

Marie-Curie-Gymnasium
Zirkusstraße 7
01069 Dresden

Thema: Methoden zur Untersuchung von hochenergetischen Luftschauern mit
Messdaten des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien
Fach: Physik
Verfasser: Franz Rudolf Hellig
Kurs: 11e
Begleitlehrer: Herr John
Abgabetermin: 29.06.2018

Bewertung:

Methoden zur Untersuchung von hochenergetischen Luftschauern mit Messdaten des Pierre-Auger-Observatoriums in Argentinien

Franz Rudolf Hellig

25. Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Vorwort	3
2	Einleitung	4
3	Theoretische Grundlagen	5
3.1	Kosmische Strahlung	5
3.2	Myonen	6
3.3	Forschungsgeschichte der kosmischen Strahlung	7
3.4	Aufgaben und Funktion des Pierre-Auger-Observatoriums	8
4	Untersuchungsmethoden	10
4.1	Vorgehen mit Office Excel	10
4.2	Vorgehen mit Python	15
5	Fazit	20
6	Anhang	21
6.1	Literaturverzeichnis	21
6.2	Bilder	23
6.3	Vollständiges Python-Programm	24
6.4	Selbstständigkeitserklärung	29

1 Vorwort

Diese Arbeit entstand als Facharbeit am Marie-Curie-Gymnasium während der Jahrgangsstufe 11. Die Themenfindung fand Ende der Klasse 10 statt. Dazu suchte ich mir Unterstützung bei Frau Dr. Bilow vom Institut für Kern- und Teilchenphysik der TU Dresden, die mir zusammen mit Frau Dr. Schneider bei der Zielstellung und Eingrenzung des Themas helfen konnte. Zudem unterstützten sie mich mit wichtigen Materialien, Hinweisen und Kommentaren zum Konzepttext. Beiden gilt mein Dank.

Herr John betreute die Facharbeit von schulischer Seite. Er gab wertvolle Anregungen zum Vorgehen und stellte Anleitungen zur Python-Programmierung bereit. Auch ihm möchte ich dafür danken.

Im Nachhinein sehe ich die Facharbeit als eine große Herausforderung, die sehr viel Zeit und Anstrengung kostete, aber auch als hervorragende Möglichkeit, im Fach und in der Methodik einiges zu lernen. So lernte ich unter anderem den Umgang mit $\text{\LaTeX}$, dem Analyse-AddIn von Excel, Grundlagen der Regression und Programmieren in Python.

2 Einleitung

Wenn man vom Weltall spricht geht es oft um Galaxien, Sterne, Planeten und ihre Monde. Doch nicht so häufig betrachtet man die weite Leere dazwischen, in der nahezu ein Vakuum herrscht. Trotzdem spielt auch der leere Raum zwischen den Himmelskörpern eine Rolle im Zusammenwirken kosmischer Prozesse. Er ist der Transportweg für elektromagnetische Strahlung und Teilchen. Solche Teilchen, wie zum Beispiel Protonen, werden unter anderem von Sternen ausgesendet und bewegen sich durch das Universum. Dabei gelangen einige auch zur Erde.

Auf der Erde kommt es schließlich zum Zusammenstoß zwischen dem kosmischen Teilchen und einem Atmosphärenteilchen. Durch die hohe Ausgangsenergie entsteht daraufhin ein Luftschauer aus zahlreichen neuen Teilchen. Die Auswirkungen und Messung der Luftschauer sind Thema meiner Facharbeit. In der Astroteilchenphysik wird der kosmische Ursprung der Luftschauer gesucht und untersucht. Dazu werden meist Experimentieranlagen errichtet, welche die Teilchen solcher Schauer detektieren können. Eines dieser Experimente mit über 1600 Detektoren ist das Pierre-Auger-Observatorium in Argentinien.

Wenn die Detektoren einen Schauer registrieren, entsteht eine Vielzahl von Daten. Diese sollen ausgewertet werden, um die Richtung und den Auftreffpunkt an der Erdoberfläche zu bestimmen. Die Erarbeitung von Methoden und Berechnung dieser Kenndaten sind die Zielstellung dieser Arbeit.

Zunächst werden Grundlagen zum Thema behandelt, die einen Überblick zur kosmischen Strahlung und deren Forschungsgeschichte geben. Die darauf folgende Beschreibung des Pierre-Auger-Observatoriums schafft Voraussetzungen zum Verständnis der Experimentdaten. Die Berechnungen zur Auswertung der Schauer werden zuerst mit Office Excel durchgeführt, wobei die einzelnen Schritte und Zwischenergebnisse während der Durchführung ersichtlich sind. Im Weiteren wird ein Python-Programm beschrieben, welches die Auswertung schnell und effizient durchführt.

3 Theoretische Grundlagen

3.1 Kosmische Strahlung

Kosmische Strahlung besteht aus elektromagnetischer Strahlung und beschleunigten Teilchen aus dem All. Die Beschleunigung findet aufgrund verschiedener Vorgänge im All statt. Im Allgemeinen lässt sich kosmische Strahlung in die primäre und sekundäre kosmische Strahlung aufteilen. Primäre kosmische Strahlung ist die kosmische Strahlung, welche die Erdatmosphäre noch nicht erreicht hat. Sekundäre kosmische Strahlung besteht aus Teilchen und Strahlung, die aus Interaktion zwischen primärer kosmischer Strahlung und der Atmosphäre hervorgegangen sind [1].

Eine wichtige Quelle für die primäre kosmische Strahlung sind Sterne und somit auch die Sonne. Diese sendet unter anderem den Sonnenwind aus [1]. Sterne weisen auch eine andere Möglichkeit auf, Teilchen zu beschleunigen. So lassen sich auf der Sonne die sogenannten Sonnenflecken finden. Man geht davon aus, dass sich solche auch auf anderen Sternen befinden. Bei diesen Flecken handelt es sich um dunklere Bereiche auf der Oberfläche der Sonne, da die Oberfläche dort kühler als die umgebende Sonnenatmosphäre ist. Der Grund dafür sind Magnetfelder der Sonne, die bei Unregelmäßigkeiten Material der Sonne bis in die Korona schleudern. Diese Magnetfelder beschleunigen ebenfalls die geladenen Teilchen, welche dann kosmische Strahlung darstellen. Von der Sonne lassen sich Teilchen mit einer Energie von bis zu 10^{11} eV [1] nachweisen.

Wenn Sterne ihren Wasserstoffvorrat am Ende ihrer Lebenszeit aufgebraucht haben, kann der Strahlungsdruck aus dem Inneren des Sterns ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr gegen die Kraft der Gravitation gehalten werden. Der Strahlungsdruck entsteht durch die freiwerdende Energie der Kernfusion im Inneren des Sterns. Schließlich sorgt die eigene Gravitation für das Kollabieren des Sterns. Der Stern stirbt, wobei schlagartig Materie abgegeben wird, die bei der Verteilung im Raum Schockfronten bildet. Wenn dann Teilchen auf diese Fronten treffen, werden sie beschleunigt. Bei dieser Art der Beschleunigung erhalten die Teilchen Energien von bis zu 10^{14} eV [1].

Einige Sterne sterben durch eine Supernova-Explosion. In Folge dessen können sie rotierende Neutronensterne bilden. Durch die kollabierte Gravitation wird das mitrotierende Magnetfeld verstärkt, welches elektrische Felder erzeugt. Diese beschleunigen wiederum Teilchen im Umfeld und sorgen für Teilchenenergien von bis zu 10^{19} eV [1].

Neutronensterne, die zusammen mit einem normalen Stern auftreten und sich so in einem Doppelsternsystem befinden, bilden ebenfalls eine weitere Quelle für kosmische Strahlung. Während sich die beiden Sterne umkreisen, nimmt der Neutronenstern ständig Materie vom anderen Stern auf. Dieses Material bildet, bevor es auf den Neutronenstern stürzt, eine Akkretionsscheibe, welche um jenen rotiert. Durch die Rotation entstehen elektromagnetische Felder, die ebenfalls Teilchen beschleunigen können. Damit erhalten Teilchen Energien von bis zu $3 \cdot 10^{12}$ eV [1]. Derartige Akkretionsscheiben umkreisen auch Kerne von Galaxien. Dieser Mechanismus bringt die Teilchen mit den größten Energien hervor.

Im Oktober 1991 wurde über dem US-Bundesstaat Utah das Teilchen mit der höchsten je gemessenen Teilchenenergie registriert. Es hatte eine Energie von $(3,2 \pm 0,9) \cdot 10^{20}$ eV [2]. Man gab dem Teilchen aufgrund dieser unerklärlich hohen Energie den Namen „Oh-My-God-Teilchen“.

