

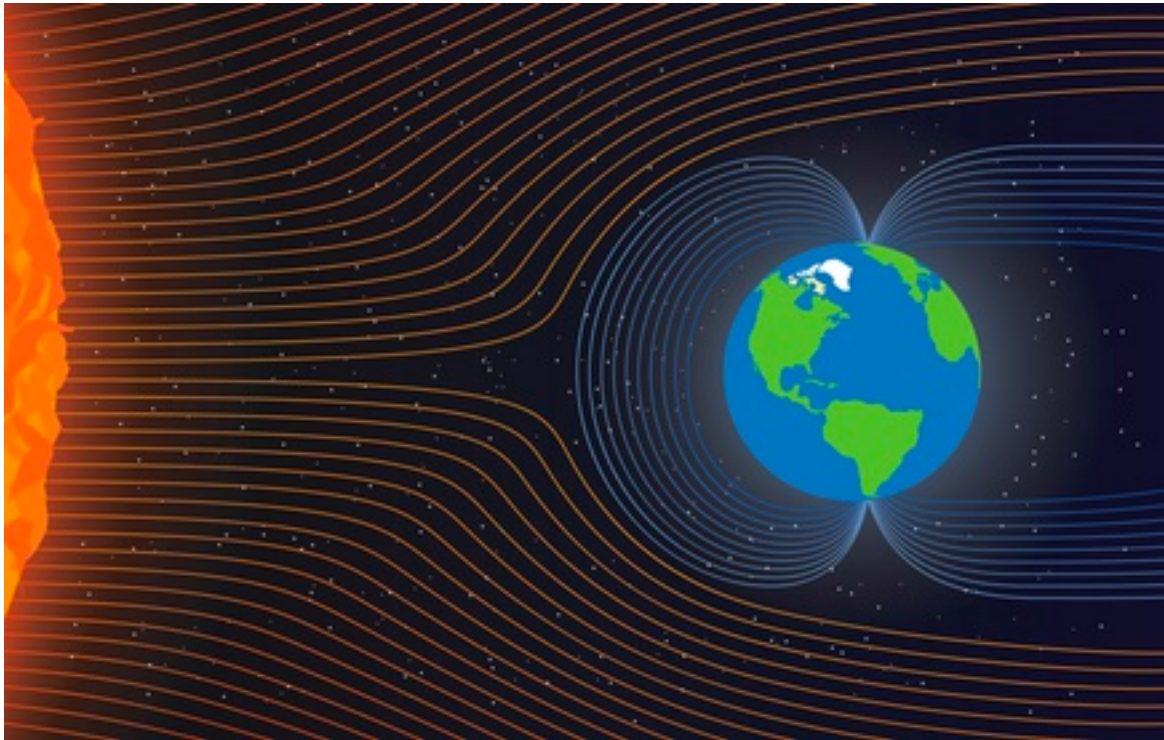
Projekt: Durchgehende präzise und robuste Messung des Erdmagnetfeldes

Jugend forscht Landeswettbewerb Niedersachsen 2022

Florian von Barga (16)

Projektbetreuer: Dr Hans-Otto Carmesin und Inga von Barga

Fachgebiet: Physik



(Bild 1: Das Erdmagnetfeld und die magnetischen Stürme der Sonne)

Mein Projekt befasst sich mit der hochpräzisen Aufzeichnung des Erdmagnetfeldes. Die Sonne hat einen großen Einfluss auf die Schwankungen dieses Feldes. Um diese Schwankungen im Erdmagnetfeld aufzuzeichnen, habe ich eine Messstation errichtet. Dabei habe ich besonders auf eine störungsfreie Umgebung geachtet, um hochgenau aufzuzeichnen. Anfang November 2021 wurde über Polarlichter in Deutschland, verursacht durch eine große Sonneneruption berichtet. Diese können moderne GPS- und Kommunikationstechnik stören. Mit meiner selbstgebauten Messstation konnte ich eine deutliche Veränderung des Erdmagnetfeldes messen, es war die größte Eruption, die ich bisher aufgezeichnet habe. Das ist einer von vielen Sonnenstürmen, die ich aufgezeichnet habe. Durch Vergleiche konnte ich zeigen, dass meine Station die Sonnenstürme präzise aufzeichnet. Die Soft- und Hardware der Messungen wurde in mehreren Entwicklungsschritten verbessert, u.a. im Bereich Informatik und einer unabhängigen Stromversorgung.

