.2022).
- [27] M. Ziolkowski. Private Mitteilung. Universität Siegen, 2022.
- [28] NovAtel. *GNSS Logs*. 2022. URL: [https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/Core\\_Logs.htm?tocpath=Commands%20%2526%20Logs%7CLogs%7CGNSS%20Logs%7C\\_\\_\\_\\_\\_0](https://docs.novatel.com/OEM7/Content/Logs/Core_Logs.htm?tocpath=Commands%20%2526%20Logs%7CLogs%7CGNSS%20Logs%7C_____0) (besucht am 22.06.2022).
- [29] Esri. *Funktionsweise von "Neigung"*. 2021. URL: <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-slope-works.htm> (besucht am 27.09.2022).
- [30] D. Kuna, S. Narsetty und P. Naveen. „Preliminary Analysis of Standalone Galileo and NavIC in the context of Positioning Performance for Low Latitude Region“. In: *Procedia Computer Science* 171 (Jan. 2020), S. 225–234. DOI: 10.1016/j.procs.2020.04.024.
- [31] C. Rathore. *Planning a GPS Survey Part 3 – Using an Online Tool for GPS Survey Planning*. 2017. URL: <http://graticules.blogspot.com/2017/02/> (besucht am 28.09.2022).
- [32] *Dilution of Precision*. 2016. URL: <https://www.polyu.edu.hk/proj/gef/index.php/glossary/dilution-of-precision/> (besucht am 28.09.2022).
- [33] ESA. *What is EGNOS?* URL: [https://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS/What\\_is\\_EGNOS](https://www.esa.int/Applications/Navigation/EGNOS/What_is_EGNOS) (besucht am 06.09.2022).
- [34] ESA. *EGNOS: EUROPEAN GEOSTATIONARY NAVIGATION OVERLAY SERVICE*. 2009. URL: [http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/ESA\\_EGNOS\\_br284\\_2009.pdf](http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/ESA_EGNOS_br284_2009.pdf) (besucht am 06.09.2022).
- [35] Z. Gajic. *Linear dynamic systems and signals*. Prentice Hall/Pearson Education Upper Saddle River, 2003.

# Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei Prof. Dr. Markus Cristinziani bedanken, der es mir ermöglicht hat, meine Bachelorarbeit in der Experimentellen Astroteilchenphysik zu schreiben und viele nützliche Hinweise zur Durchführung der Arbeit gegeben hat.

Ein besonderer Dank geht an Dr. Qader Dorosti, der viel Zeit investiert hat, um mich insbesondere bei der Auswertung der Daten zu unterstützen und mein Wissen mit vielen hilfreichen Erklärungen erweitert hat.

Außerdem möchte ich mich bei Dr. Michael Ziolkowski und dem gesamten Team des Elektronikentwicklungslabors für die Bereitstellung der Hardware und die Unterstützung beim Durchführen der Experimente bedanken.