Bereits beschleunigte Teilchen können im All auch weiter beschleunigt werden, wie zum Beispiel durch Magnetwolken. Das sind Gaswolken im Weltraum, die durch Magnetfelder zusammengehalten werden, die durch gegenseitige Beeinflussung im Raum ein sehr verworrenes Feldlinienbild

ergeben [3]. Treffen bereits beschleunigte Teilchen entgegen der Bewegungsrichtung der Magnetwolke auf diese, dann werden die Teilchen mit nun höherer Energie in eine andere Richtung abgelenkt. Wenn das Teilchen und die Magnetwolke die gleiche Bewegungsrichtung haben, dann verliert das Teilchen Energie. Die Gesamtbilanz der Energieverluste und Energiegewinne ist jedoch positiv, sodass Magnetwolken im Allgemeinen Teilchen beschleunigen [1]. Grund dafür ist der Fermi-Mechanismus. In diesem Fall lässt er sich vereinfacht wie folgt durch die Abstoßung des Teilchens an der Magnetwolke begründen; hierbei seien $\vec{v}$ die Geschwindigkeit des Teilchens der kosmischen Strahlung und $\vec{u}$ die Geschwindigkeit der Magnetwolke. Die Energiegewinne für die Teilchen unterscheiden sich aufgrund der Richtungen von $\vec{v}$ und $\vec{u}$. Sind sie antiparallel, ergibt sich so der Energiegewinn ΔE_1 für das Teilchen:

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2}m(v+u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2vu + u^2)$$

Wenn $\vec{v}$ und $\vec{u}$ parallel sind, wird die Energie des Teilchens um ΔE_2 kleiner:

$$\Delta E_2 = \frac{1}{2}m(v-u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(-2uv + u^2)$$

Insgesamt ergibt sich im Mittel ein Energiegewinn ΔE von:

$$\Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = \frac{1}{2}m(2vu + u^2) + \frac{1}{2}m(-2uv + u^2) = mu^2$$

Primäre kosmische Strahlung setzt sich aus Elektronen ($\approx 2\%$) und Atomkernen ($\approx 98\%$) zusammen. Letztere lassen sich erneut in Protonen ($\approx 87\%$), α -Teilchen ($\approx 12\%$) und schwere Kerne ($\approx 1\%$) unterteilen [4]. Die Teilchen der primären kosmischen Strahlung, welche die Erdatmosphäre erreichen, besitzen aufgrund des Einflusses der Magnetfelder der Sonne und der Erde meist eine Energie von mindestens 10^{10} eV [1], da Teilchen mit niedrigerer Energie durch die Lorentzkraft abgelenkt werden.

Die Teilchen sowie die elektromagnetische Strahlung können nicht ungestört durch die Atmosphäre wandern, wenn sie an der Erde ankommen. Bevor die Erdoberfläche erreicht wird, interagiert die primäre kosmische Strahlung mit den Teilchen der Atmosphäre. Die entstehende Strahlung ist die sekundäre kosmische Strahlung.

Die sekundäre kosmische Strahlung besteht aus verschiedenen Elementarteilchen. Größtenteils entsteht diese Strahlung in einer Höhe von 15 bis 20 km [1], wenn Teilchen der primären kosmischen Strahlung mit Teilchen der Erdatmosphäre kollidieren. Dabei handelt es sich vor allem um Protonen die auf Atomkerne der Atmosphäre treffen. In Folge entstehen Pionen, Kaonen und Nukleonen. Die Pionen und Kaonen zerfallen aufgrund ihrer kurzen Lebenszeit in Photonen, Neutrinos und Myonen. Ein Teil dieser Zerfälle ist in der Abbildung 3.1 dargestellt.

Schließlich erreichen unter anderem die Myonen die Erdoberfläche. Auf Meereshöhe sind rund 80 % der geladenen Teilchen der sekundären kosmischen Strahlung Myonen. Es erreichen durchschnittlich etwa 170 Myonen pro Quadratmeter und Sekunde [6] die Erdoberfläche auf Meereshöhe.

3.2 Myonen

Myonen sind Elementarteilchen, die in ihren Eigenschaften den Elektronen sehr stark ähneln. Sie wurden 1936 von Carl David Anderson und Seth Neddermeyer mit Hilfe einer Nebelkammer entdeckt. Die einzigen Unterschiede zum Elektron bestehen in der Lebensdauer und in der Masse, die mit einem Energieäquivalent von etwa 0,106 GeV etwa dem 200-fachen einer Elektronenmasse entspricht. Das Symbol für das Myon ist das μ . Der kleinere Teil in der sekundären kosmischen Strahlung sind die negativ geladenen Myonen μ^- mit der Ladung $-1e$. Aufgrund

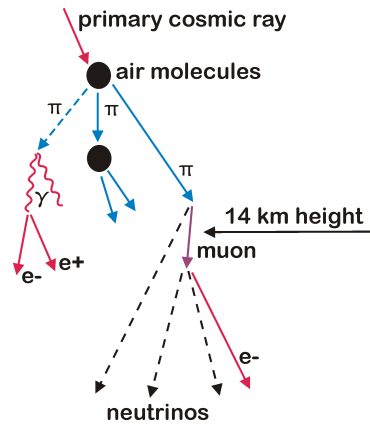


Abbildung 3.1: Teil der Zerfallsprozesse in der Atmosphäre, der zur Entstehung der Myonen führt
Quelle: [5]

der Zerfallsvorgänge machen den Großteil dieser Strahlung positiv geladene Myonen μ^+ mit einer Ladung $1e$ aus. Diese nennt man auch Antimyonen. Sie besitzen jeweils einen Spin von $\frac{1}{2}$. Die mittlere Lebensdauer beträgt $t_m = 2,2 \mu\text{s}$. In der sekundären kosmischen Strahlung besitzen Myonen eine mittlere Geschwindigkeit von $0,998c$, also $99,8\%$ der Lichtgeschwindigkeit [7]. So gilt nichtrelativistisch:

$$s = v \cdot t_m = 0,998c \cdot 2,2 \mu\text{s} = 658 \text{ m}$$

Das würde jedoch bedeuten, dass bei einer Entstehung der Myonen in 15 bis 20 km Höhe fast keine Myonen auf Meereshöhe auffindbar wären. Da die Myonen aber mit nahezu Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind, muss relativistisch gerechnet werden. Durch die Zeitdilatation ergibt sich für die Myonen der Gamma-Faktor [8]:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,998)^2}} = 15,28$$

Im Bezugssystem eines Myons bleibt die Lebensdauer t_m bei $2,2 \mu\text{s}$, im Bezugssystem Erde ergibt sich die Lebensdauer t_e :

$$t_e = t_m \cdot \gamma = 34,8 \mu\text{s}$$

Daraus ergibt sich für die vom Myon zurückgelegte Strecke:

$$s = v \cdot t_e = 0,998c \cdot 34,8 \mu\text{s} = 10\,369 \text{ m}$$

Damit kann ein beträchtlicher Teil der Myonen die Erdoberfläche erreichen.

3.3 Forschungsgeschichte der kosmischen Strahlung

Die Erforschung der kosmischen Strahlung basiert auf Erkenntnissen in der Teilchenphysik und auf der Erforschung elektromagnetischer Wellen. So stellen die Entdeckung der Röntgenstrahlen von Wilhelm Conrad Röntgen 1895, die Entdeckung der Radioaktivität von Henri Becquerel 1896 und die des Elektrons von Emil Wiechert 1897 eine Basis für die Erforschung von Strahlung dar [1].

Die Erforschung der kosmischen Strahlung begann mit ihrer Entdeckung durch den österreichi-

schen Physiker Victor Franz Hess. In einem Experiment während eines Ballonfluges maß er mit einem Elektroskop die ionisierende Strahlung. In der Höhe von etwa 5000 m konnte Hess eine doppelt so starke Strahlung wie nahe des Meeresspiegels feststellen, woraus er schlussfolgerte, dass die Strahlung von oben kommt und kosmischen Ursprungs ist [1]. Der deutsche Physiker Werner Kollhörster bestätigte dies in den beiden darauffolgenden Jahren durch eine Messung in 9000 m Höhe, bei der eine Vervierfachung der Intensität der Strahlung festzustellen war. Daher führte er den Begriff Höhenstrahlung ein. Schließlich setzte sich der Begriff der Kosmischen Strahlung durch, welcher durch den Physiker Robert Millikan verwendet wurde. In einer Debatte von Physikern über die Bestandteile der kosmischen Strahlung wurde klar, dass diese vor allem aus energetischen Teilchen und weniger aus elektromagnetischer Strahlung besteht. [9]

Die sogenannten Luftschauer wurden 1938 durch den Physiker Pierre Auger entdeckt und daher zunächst Auger-Schauer genannt [9] [10]. Die Herkunft der hochenergetischen Schauer blieb einige Jahre ein ungelöstes Mysterium. Enrico Fermi fand im Jahr 1949 eine Erklärung für die hohen Energien der Teilchen; die Beschleunigung durch Magnetwolken. Im Jahr 1962 registrierte John Linsley ein Ereignis mit einer Energie von 10^{20} eV. Daraufhin wurden weitere solch hochenergetischen Ereignisse registriert und Physiker starteten Initiativen, um kosmische Strahlung und deren Herkunft besser zu verstehen. Eine davon führte zum Bau eines Observatoriums welches zu Ehren seiner Entdeckungen nach Pierre Auger benannt wurde. [10]

3.4 Aufgaben und Funktion des Pierre-Auger-Observatoriums

Das Pierre-Auger-Observatorium ist das weltweit größte Observatorium zur Beobachtung kosmischer Strahlung. Es befindet sich auf einer Hochebene nahe der Stadt Malargüe in der Provinz Mendoza in Argentinien. Das gesamte Objekt hat eine Ausdehnung von etwa 3000 km^2 [11]. Benannt ist es nach dem französischen Physiker Pierre Victor Auger. Er arbeitete in der Atomphysik und konnte nach einem ähnlichen Prinzip des Pierre-Auger-Observatoriums den Ursprung der kosmischen Strahlung im Weltall nachweisen. Dazu baute er mehrere Messgeräte in 300 m Abstand auf, die dann kosmische Strahlung in solchen Zeitabständen registrierten, dass das All als Herkunftsort der Strahlung bestimmt wurde [9].