Inhaltsverzeichnis:

1. Einleitung	Seite 3
1.1 Idee	Seite 4
1.2 Ziel	Seite 4
1.3 Mittel zur Zielerreichung	Seite 5
2. Stand der Technik	Seite 5
3. Versuch 1: Messung mit einem Hall-Sensor	Seite 5
3.1 Aufbau	Seite 5
3.2 Methode	Seite 5-6
3.3 Ergebnisse Versuch 1	Seite 6
4. Versuch 2: Messung mit Fluxgate-Sensor	Seite 6
4.1 Aufbau	Seite 6-7
4.2 Methode	Seite 8
4.3 Ergebnisse Versuch 2	Seite 8
5. Versuch 3: Aufbau und Inbetriebnahme einer eigenen stationären Messstation mit einem Fluxgate-Sensor	Seite 8
6. Kalibrierung des Sensors	Seite 9
6.1 Maßnahmen zum Ausschließen systematischer Messungenauigkeiten	Seite 9
6.1.1 Abschirmung des Erdmagnetfeldes durch Mu-Metall 07.07.2020	Seite 9
6.2 Messung im Wald abseits zivilisatorischer Störfelder 29.08.2020	Seite 9-10
7. Stationäre Messstation	Seite 10-11
7.1 Aufbau der stationären Messstation ab September 2020	Seite 11-12
7.2 Methode	Seite 12-13
7.3 Ergebnisse der stationären Messstation	Seite 13-17
8. Ergebnisdiskussion	Seite 17
8.1 Ausblick	Seite 17
9. Literaturnachweis, Quellenverzeichnis und Materialien	Seite 18-20
10. Unterstützungsleistung und Danksagung	Seite 21

1. Einleitung

Die Sonne sendet ständig Strahlung und geladene Teilchen in den Weltraum. Neben Lichtteilchen den Photonen, sendet sie auch geladene Teilchen aus. Diesen stetigen **Teilchenstrom** bezeichnet man als Sonnenwind. In der obersten und heißesten Sonnenschicht heizen sich die Partikel stark auf und können so die Gravitation des Sterns überwinden. Hauptsächlich handelt es sich um Protonen und Elektronen, die mit Geschwindigkeiten von 400 bis 800 Kilometer pro Sekunde ins All schießen. Die Sonne kann so pro Sekunde etwa eine Million Tonnen an Material verlieren (Quelle 1).

Von einer **Sonneneruption** spricht man, wenn dieser Strom für kurze Zeit und in einem begrenzten Gebiet deutlich stärker ist als sonst. Es bilden sich riesige Plasmabögen (Flares) aus, die die Magnetfeldlinien der Sonne aufbrechen und neu bilden. Dieses Phänomen nennt man Rekonnexion (Quelle 2 und 3). Die Strahlung und die Teilchen, die bei einer Sonneneruption entstehen, bewegen sich durchs All und können auch auf die Erde treffen. Die Folgephänomene, die dort in Gang gesetzt werden, bezeichnet man als **Sonnensturm**.

Die Plasmawolke bewegt sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 1000 Kilometern pro Sekunde durchs All und benötigt somit etwa ein bis zwei Tage bevor sie die Erde erreicht. Der Großteil der Teilchen ist jedoch langsamer und braucht deshalb länger. Die Plasmawolke ist für viele der Auswirkungen, die bei einem Sonnensturm auf der Erde beobachtet werden können, verantwortlich. Das Erdmagnetfeld ist so groß, dass Sonnenstürme größtenteils abgeschirmt werden, doch ab und zu sind Sonnenstürme so stark, dass sie dieses durchbrechen.

Am Äquator hat das Magnetfeld der Erde eine Stärke von ca. 0,03 Millitesla = 30 Mikrottesla (Quelle 4). An den Polen ist der Wert etwa doppelt so hoch. Zum Vergleich liegt der Wert in Norddeutschland bei 50 MT. In der Nähe der Pole treten die Magnetfeldlinien unseres Planeten in die Erde ein.

Das Magnetfeld der Erde bildet sich hauptsächlich aus Konvektionsströmen, also aus Strömen flüssigem Metalls, aus dem Erdkern. „Diese Strömungen bilden sich durch aufsteigendes heißes flüssiges Material, das sich bei gleichzeitiger Abkühlung vom heißen Kern fortbewegt und dann wieder in Richtung inneren Kern sinkt.“ - ESA (Quelle 5). Dieses Magnetfeld kann sich auf der Schattenseite der Erde bis hinter den Mond erstrecken, da der Sonnenwind einen Schweif erzeugt.