Das Projekt zu diesem Observatorium begann 1991 auf der Internationalen Konferenz für kosmische Strahlung (International Cosmic Ray Conference) in Dublin mit der Konzeption. In den folgenden 10 Jahren fand die Entwicklung der Technik, die Suche eines passenden Standortes und die Planung des Baus statt. 2001 wurden Prototypen der Detektoren errichtet, um erste Probedaten aufzuzeichnen. 2004 begannen zunächst 154 Detektoren damit, Daten zu sammeln. Das Observatorium mit allen Detektoren wurde bis 2008 fertiggestellt und sammelt seither Daten. Dabei wird mit 2 Arten von Detektoren gearbeitet. Insgesamt wurden 27 Fluoreszenzdetektoren und 1660 Wasser-Cherenkov-Detektoren errichtet [11].

Die Cherenkov-Detektoren sind auf der gesamten Fläche des Objekts verteilt. Dabei haben sie einen Abstand von jeweils 1,5 km. Der Aufbau des Observatoriums ist in der Abbildung 3.2 dargestellt.

Sie bestehen aus lichtisolierten Tanks, die mit 12 m^3 hochreinem Wasser gefüllt sind¹. In den Tanks befinden sich Photomultiplier, welche die Cherenkov-Strahlung detektieren. Diese Strahlung entsteht, wenn sich Teilchen und so auch die Myonen schneller bewegen, als die Phasengeschwindigkeit des Mediums. Kurzzeitig werden dabei Atome polarisiert, die nun elektromagnetische Strahlung aussenden. Aufgrund der erhöhten Geschwindigkeit überlagern sich die Wellen der Strahlung, sodass ein Lichtkegel entsteht. Die Photomultiplier können diese schwachen Lichtsignale detektieren: An einer Photokathode lösen eintreffende Photonen über den äußeren Photoeffekt Elektronen heraus, die nun beschleunigt und vervielfacht werden. Anschließend kann

¹Bild 6.1 eines Detektors im Anhang

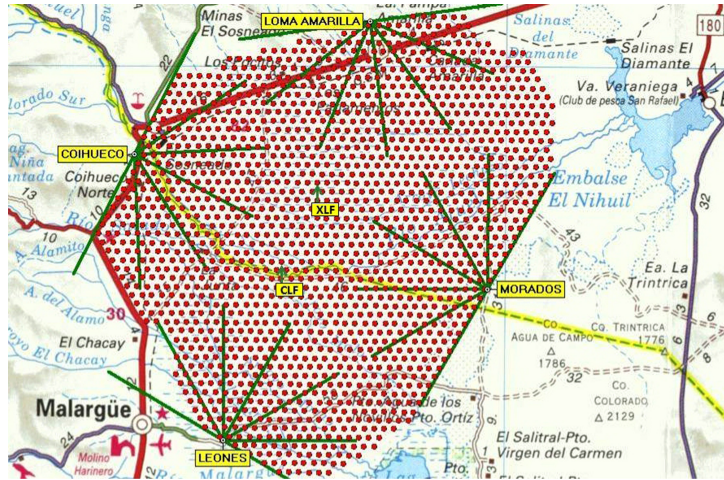


Abbildung 3.2: Übersichtsplan des Observatoriums (rote Punkte stellen Cherenkov-Detektoren dar, grüne Linien die Sichtrichtungen der Fluoreszenz-Teleskope, dieses sind an den Knotenpunkten der Sichtlinien positioniert)
Quelle: [11]

mit dem gemessenen Spannungsimpuls die Signalstärke bestimmt werden [4]. Zu den Tanks gehören zudem eine Kommunikationsantenne, ein Akku mit Solarzelle als Stromversorgung, sowie eine elektronische Steuereinheit [11]. Somit können die Cherenkov-Detektoren rund um die Uhr in Betrieb sein.

Die Cherenkov-Detektoren arbeiten mit Fluoreszenzdetektoren zusammen², um Messdaten zu überprüfen und eine ausreichende Mess-Redundanz zu gewährleisten. Diese Zusammenarbeit ist nur zeitlich begrenzt möglich. Die Cherenkov-Detektoren sind zwar ununterbrochen aktiv, aber die Fluoreszenzdetektoren können nur bei bestimmten Bedingungen arbeiten. Sie beobachten das Verhalten der Teilenschauer in der Atmosphäre, indem sie das Fluoreszenzlicht im ultravioletten Bereich aufnehmen, welches durch sekundäre kosmische Strahlen entsteht. Das ist nur bei guten Umweltbedingungen, wie Wetter ohne Niederschlag oder starken Wind und nur nachts möglich. Diese Bedingungen sind notwendig um genaue und zuverlässige Daten zu erhalten, da ungünstige Faktoren das Fluoreszenzlicht unsichtbar machen oder es verändern. Durch die abgeschiedene Lage ist nachts eine sehr geringe Lichtverschmutzung und somit die benötigte Dunkelheit vorhanden. Dabei darf Mondlicht nur schwach oder gar nicht auftreten. Die Sonne muss bereits eine Weile untergegangen sein, um kein zu großer Störfaktor durch ihr Licht zu sein. Dazu muss sich die scheinbare Position der Sonne mindestens 18° unter dem Horizont befinden [11].

²Bild 6.2 der Teleskope im Anhang

4 Untersuchungsmethoden

4.1 Vorgehen mit Office Excel

Zur Erforschung der kosmischen Strahlung benötigt man grundlegende Kennwerte, wie zum Beispiel die Herkunftsrichtung, welche aus Betrachtung der Schauerereignisse gewonnen werden können. Für diese Analyse wurde eine Anleitung durch das Institut für Kern- und Teilchenphysik der Technischen Universität Dresden bereitgestellt und verwendet [12]. Mithilfe der Anleitung werden Rohdaten betroffener Detektoren (auch Stationen genannt) eines Ereignisses genutzt, um dessen Kennwerte zu berechnen. Dieser Prozess lässt sich anhand des Ereignisses mit der Nummer 2181500 beispielhaft erläutern.

Auf dem Online-Ereignisbetrachter der Universität Wuppertal werden 1% der Ereignisse öffentlich gemacht. Zudem sind dort nur Ereignisse mit Energien unter $5 \cdot 10^{19}$ eV und mit einem Zenitwinkel kleiner als 60° veröffentlicht [13]. Solche Schauer-Ereignisse nennt man auch vertikale Schauer. Schauer mit einem größeren Zenitwinkel werden horizontale Schauer genannt und sind nicht veröffentlicht. Auf der Seite sind über 48000 Ereignisse (Stand Juni 2018) zu finden, welche für die Untersuchungen in dieser Arbeit vollkommen ausreichend sind.

Die ausgegebenen Daten (siehe Tabelle 4.1) beinhalten zu jeder der betroffenen Stationen die entsprechende Stations-ID, die Signalstärke s , den Zeitpunkt t der Messung an der Station und die Position der Station mit Easting x , Northing y und der Höhe h .

Diese Ausgangsdaten befinden sich in einer Text-Datei. Die Zeiten stehen im Unixzeitformat. Dieses ist die Zeit in Sekunden seit 0 Uhr am 1.1.1970 ohne Schaltsekunden [12]. Die beiden nächsten Spalten *Easting* und *Northing* geben die Koordinaten im UTM-Koordinatensystem an, welches die Erdoberfläche in ein kartesisches Koordinatensystem projiziert. Dazu kommt entsprechend in der letzten Spalte die *Höhe* der jeweiligen Station.

Die Tabelle in der Text-Datei lässt sich nun in eine Excel-Datei importieren, in der anschließend die weiteren Berechnungen durchgeführt werden. Es ergibt sich Tabelle 4.1. Da die konstante Sekundenzahl nur eine Orientierung für Datum und Uhrzeit gibt und keine weiteren Informationen liefert, kann die Spalte der Sekunden weggelassen werden. Für die Zeit in Nanosekunden wird die zeitliche Differenz zum ersten Ereignis berechnet.

# Id	Signal(VEM)	Zeit(sec)	Zeit(ns)	Easting(m)	Northing(m)	Höhe(m)
135	2970,87	1145174619	798142550	470128,73	6086647,43	1388,17
144	42,31	1145174619	798145655	469382,27	6087951,52	1390,84
142	31,59	1145174619	798145792	470881,02	6087951,62	1388,25
143	25,34	1145174619	798142641	468632,71	6086649,48	1390,46
145	16,84	1145174619	798139555	469383,30	6085352,92	1387,79
133	10,66	1145174619	798143089	471629,32	6086648,79	1385,66
146	10,49	1145174619	798139827	470880,94	6085347,64	1384,97
191	4,05	1145174619	798136994	470129,41	6084054,62	1384,57
150	3,85	1145174619	798146370	467878,30	6087951,94	1393,44
105	3,76	1145174619	798149032	470122,31	6089278,38	1391,84
192	2,21	1145174619	798136879	468578,30	6084054,73	1385,94

Tabelle 4.1: Ausgangsdaten für das Ereignis 2181500

Zunächst wird der mittlere Auftreffpunkt bestimmt. Dafür werden separat die gewichteten Mittel des Eastings $\bar{X}$ und des Northings $\bar{Y}$ berechnet. Dabei ist s die jeweilige Signalstärke in VEM. Diese Einheit steht für Vertical Equivalent Muon oder vertikales Myon-Äquivalent [13]. 1 VEM entspricht dem Signal, welches ein Detektor registrieren würde, wenn genau ein Myon mittlerer Energie den Detektor exakt vertikal und in genau in der Mitte durchqueren würde. Die Mittel ergeben sich so:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n s_i} \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Es ergibt sich für das Beispiel etwa:

$$\bar{X} \approx 470,1 \text{ km} \quad \bar{Y} \approx 6086,7 \text{ km}$$

Aus den Positionsdaten unter Vernachlässigung der Höhenunterschiede ergibt sich das Blasen-diagramm 4.1. Die Blasengröße stellt dabei die jeweilige Signalstärke dar. Der rote Punkt ist der berechnete mittlere Auftreffpunkt.

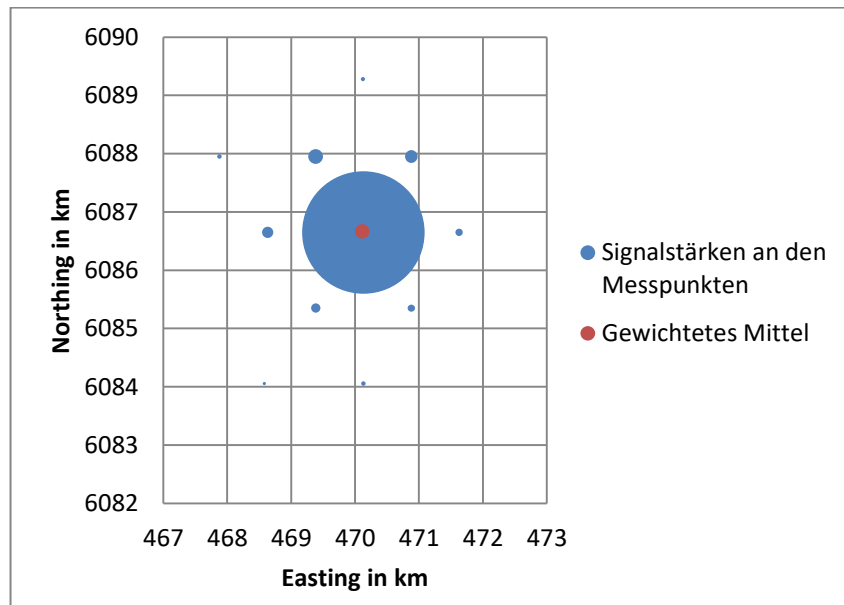


Abbildung 4.1: Blasendiagramm der Signalstärken an den Stationen und des mittleren Auftreffpunktes

Als nächstes wird der Zenitwinkel der Schauerachse θ ermittelt, also der Winkel zwischen der Lotrichtung der Erdoberfläche am Auftreffpunkt und der Achse des Schauers. Die Abbildung 4.2 zeigt die benannten Strecken und Winkel.

Zur Berechnung werden jeweils zwei Stationen und deren Abstand d benötigt. Der Höhenunterschied der Stationen wird dabei vernachlässigt. Diese können vernachlässigt werden, da die Stationen auf einer Entfernung von 1,5 km höchstens Höhenunterschiede von 10 m aufweisen. Das ergibt eine maximale Winkelabweichung von nur rund $0,4^\circ$.

$$d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

Nun werden die Zeitdifferenzen Δt der Registrierung der einzelnen Ereignisse benötigt, um daraus die Distanz der Schauerfront zur Station zu ermitteln, wenn die erste der beiden Stationen

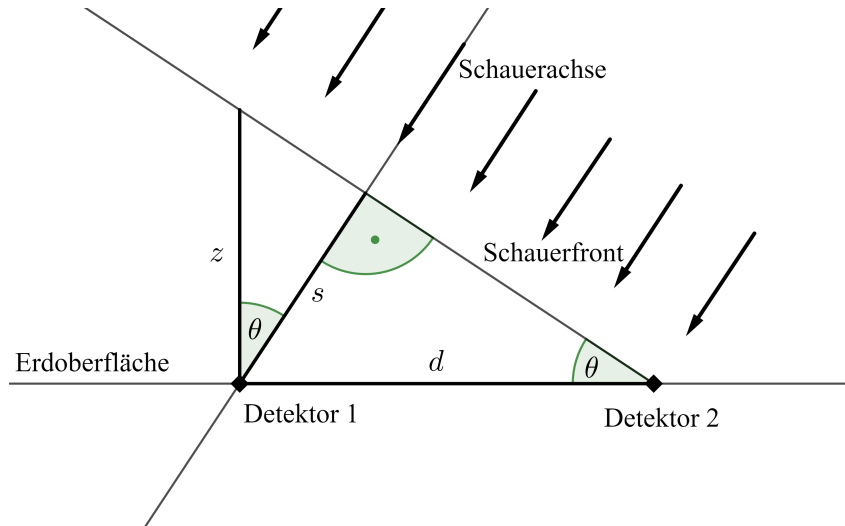


Abbildung 4.2: Skizze der Schauerfront und der benannten Strecken und Winkel; erstellt mit GeoGebra Classic 6 [14]

entsprechend der Abbildung 4.2 den Schauer detektiert:

$$s = \Delta t \cdot c \quad \left(c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)$$

Daraus ergibt sich wie folgt der Zenitwinkel:

$$\theta = \arcsin \frac{s}{d}$$

Die Abschätzung der Geschwindigkeit der Myonen durch $c = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sorgt für eine geringe Abweichung:

$$\frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.998 \cdot c} \approx 1,0027$$

In der Berechnung von s ist somit eine Abweichung von rund 0,27 % zu erwarten.

Nachdem dies für alle Paare von Stationen, die das Ereignis aufgezeichnet haben, durchgeführt wurde, erhält man jeweils einen Zenitwinkel, wie in Tabelle 4.2 dargestellt.

Die Werte unterscheiden sich so stark voneinander, da die Winkel zwischen Boden und Schauerfront nicht in der Richtung des Schauers bestimmt werden, sondern aus den Richtungen zwischen den Stationen bestimmt werden. Der Näherungswert für den Zenitwinkel ist der größte Wert in dieser Tabelle, da die Orientierung der Verbindungstrecke der entsprechenden Stationen in diesem Fall der Schauerrichtung am ähnlichsten ist. Demnach erhält man aus der Tabelle näherungsweise den fettgedruckten Zenitwinkel $\theta = 48^\circ$.

Mit Kenntnis des Zenitwinkels wird die Höhe z der Schauerfront über jeder Station für den Zeitpunkt bestimmt, wenn der Schauer an der ersten Station registriert wird:

$$z = \frac{s}{\cos \theta}$$

#Id	135	144	142	143	145	133	146	191	150	105	192
135		38,3	40,2	1,0	37,0	6,2	33,0	40,0	26,1	47,7	34,3
144	38,3		1,6	37,0	44,8	17,2	35,6	40,9	8,2	41,8	41,4
142	40,2	1,6		21,3	38,6	32,7	43,4	41,7	3,3	39,5	36,2
143	1,0	37,0	21,3		38,2	2,6	19,0	34,4	48,0	39,4	41,8
145	37,0	44,8	38,6	38,2		24,1	3,1	30,9	42,9	45,4	31,7
133	6,2	17,2	32,7	2,6	24,1		40,7	37,6	14,4	36,0	27,7
146	33,0	35,6	43,4	19,0	3,1	40,7		34,6	29,6	43,6	19,6
191	40,0	40,9	41,7	34,4	30,9	37,6	34,6		38,7	43,7	1,3
150	26,1	8,2	3,3	48,0	42,9	14,4	29,6	38,7		17,8	46,0
105	47,7	41,8	39,5	39,4	45,4	36,0	43,6	43,7	17,8		42,0
192	34,3	41,4	36,2	41,8	31,7	27,7	19,6	1,3	46,0	42,0	

Tabelle 4.2: Tabelle mit berechneten Zenitwinkeln θ , fett markiert und umrandet sind die Näherungswerte für den Zenitwinkel der Achse

Das ist der erste Schritt, um nun den Azimutwinkel φ zu berechnen. Mit diesen Höhen, sowie mit Easting und Northing lassen sich nun für jede Station Punkt-Koordinaten der Schauerfront bestimmen, die für dieses Ereignis in der Tabelle 4.3 dargestellt sind.