Die geladenen Teilchen werden vom Magnetfeld der Erde so abgelenkt, dass sie in einem Ring um die Erde kreisen, dem Van-Allen-Gürtel. Die Teilchen verformen das Magnetfeld, je nach Stärke des Sonnenwindes. Sie bewegen sich auf kleinen Schraubenlinien um die Magnetfeldlinie herum. Entlang dieser Linien treffen sie dann auf die Atmosphäre. Der besonders schöne Nebeneffekt ist, dass wir dieses dann als Polarlichter in den Polarregionen sehen können (Quelle 1).

1.1 Idee

Sonnenstürme können einen großen Einfluss auf unser Leben auf der Erde haben. Die hochenergetischen Teilchen besitzen eine ionisierende Wirkung, und sind in der Lage so unerwünschte elektrische Ströme aufzuladen.

Durch die hochenergetischen Teilchen, können Stromleitungen überlasten. Die in Häusern verbauten Schutzschalter, die vor Überspannungsschäden schützen, sind daher in Deutschland Pflicht (Quelle 6). Heftige Sonnenstürme können zu Stromausfällen führen, Daten von Festplatten löschen, Satelliten und den Flugverkehr lahmlegen. Dieses würde zu unangenehmen Einschränkungen in unserem täglichen Leben führen, und hohe Kosten verursachen. 1989 legte ein heftiger Sonnensturm in Quebec in Kanada das Stromnetz für neun Stunden lahm. So ein Blackout kann schwere Folgen mit sich ziehen z.B. in der Stromversorgung wichtiger Einrichtungen, wie z.B. Krankenhäusern und Flughäfen. Auch für die Wirtschaft können durch Ausfälle oder Schäden in der Produktion oder dem Transport von Gütern hohe Kosten und/oder Versicherungsfälle entstehen.

2012 hat ein Sonnensturm die Erde nur knapp verfehlt, Studien zufolge hätte dieser Sonnensturm die doppelte Kraft wie 1989 in Quebec gehabt (Quelle 7). Die Wahrscheinlichkeit für einen „Super-Sonnensturm“ liegt von 2014-2024 bei 12%. Wie groß die Folgen und Schäden für die Zivilisation wären ist kaum abzuschätzen, die Wissenschaft ist sich uneins.

Auch Umpolungen können im normalen Langzeitverhalten des Erdmagnetfeldes beobachtet werden. Diese geschehen jedoch über sehr lange Zeitspannen von mehreren tausend Jahren.

Sonnenstürme messen zu können und vielleicht auch vorherzusagen ist wichtiger denn je. Denn unser tägliches Leben hängt sehr von der dauerhaften Stromversorgung ab. Da die voranschreitende Digitalisierung manuelle Maschinen ersetzt, und dadurch eine totale Abhängigkeit durch die Stromversorgung besteht. Außerdem werden immer mehr Daten digital gespeichert. Für diese Datenspeicher wird Strom benötigt. Kommt es zu einem Stromausfall kann dann nicht darauf zurückgegriffen werden. Dieses führt zu Ausfällen in der Wirtschaft z.B. bei der Produktion von Waren und Gütern, und legt unser Arbeitsleben zu großen Teilen lahm. Der Unterschied zu konventionellen Katastrophen liegt darin, dass eine Sonneneruption ganze Kontinente betrifft, und die Reparatur bei einem großflächigem Ausfall Monate benötigt, und (lebens-) wichtige Infrastruktur somit nicht zur Verfügung steht.

1.2 Ziel

Das Ziel ist Sonnenstürme anhand von Magnetfeldschwankungen mit einem eigenen Sensor messen zu können. Die Messdaten werden danach analysiert und ausgewertet (ähnlich dem Versuch 1). Dabei wird der Mittelwert der drei Richtungen und des Betrages (x, y, z und Betrag Mittelwert) gebildet. Diese bilden die Grundlage für die Voraussage der nächsten Sonnenstürme. Mit genügend Daten kann dann eine fundierte Voraussage zu Veränderungen im Magnetfeld getroffen werden.