#Id	x in m	y in m	z in m
135	470128,73	6086647,43	2683,6
144	469382,27	6087951,52	4152,9
142	470881,02	6087951,62	4217,7
143	468632,71	6086649,48	2726,6
145	469383,30	6085352,92	1266,3
133	471629,32	6086648,79	2938,6
146	470880,94	6085347,64	1395,0
191	470129,41	6084054,62	54,4
150	467878,30	6087951,94	4491,2
105	470122,31	6089278,38	5750,9
192	468578,30	6084054,73	0,0

Tabelle 4.3: Koordinaten der Schauerfront zu deren Eintreffen in Station #192

Diese Koordinaten stellen eine Ebene dar, die sich durch eine Regression mit einer Gleichung beschreiben lässt. Dafür wird das Excel-AddIn *Analyse – Funktionen* verwendet. Mit diesem lassen sich verschiedene aufwendigere Rechnungen durchführen, die nicht in den normalen Excel-Funktionen verfügbar sind. Auch die multiple lineare Regression zur Ermittlung der Ebenengleichung ist so möglich. Man erhält Informationen zur Regression und deren Ergebnisse. So werden folgende Koeffizienten für die Ebenengleichung ermittelt:

$$z = -0,00865x + 1,10299y - 6\,706\,648 \text{ m}$$

Aus den Parametern der Ebenengleichung in der Abbildung 4.3 erhält man sofort auch den Normalenvektor, der für den Azimutwinkel entscheidend ist.

AUSGABE: ZUSAMMENFASSUNG

Regressions-Statistik	
Multipler	
Korrelationskoeffizient	0,99807873
Bestimmtheitsmaß	0,99616115
Adjustiertes	
Bestimmtheitsmaß	0,99520144
Standardfehler	129,662031
Beobachtungen	11

ANOVA					
	Freiheitsgrade (df)	Quadratsummen (SS)	Mittlere Quadratsumme (MS)	Prüfgröße (F)	F krit
Regression	2	34901539,87	17450769,93	1037,97992	2,1717E-10
Residue	8	134497,9384	16812,2423		
Gesamt	10	35036037,8			

	Koeffizienten	Standardfehler	t-Statistik	P-Wert	Untere 95%	Obere 95%	Untere 95,0%	Obere 95,0%
Schnittpunkt	-6706648,43	147817,6042	-45,37110764	6,1506E-11	7047516,44	6365780,43	7047516,44	6365780,43
X Variable 1	-0,00864999	0,036124258	-0,239450943	0,81677675	0,09195268	0,0746527	0,09195268	0,0746527
X Variable 2	1,10299367	0,024217577	45,54517075	5,9657E-11	1,04714784	1,1588395	1,04714784	1,1588395

Abbildung 4.3: Ausgabe der multiplen linearen Regression

Der Normalenvektor wird auf die Erdoberfläche bzw. auf die x - y -Ebene projiziert. Die Variablen 1 und 2 bilden so für das Ereignis diesen Vektor:

$$\vec{n} = \begin{pmatrix} -0,00865 \\ 1,10299 \\ 0 \end{pmatrix}$$

In den folgenden Berechnungen wird die x - y -Ebene als zweidimensionales Koordinatensystem betrachtet, wobei die Achsen ihre Orientierung beibehalten. Die x -Achse zeigt weiterhin nach Osten. Es wird nun ein Vektor $\vec{e}_W$ in Richtung Westen verwendet, da das Pierre-Auger-Observatorium den Azimutwinkel gegen die Westrichtung bestimmt und angibt. Zudem wird der Vektor $\vec{n}$ in das neue Koordinatensystem eingebracht.

$$\vec{e}_W = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \vec{n} = \begin{pmatrix} -0,00865 \\ 1,10299 \end{pmatrix}$$

Darauf folgt die Berechnung des Azimutwinkels φ .

$$\varphi = \arccos \frac{\vec{e}_W \cdot \vec{n}}{|\vec{e}_W| \cdot |\vec{n}|}$$

Er beschreibt den Winkel zwischen Einfallrichtung und Westrichtung, sodass $\theta = 0^\circ$ für einen Schauer in Richtung Westen und $\theta = 180^\circ$ für einen Schauer in Richtung Osten steht. Negative Azimutwinkel bedeuten eine nördliche Richtung der Schauerfront, positive eine südliche Richtung. So ergibt sich für dieses Ereignis ein Azimutwinkel von:

$$\varphi = -89,6^\circ$$

Somit traf der Schauer des Ereignisses mit der Nummer 2181500 recht genau aus dem Süden unter einem Zenitwinkel von 48° ein.

Dieses Ergebnis der einfachen Rechnung stimmt einigermaßen mit den Werten des Online-Ereignisbetrachters überein: $\bar{X} = (470,024 \pm 0,026)$ km $\bar{Y} = (6086,949 \pm 0,021)$ km $\theta = 45,0^\circ$ $\varphi = -92,4^\circ$ [13]. Die Abweichungen sind unter anderem damit erklärbar, dass die Berechnungen beim Ereignisbetrachter die Krümmung der Schauerfront sowie die geringen Höhenunterschiede zwischen den Stationen berücksichtigt.

4.2 Vorgehen mit Python

Da die Auswertung in Office Excel für jedes einzelne Ereignis viel Handarbeit und Aufwand benötigt, sollen die Berechnungen automatisiert durchgeführt werden. Während die Rechnung in Excel Schritt für Schritt zeigt, wie die Berechnungen im Einzelnen ablaufen, soll ein kleines Computerprogramm ermöglichen, Ereignisdaten einzulesen und ohne weiteres Zutun die Ergebnisse auszugeben.

Dazu wird die Programmiersprache Python in der Version 3.6.5 verwendet. Das Programm nutzt ein eigenes Fenster, in der die Ereignisnummer eingegeben wird und die berechneten Kennwerte ausgegeben werden.

Im ersten Teil des Programms werden notwendige Pakete für spezielle Operationen im weiteren Ablauf geladen:

```
import math #Package für simple mathematische Operationen
import numpy #Package für komplexere mathematische Operationen – hier
#zum Lösen eines Gleichungssystems
import urllib.request #Package zum Herunterladen der Daten aus dem
#Internet
from tkinter import * #Package für das Fenster
from tkinter import messagebox #Package für Mitteilungsfenster
```

Das *math*-Paket dient dazu, einfache Rechenoperationen durchführen zu können, die nicht in Python grundlegend vorhanden sind, sowie um mathematische Konstanten wie Pi mit einem einfachen Befehl verwenden zu können. Das *numpy*-Paket beinhaltet komplexe Rechenverfahren. Im Programm wird die Fähigkeit dieses Pakets genutzt, lineare Gleichungssysteme zu lösen. Das dritte Paket *urllib.request* dient im Programm dazu, auf das Internet zuzugreifen und so Dateien herunterladen zu können. Das *tkinter*-Paket beinhaltet Elemente um das Programm in einem eigenen Fenster zum Beispiel mit Schaltflächen oder Textfeldern zu erstellen. Ein solches Fenster wird nun geöffnet. Das dafür vorbestimmte Layout wird in einem separaten Teil festgelegt und hat folgendes Aussehen:

Ergebnisse:	
Mittlerer Auftreffpunkt x-Koordinate (Easting) in m:	0
Mittlerer Auftreffpunkt y-Koordinate (Northing) in m:	0
Zenitwinkel θ in $^\circ$:	0
Azimutwinkel φ in $^\circ$:	0

Abbildung 4.4: Programmfenster erstellt mit Tkinter

Dieses Fenster beinhaltet die Eingabe der Ereignisnummer anhand derer nun das Programm

beim Betätigen der Schaltfläche weiter abläuft. Es folgt das Einlesen der Ereignisdatei:

```
#Aufrufen und Einlesen der Ereignisdatei
ereignisnummer = ("000000" + ereignisnummereingabe.get())[-12:]
try:
    ereignis = open("auger_public_event_" + ereignisnummer + ".txt").read()
except OSError as e: #läuft, falls Ereignis nicht im selben Ordner
    messagebox.showerror("Fehler", "Datei ist nicht im Zielordner!")
    if messagebox.askyesno(message="Möchten sie das Ereignis aus dem Internet
herunterladen?"): # Abfrage, herunterladen aus dem Internet
        try: #versucht mit der eingegebenen Nummer die Datei herunterzuladen
            urllib.request.urlretrieve(
                ('http://auger.uni-wuppertal.de/ED/_asciievent.php?evid='
                + ereignisnummer), ('auger_public_event_'+ereignisnummer+'.txt'))
            # herunterladen der Datei aus dem Internet
            ereignis = open
            ("auger_public_event_" + ereignisnummer + ".txt").read()
            # öffnen und lesen der Datei
        except: #falls das Herunterladen nicht funktioniert
            messagebox.showerror("Fehler beim Herunterladen der Datei!",
                "1. Bitte überprüfen Sie Abrufbarkeit der Datei auf
                \"http://auger.uni-wuppertal.de/ED/index.php?\"
                \"n2. Bitte überprüfen Sie die Ereignisnummer")
            # Infofeld zur Fehlerbehebung
            return # hier wird die Funktion beendet!
    else:
        messagebox.showinfo("Viel Glück!", "Neuer Versuch!")
        # Öffnen eines Info Feldes, Neuer Versuch wird eingeleitet
        return # hier wird die Funktion beendet!
```

Sollte das Ereignis nicht im aktuellen Verzeichnis vorhanden sein, besteht auch die Möglichkeit, die Datei noch im Programm aus dem Internet herunterzuladen. Dafür wird eine HTTP-Verbindung mit dem Ergebnisbetrachter hergestellt. In diesem Teil ist mit Fehlern zu rechnen, die bei falscher Eingabe auftreten können. Dazu dient eine sogenannte try-except-Schleife, die im Falle eines bestimmten Fehlers im try-Abschnitt in den except-Teil übergeht. Zum Beispiel kann es dazu kommen, dass eine Datei nicht aus dem Internet heruntergeladen werden kann. Sollte das geschehen, wird das Programm nicht durch eine Fehlermeldung abgebrochen, sondern mit einem Hinweis innerhalb des Programms fortgesetzt. Sollte man sich also bei der Ereignisnummer vertippen, bricht das Programm beim Herunterladen nicht komplett ab, sondern ermöglicht ein erneute Eingabe.