1.3 Mittel zur Zielerreichung

Ich werde diese Messdaten mithilfe des Sensors FLC3-70 der Firma Stefan Mayer Instruments auf einem Raspberry Pi, mithilfe einer Micro-SD-Karte speichern. Die Voraussagen werden mithilfe anderer Messungen (beispielsweise PTB; Punkt 2) gestützt. Die Messung mit Satelliten oder Teleskopen, welche die Sonnenaktivität aufzeichnen, bietet auch einen Zeitvorteil, da die Sonnenstürme zuerst die Satelliten erreichen, bevor sie meinen Sensor antreffen. Dadurch kann ebenfalls eine Vorkehrung in Bezug auf Intensität und des Eintreffens auf der Erde abgewogen werden.

2. Stand der Technik

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist das nationale Metrologie-Institut der Bundesrepublik Deutschland und eine Bundesoberbehörde. Diese besitzt in Braunschweig eine Messstation, um das Erdmagnetfeld zu messen. Die Messdaten werden online live zur Verfügung gestellt (Quelle 8). Das Gelände ist weitgehend von störenden Fremdfeldern befreit, und wurde 1978 aufgrund von Untersuchungen speziell für eine magnetische Messung ausgesucht. Das Sondenhaus steht etwa 80 Meter abseits fremder Bebauung, um sporadisch auftretende Störfelder, verursacht durch die Bevölkerung, zu vermeiden.



(Bild 2: Das Sondenhaus der PTB)

Nanotesla (nT)	1.000.000.000
Microtesla (μT)	1.000.000
Millitesla (mT)	1.000
Tesla (T)	1

(Bild 3: Die Einheiten von Tesla)

3. Versuch 1: Messung mit einem Hallsensor

3.1 Aufbau

In den meisten Smartphones und Tablets ein Magnetsensor verbaut. Der sogenannte Hallsensor bietet eine Genauigkeit von 10^{-6} T. Ein iPad Air der 1. Generation (2013) ist in meinem erstem Versuch als Sensor benutzt worden. Das Tablet wurde in eine wetterfeste Plastikbox mit einem Ladekabel gelegt. Die App „phyphox“ der RWTH Aachen (Quelle 9) wurde geöffnet, und die Messung „Magnetfeld“ gestartet. Ab dann misst das Gerät alle magnetischen Änderungen auf der x/y/z Ebene. Die Box mit dem Tablet wurde außen am Dachstuhl des Hauses fixiert, um bessere Ergebnisse zu erzielen (siehe Bild 4).

3.2 Methode

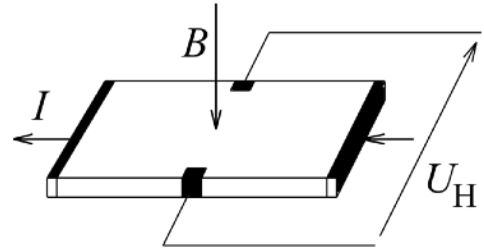
Die „pyphox“ App nimmt die Daten auf, und danach kann man diese als Auswertungsdatei exportieren. Die Messung findet 100 mal in der Sekunde statt.



(Bild 4: Box mit Tablet am Dachstuhl zwecks Messung)

Messprinzip des Hall-Sensors:

Durch zwei gegenüberliegende Elektroden wird ein Strom eingespeist. Die beiden orthogonal dazu liegenden Elektroden nehmen danach die Hall-Spannung ab. Dabei liegt die Ausgangsspannung proportional zum Betrag des Vektorproduktes. Dabei kann die Temperatur das Vektorprodukt beeinflussen (Quelle 10).



(Bild 5: Messprinzip des Hall-Sensors)

3.3 Ergebnisse Versuch 1

Im ersten Versuch mit dem Tablet-Magnetsensor (Hall-Sensor) sind die Messergebnisse nicht präzise genug ausgefallen. Der Hall-Sensor misst Magnetfeldschwankungen im Bereich von Mikrottesla. Die meisten Sonnenstürme verursachen jedoch nur eine Magnetfeldschwankung von ein paar Nanotesla. In den professionellen Messungen der PTB (siehe Punkt 2) beträgt diese Schwankung teils mehrere 100 Nanotesla, welche mit dem Hall-Sensor somit nicht mehr gemessen werden können. Um eine Magnetfeldveränderung mit dem Hall-Sensor messen zu können, müsste also ein sehr starker Sonnensturm auftreten, welcher sehr selten vorkommt. Daher stelle ich fest, dass ein anderer Sensor erforderlich ist, um die erforderlichen Nanotesla messen zu können.