Im nächsten Programmteil wird nun eine Liste erzeugt, in der alle heruntergeladenen Daten aufgelistet sind. Es wird dafür gesorgt, dass diese Daten in neue Listen sortiert werden. Diese Listen entsprechen jeweils den Spalten der Ausgangstabelle wie beim Vorgehen mit Excel.

```
liste = ereignis.split(" ") #Aufteilen des Strings in Liste aus vielen Daten
[...]
```

```
for i in range(len(liste)): #listen füllen
    listennummer = i % 7
    if listennummer == 0:
        stationsid.append(liste[i])
    if listennummer == 1:
        signal.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 2:
        sec.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 3:
        nanosec.append(float(liste[i]))
```

```

if listennummer == 4:
    easting.append(float(liste[i]))
if listennummer == 5:
    northing.append(float(liste[i]))
if listennummer == 6:
    hoehe.append(float(liste[i]))

```

Zudem werden die beiden Listen, welche die Zeit, also Sekunden und Nanosekunden, beinhalten, zu einer Liste zusammengeführt. Schließlich entsteht eine Liste mit den Werten der jeweiligen Nanosekunden als Zeitdifferenz zur Detektierung an der zuerst getroffenen Station.

Darauf beginnt die Berechnung, in welcher der mittlere Auftreffpunkt, sowie Zenit- und Azimutwinkel bestimmt werden. Für den Auftreffpunkt werden dieselben Berechnungen, wie im Vorgang mit Excel vollzogen.

Darauf folgt entsprechend die Berechnung des Zenitwinkels θ :

```

zenitwinkels = []
#Erstellen einer Liste mit allen Zenitwinkeln
for i in range(messungszahl):
    for k in range(messungszahl):
        try:
            d = ((easting[i]-easting[k])**2+(northing[i]-northing[k])**2)**0.5
            deltat = nanosec[i]-nanosec[k]
            s = deltat*0.3
            theta = math.asin(s/d)
            theta = (theta*180)/math.pi
            zenitwinkels.append(theta)
        except ZeroDivisionError: #tritt auf wenn i und k gleich sind und d
            #Abstand einer Station zu sich selbst wäre, daher Ausnahme
            pass

```

```

zenitwinkel = max(zenitwinkels) #Zenitwinkel ermitteln
#(größter aus zenitwinkels ist Annäherung für den zenitwinkel)

```

Darauf folgt die Berechnung des Azimutwinkels mithilfe der Koordinaten der Schauerfront. Mit diesen erfolgt die Ebenenregression, für welche im Folgenden die Berechnungsabläufe hergeleitet werden.

Als Ebenengleichung gilt:

$$z = \alpha x + \beta y + \gamma$$

Für den Fehler ε der individuellen Koordinaten von der Ebenengleichung gilt:

$$z_i = \alpha x_i + \beta y_i + \gamma + \varepsilon_i \quad \leftrightarrow \quad \varepsilon_i = z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma$$

Für die Gesamtabweichung einer Ebenengleichung lässt sich eine Funktion der Summe der Fehlerquadrate L erstellen [15]. Hierbei ist n die Zahl der Stationen mit Messwerten.

$$L(\alpha; \beta; \gamma) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)^2$$

Um L zu minimieren werden die Ableitungen nach α , β und γ gebildet und anschließend mit 0 gleichgesetzt:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \alpha}(\alpha; \beta; \gamma) &= \sum_{i=1}^n (-2x_i(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (-2x_i(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (x_i z_i - \alpha x_i^2 - \beta x_i y_i - \gamma x_i) \\
0 &= \sum_{i=1}^n x_i z_i - \alpha \sum_{i=1}^n x_i^2 - \beta \sum_{i=1}^n x_i y_i - \gamma \sum_{i=1}^n x_i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \beta}(\alpha; \beta; \gamma) &= \sum_{i=1}^n (-2y_i(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (-2y_i(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (y_i z_i - \alpha x_i y_i - \beta y_i^2 - \gamma y_i) \\
0 &= \sum_{i=1}^n y_i z_i - \alpha \sum_{i=1}^n x_i y_i - \beta \sum_{i=1}^n y_i^2 - \gamma \sum_{i=1}^n y_i
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial L}{\partial \gamma}(\alpha; \beta; \gamma) &= \sum_{i=1}^n (-2(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (-2(z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma)) \\
0 &= \sum_{i=1}^n (z_i - \alpha x_i - \beta y_i - \gamma) \\
0 &= \sum_{i=1}^n z_i - \alpha \sum_{i=1}^n x_i - \beta \sum_{i=1}^n y_i - \gamma n
\end{aligned}$$

Aus den drei sich ergebenden Gleichungen ergibt sich für jedes Ereignis folgendes Gleichungssystem:

$$\alpha \sum_{i=1}^n x_i^2 + \beta \sum_{i=1}^n x_i y_i + \gamma \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n x_i z_i \quad (\text{I})$$

$$\alpha \sum_{i=1}^n x_i y_i + \beta \sum_{i=1}^n y_i^2 + \gamma \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n y_i z_i \quad (\text{II})$$

$$\alpha \sum_{i=1}^n x_i + \beta \sum_{i=1}^n y_i + \gamma n = \sum_{i=1}^n z_i \quad (\text{III})$$

Dies kann als Matrixgleichung $A\vec{x} = \vec{b}$ dargestellt werden. Die jeweiligen Elemente des Gleichungssystems sind:

chungssysteme können in einer Matrix beziehungsweise Liste gespeichert werden.

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{pmatrix}$$

Dieses Gleichungssystem mit der Koeffizientenmatrix A und dem Ergebnisvektor $\vec{b}$ wird nun mit dem Befehl $\vec{x} = \text{numpy.linalg.solve}(A, \vec{b})$ gelöst [16]. Es ergibt sich der Vektor $\vec{x}$ mit den Parametern α , β und γ und somit die Ebenengleichung.

$$z = \alpha x + \beta y + \gamma \quad \leftrightarrow \quad -\gamma = \alpha x + \beta y - z$$

Aus dieser Ebenengleichung in Koordinatenform lässt sich der Normalenvektor ablesen [17]:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ -1 \end{pmatrix}$$

Diese Schritte lassen sich analog auch im Programm durchführen. So wird wie folgt der Azimutwinkel bezüglich der Westrichtung berechnet. Dieser Prozess beginnt mit der Berechnung der Ebenenkoordinaten:

```
x = easting
y = northing
z = []
for i in range(messungszahl): #Berechnung der Koordinaten der Schauerfront
    #zum Zeitpunkt des ersten Auftreffens
    z.append(nanosec[i]*0.3/math.cos((zenitwinkel/180)*math.pi))
```

Mithilfe dieser Koordinaten wird nun die Ebenenregression durchgeführt. Zum Lösen des linearen Gleichungssystems kommt das Paket *numpy* zum Einsatz:

```
koeffizienten = numpy.linalg.solve(a,b) #Lösen des Gleichungssystems
```

Es folgt die Berechnung des Azimutwinkels bezüglich der Westrichtung aus der Lösung des Gleichungssystems:

```
normalenvektor = [koeffizienten[0], koeffizienten[1], -1] #normalenvektor ist
der auf die Oberfläche projizierte #Berechnung des Azimutwinkels aus den
#koeffizienten
betrag = (normalenvektor[0]**2 + normalenvektor[1]**2)**0.5
projektionwest = normalenvektor[0]*-1
quotient = projektionwest/betrag
azimut = math.acos(quotient)
azimut = azimut*180/math.pi
if normalenvektor[1] > 0: #Umwandlung in "richtigen" Azimut, da beim
#acos Befehl die Nord-Süd Orientierung nicht erhalten bleibt
    azimut = -azimut
```

Zum Schluss erfolgt die Ausgabe der berechneten Größen im zu Beginn erzeugten Fenster:

```
#Ausgabe: ändern des Textes in dem Ausgabefeld
loesungen[0].config(text=round(xmittel, 1)) # ausgeben des Auftreffpunktes
#x-Koordinate
loesungen[1].config(text=round(ymittel, 1)) # ausgeben des Auftreffpunktes
#y-Koordinate
loesungen[2].config(text=round(zenitwinkel, 1)) # ausgeben des Zenitwinkels
loesungen[3].config(text=round(azimut, 1)) # ausgeben des Azimutwinkels
```

Die Ausgabe zum Ereignis 2181500 findet sich im Anhang als Abbildung 6.3.

5 Fazit

Zur Erforschung kosmischer Strahlung und daraus resultierenden Luftschauern werden Experimente zum Detektieren der Schauer durchgeführt. Das Pierre-Auger-Observatorium dient dazu, die Myonen der kosmischen Strahlung zu registrieren und Messdaten zu sammeln. Der Öffentlichkeit werden 1 % der Daten zur Verfügung gestellt. Um diese auszuwerten sind umfangreiche Rechnungen notwendig, welche in der Facharbeit auf zwei verschiedene Wege durchgeführt wurden.

Beide Auswertungsmethoden verwenden mathematisch gesehen die gleichen Rechengänge. Dadurch entstehen natürlich die selben Abweichungen. Für Fehler gibt es verschiedene Gründe. Die Daten vom Observatorium können als sehr genau angenommen werden, da die Koordinaten genau bestimmt sind und die Zeitmessung nanosekundengenau sein dürfte. Da in den Rechenschritten viele Dezimalstellen verwendet werden, sind davon auch kaum erkennbare Abweichungen zu erwarten.

Die Rechnungen an sich sorgen jedoch durch ihr Vorgehen für merkliche Fehler, wie zum Schluss in 4.1 sichtbar wird. Es wird durchgehend eine Ebene als Form der Schauerfront angenommen, um die Rechnungen relativ einfach zu halten. Die eigentliche Krümmung einer Front konnte damit nicht berücksichtigt werden. Ebenso sorgte die Vernachlässigung der Höhenunterschiede der Stationen für geringe Abweichungen. Zudem ist der Zenitwinkel auch nur eine Annäherung und kein genau durchgerechneter Wert, da ein genauerer Vorgang deutlich aufwendiger wäre.

Die Auswertung der Schauerdaten mittels Office Excel diente dem Nachvollzug der einzelnen Rechnungen inklusive aller Zwischenschritte und Zwischenergebnisse. Diese Art der Auswertung dient daher nicht dem effizienten, schnellen und einfachen Berechnen der gebrauchten Werte.

Dazu wurde die automatisierte Auswertung mit dem Python-Programm erstellt, welche die Berechnungen nicht so klar offen legt und grafisch keine Ausgabe, wie ein Blasendiagramm anbietet, jedoch mit hoher Effizienz und Geschwindigkeit arbeitet.

6 Anhang

6.1 Literaturverzeichnis

- [1] C. Gruppen, *Astroteilchenphysik Das Universum im Licht der kosmischen Strahlung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, 2000. 1. Auflage.
- [2] J. Walker, “The oh-my-god particle.” <http://www.fourmilab.ch/documents/OhMyGodParticle/>, 1994. Abgerufen: 28.10.2017.
- [3] Helmholtz-Allianz für Astroteilchenphysik, “HAP Brochure A snapshot of the period July 2011 – December 2016.” http://www.hap-astroteilchen.de/downloads/HAP_Report.pdf. Abgerufen: 26.5.2018.
- [4] B. Schneider, “Masterclass Pierre Auger Observatorium.” PDF-Präsentation, 2016.
- [5] L. Papadopoulos, “New Research Suggests Potential Link Between Neutrinos and the Supermassive Black Hole at Milky Way’s Center.” <http://www.americaspace.com/2014/11/20/new-research-suggest-potential-link-between-neutrinos-and-the-supermassive-black-hole-at-milky-ways-center/>. Abgerufen: 24.6.2018.
- [6] Institut National de Physique Nucléaire et Physique des Particules (IN2P3), “Cosmic muons muons in the atmosphere, a component of cosmic rays.” http://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Cosmic_Muons.htm, 2018. Abgerufen: 13.5.2018.
- [7] L. Pörtner, “Myonen und zeitdilatation.” <http://www.physik.uni-bielefeld.de/~yorks/pro13/poertner.pdf>, 2013. Abgerufen: 23.09.2017.
- [8] Prof. Dr. Hermann Gaub, Dr. Martin Benoit und Dr. Res Jöhr, “E1 – Mechanik Lösungen zu Übungsblatt 5.” https://www.physik.uni-muenchen.de/lehre/vorlesungen/wise_17_18/E1/ubungen/loesung-5.pdf, 2017. Abgerufen: 19.12.2017.
- [9] Y. S. und Harry Elliot, *Early History Of Cosmic Ray Studies*. D. Reidel Publishing Company, 1985. Band 118 1. Auflage.
- [10] University of Nova Gorica, “The story of cosmic ray research.” <http://www.ung.si/public/pao/history.php>, 2006. Abgerufen: 27.1.2018.
- [11] The Pierre Auger Collaboration, “The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory.” In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 798 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900215008086>, 2015. Abgerufen: 01.09.2017.
- [12] B. Schneider, “Auswertung Auger Daten mit Microsoft Excel 2010.” https://indico.cern.ch/event/604666/contributions/2574109/attachments/1501796/2339156/Anleitung_Auswertung_MSExcel2010.pdf, 2017. Abgerufen: 11.6.2018.

- [13] Bergische Universität Wuppertal, “Öffentlicher Ereignis-Betrachter.” <http://auger.uni-wuppertal.de/ED/index.php>, 2018. Abgerufen: 20.5.2018.
- [14] GeoGebra, “Geogebra classic 6,” 2018. <https://www.geogebra.org/download>.
- [15] Universität Bonn, “Die Methode der Kleinsten Quadrate.” http://www.statistik.uni-bonn.de/fileadmin/Fachbereich_Wirtschaft/Einrichtungen/Statistik/ws0809/Zusatzmaterial-Regression.pdf. Abgerufen: 16.6.2018.
- [16] The SciPy community, “numpy.linalg.solve.” <https://docs.scipy.org/doc/numpy/reference/generated/numpy.linalg.solve.html>, 2018. Abgerufen: 12.6.2018.
- [17] Cornelsen Verlag, *Das große Tafelwerk interaktiv 2.0*. Cornelsen Verlag, Berlin, 2011. 1. Auflage.

6.2 Bilder



Abbildung 6.1: Ein Cherenkov-Detektor
Quelle: [11]



Abbildung 6.2: Fluoreszenzteleskope
Quelle: [11]

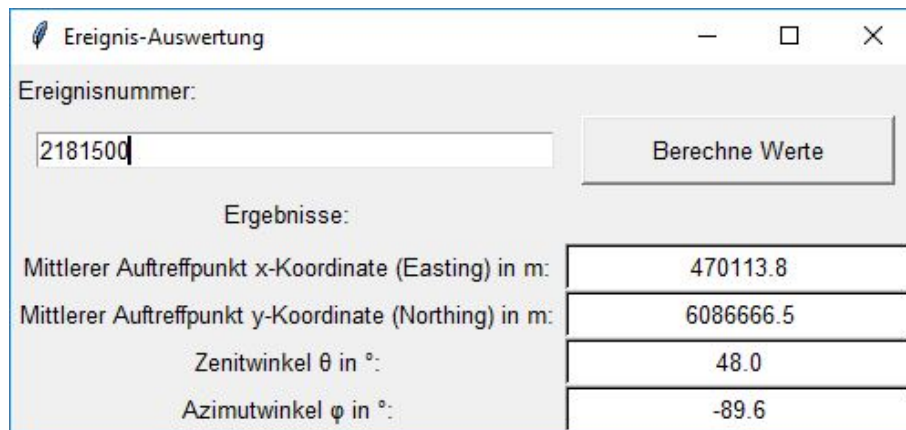


Abbildung 6.3: Ausgabebeispiel zum Ereignis 2181500

6.3 Vollständiges Python-Programm

```
import math #Package für simple mathematische Operationen
import numpy #Package für komplexere mathematische Operationen – hier zum
#Lösen eines Gleichungssystems
import urllib.request #Package zum Herunterladen der Daten aus dem Internet
from tkinter import * #Package für das Fenster
from tkinter import messagebox #Package für Mitteilungsfenster

# dies ist die Funktion, die ausgeführt wird, wenn der button gedrückt wurde
def berechneLösungen():
    #Aufrufen und Einlesen der Ereignisdatei
    ereignisnummer = ("000000" + ereignisnummereingabe.get())[-12:]
    try:
        ereignis =
        open("auger_public_event_" + ereignisnummer + ".txt").read()
    except OSError as e: #läuft, falls Ereignis nicht im selben Ordner ist
        messagebox.showerror("Fehler", "Datei ist nicht im Zielordner!")
    if messagebox.askyesno(message="Möchten sie das Ereignis aus dem
    Internet herunterladen?"): # Abfrage, herunterladen aus dem Internet
        try: #versucht mit der eingegebenen Nummer die Datei
            #herunterzuladen
            urllib.request.urlretrieve
            (('http://auger.uni-wuppertal.de/ED/_asciievent.php?evid='+
            ereignisnummer), ('auger_public_event_'+ereignisnummer+'.txt'))
            # herunterladen der Datei aus dem Internet
            ereignis =
            open("auger_public_event_" + ereignisnummer + ".txt").read()
            # öffnen und lesen der Datei
        except: #falls das Herunterladen nicht funktioniert
            messagebox.showerror("Fehler beim Herunterladen der Datei!",
            "1. Bitte überprüfen Sie Abrufbarkeit der Datei auf
            \"http://auger.uni-wuppertal.de/ED/index.php?\"\\n2. Bitte
            überprüfen Sie die Ereignisnummer") # Infofeld zur
            #Fehlerbehebung
            return # hier wird die Funktion beendet!
    else:
        messagebox.showinfo("Viel Glück!", "Neuer Versuch!") # Öffnen eines
        #Infofeldes, Neuer Versuch wird eingeleitet
        return # hier wird die Funktion beendet!
```

```

if '\n' in ereignis: #Formatierung des Strings (Entfernen der Absätze)
    ereignis=ereignis.replace('\n'," ")

liste = ereignis.split(" ") #Aufteilen des Strings in Liste aus vielen
#Daten

del liste[:8] #Spaltenköpfe löschen

del liste[len(liste)-1] #unnötiges Element am Ende löschen

stationsid = [] #listen definieren
signal = []
sec = []
nanosec = []
easting = []
northing = []
hoehe = []

for i in range(len(liste)): #listen füllen
    listennummer = i % 7
    if listennummer == 0:
        stationsid.append(liste[i])
    if listennummer == 1:
        signal.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 2:
        sec.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 3:
        nanosec.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 4:
        easting.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 5:
        northing.append(float(liste[i]))
    if listennummer == 6:
        hoehe.append(float(liste[i]))

messungszahl = len(stationsid) #Anzahl der betroffenen Stationen

anfangssekunde = min(sec)

for i in range(messungszahl): #Maßnahme, falls sich die Sekunde während
#des Ereignisses ändert
    sec[i] = sec[i] - anfangssekunde

for i in range(messungszahl): #Umwandeln der Zeiten in Angaben in
#Nanosekunden
    nanosec[i] = nanosec[i] + sec[i]*1000000000

anfangsnanosekunde = min(nanosec)

for i in range(messungszahl): #Reduzieren der Nanosekunden auf Differenz
#zum ersten Messpunkt
    nanosec[i] = nanosec[i] - anfangsnanosekunde

gewstaerke = 0
gesamtsignal = 0

```

```

for i in range(messungszahl): #gewichtetes Mittel in x-Richtung
    gewstaerke = (signal[i]) * (easting[i]) + gewstaerke
    gesamtsignal = gesamtsignal + signal[i]
xmittel = gewstaerke/gesamtsignal

gewstaerke = 0
gesamtsignal = 0

for i in range(messungszahl): #gewichtetes Mittel in y-Richtung
    gewstaerke = (signal[i]) * (northing[i]) + gewstaerke
    gesamtsignal = gesamtsignal + signal[i]
ymittel = gewstaerke/gesamtsignal

zenitwinkels = []
#Erstellen einer Liste mit allen Zenitwinkeln
for i in range(messungszahl):
    for k in range(messungszahl):
        try:
            d = ((easting[i]-easting[k])**2+(northing[i]-northing[k])**2)
                **0.5
            deltat = nanosec[i]-nanosec[k]
            s = deltat*0.3
            theta = math.asin(s/d)
            theta = (theta*180)/math.pi
            zenitwinkels.append(theta)
        except ZeroDivisionError: #tritt auf wenn i und k gleich sind und
            #d Abstand einer Station zu sich selbst wäre, daher Ausnahme
            pass

zenitwinkel = max(zenitwinkels) #Zenitwinkel ermitteln (größter aus
#zenitwinkels ist Annäherung für den zenitwinkel)

x = easting
y = northing
z = []
for i in range(messungszahl): #Berechnung der Koordinaten der
#Schauerfront zum Zeitpunkt des ersten Auftreffens
    z.append(nanosec[i]*0.3/math.cos((zenitwinkel/180)*math.pi))

summex2 = 0
summexy = 0
summex = 0
summey2 = 0
summey = 0
summexz = 0
summeyz = 0
summez = 0
for i in range(messungszahl): #Berechnung der Summen zur Ebenenregression
    summex2 = summex2 + x[i]**2
    summexy = summexy + x[i]*y[i]
    summex = summex + x[i]
    summey2 = summey2 + y[i]**2
    summey = summey + y[i]
    summexz = summexz + x[i]*z[i]
    summeyz = summeyz + y[i]*z[i]
    summez = summez + z[i]

```

```

a = [[summex2, summexy, summex], [summexy, summey2, summey],
     [summex, summey, messungszahl]] #Aufstellen der Matrizen
b = [summexz, summeyz, summez]
koeffizienten = numpy.linalg.solve(a,b) #Lösen des Gleichungssystems

normalenvektor = [koeffizienten[0], koeffizienten[1], -1] #normalenvektor
#ist der auf die Oberfläche projizierte; Berechnung des Azimutwinkels aus
#den Koeffizienten
betrag = (normalenvektor[0]**2+normalenvektor[1]**2)**0.5
projektionwest = normalenvektor[0]*-1
quotient = projektionwest/betrag
azimut = math.acos(quotient)
azimut = azimut*180/math.pi
if normalenvektor[1] > 0: #Umwandlung in "richtigen" Azimut, da beim
#acos Befehl die Nord-Süd Orientierung nicht erhalten bleibt
    azimut = -azimut

#Ausgabe: ändern des Textes in dem Ausgabefeld
loesungen[0].config(text=round(xmittel, 1)) # ausgeben des
#Auftrittspunktes x-Koordinate
loesungen[1].config(text=round(ymittel, 1)) # ausgeben des
#Auftrittspunktes y-Koordinate
loesungen[2].config(text=round(zenitwinkel, 1)) # ausgeben des
#Zenitwinkels
loesungen[3].config(text=round(azimut, 1)) # ausgeben des Azimutwinkels

# Widgets
window = Tk()
window.title("Ereignis-Auswertung") # Überschrift für das Programm

# Lösungsüberschrift
labelEingabe = Label(master=window,
    width=19, # def der Breite des Feldes
    text="Ereignisnummer:", # Beschriftung des Feldes
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    padx=2, # Abstand links und rechts
    pady=4,
    anchor=W) # Abstand oben und unten

# erstellen des Knopfes "berechne"
berechne = Button(master=window,
    text="Berechne Werte", # Beschriftung des Knopfes
    width=20, # def der Breite des Knopfes
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    command=berechneLoesungen, # verknüpfen der Funktion "berechneLösung" mit
#dem Knopf "berechne"
    padx=2, # Abstand links und rechts
    pady=6) # Abstand oben und unten

# eingabe der Ereignisnummer
ereignisnummereingabe = Entry(master=window,
    bg="white", # Hintergrundfarbe: weiß
    fg="black", # Schrift-/Vordergrundfarbe: schwarz
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    width=40) # def der Breite der Eingabe

# Lösungsüberschrift

```

```

labelLösung = Label(master=window,
    width=10, # def der Breite des Feldes
    text="Ergebnisse:", # Beschriftung des Feldes
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    padx=2, # Abstand links und rechts
    pady=6) # Abstand oben und unten

# Def. der Felder der Größen in einer Schleife,
#da alle gleich aufgebaut sind
grosen = [Label(master=window,
    width=37, # def der Breite des Feldes
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    padx=2, # Abstand links und rechts
    pady=3) # Abstand oben und unten
    for i in range(4)]

# Def. der Lösungsfelder
loesungen = [Label(master=window,
    width=23, # def der Breite des Feldes
    text="0", # Beschriftung des Knopfes
    bg="white", # Hintergrundfarbe: weiß
    fg="black", # Schrift-/Vordergrundfarbe: schwarz
    font=("Arial", 10), # festlegen der Schriftart und Größe der Schrift
    padx=2, # Abstand links und rechts
    pady=3, # Abstand oben und unten
    relief=SUNKEN) # Einstellung: das Feld ist nach hinten gerückt
    for i in range(4)]

# Layout erstellen
#column = Spalte, row = Zeile
labelEingabe.grid(column=0, row=0, columnspan=5) # erscheinen der Felder für
#die Größen
ereignisnummereingabe.grid(column=0, row=1, columnspan=15) # erscheinen des
#Eingabefeldes auf 0,0 mit einer Breite von 10
berechne.grid(column=15, row=1) # erscheinen des berechnen Buttons
labelLösung.grid(column=0, row=2, columnspan=10) # erscheinen des
#LösungLabels

for i in range(3,7):
    grosen[i-3].grid(column=0, row=i, columnspan=10) # erscheinen der Felder
    #für die Größen
    loesungen[i-3].grid(column=11, row=i, columnspan=10) # erscheinen der
    #Felder für die Lösungen

# Betiteln der berechneten Größen
grosen[0].config(text="Mittlerer Auftreffpunkt x-Koordinate
(Easting) in m:")
grosen[1].config(text="Mittlerer Auftreffpunkt y-Koordinate
(Northing) in m:")
grosen[2].config(text="Zenitwinkel \U000003b8 in °:")
grosen[3].config(text="Azimutwinkel \U000003c6 in °:")

window.mainloop()

```

6.4 Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich diese Arbeit selbstständig angefertigt, nur die angegebenen Hilfsmittel verwendet und alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, durch Angabe der Quellen als Übernahmen kenntlich gemacht habe.