4. Versuch 2: Messung mit Fluxgate-Sensoren

Alle Probleme, die im ersten Versuch aufgefallen sind (siehe 3.3), deuten darauf hin, dass die Messdaten nicht eine zweckgemäße Präzision aufweisen. Daher habe ich mich entschlossen einen Sensor der Firma Stefan Mayer Instruments einzusetzen. Dieses Endgerät FLC3-70 wurde mir am 04.01.2020 zur Verfügung gestellt, und dieser erlaubt hochaufgelöste Messdaten im Bereich von Nanotesla (Quelle 11).

Ein zweiter und dritter FLC3-70 wurde mir am 14.02.2020 zur Verfügung gestellt. Ein Sensor wurde am 22.02.2020 in Bielefeld bei Verwandten aufgebaut. Der Versuchsaufbau dort unterscheidet sich nicht zu dem in Stade. Dieser zweite Standort wird benutzt, um den Unterschied des gemessenen Magnetfeldwertes sichtbar zu machen und auszuwerten. Die Daten beider Standorte werden in eine Excel Datei eingetragen. Mit dieser nun vorhandenen Grundlage ist es möglich eine öffentliche Darstellung der Messergebnisse, ähnlich wie die Messungen der PTB, darzustellen und Dritten zugänglich zu machen. Der dritte Sensor wurde ebenfalls in Stade installiert, um den Sensor dort zu kontrollieren.

4.1 Aufbau

Die Entscheidung für ein Entwicklerboard lag dann bei einem Arduino oder einem Raspberry Pi. Da der Sensor auf 16-BIT arbeitet, ist die Wahl auf einen Raspberry Pi gefallen, welcher dies zuverlässig verarbeiten kann. Ich verwende ein Raspberry Pi 4 Model B (Material 1) zusammen mit einem Analog/Digital Konverter von joy-it (Material 2). Vorher habe ich es mit einem Arduino versucht zu programmieren, welches sich aufgrund der Zuverlässigkeit und Präzision als nicht günstig herausstellte. Auf einer Steckplatinen wird der Konverter gesteckt. Dieser wird über

Male-Female Kabel in der richtigen Zuordnung mit dem Raspberry Pi verbunden. Der Fluxgate Sensor wird auf eine ähnliche Weise mit dem Konverter verbunden, so dass der Output des Sensors durch den Konverter zu dem Raspberry gelangt. Der vorbereitete Versuch wird in ein Case eingebaut, um die hochwertigen Komponenten angemessen zu schützen. Dieser Aufbau wurde für den zweiten und dritten Sensor wiederholt.

Diese müssen vorerst dem Konverter zugewiesen werden. Danach werden die Kabel von dem Konverter dem Raspberry Pi zugewiesen.



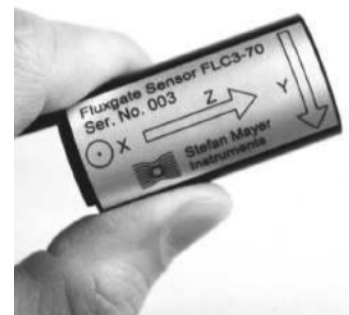
(Bild 6: Der Raspberry Pi 4 Model B)



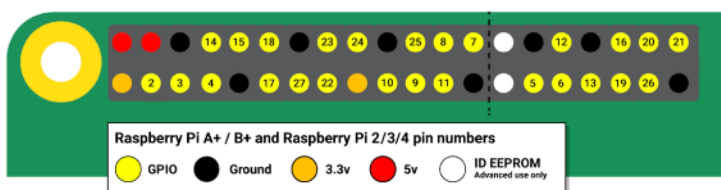
(Bild 7: Der Digital/Analog Konverter)

Der Sensor besitzt sechs Anschlüsse:

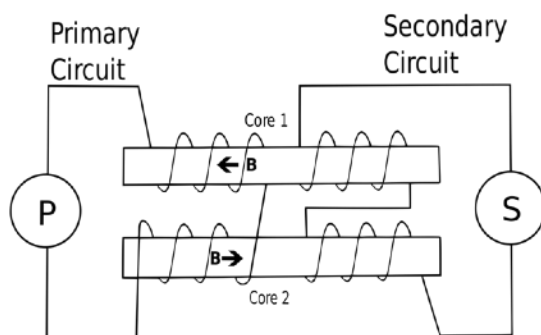
1. Strom (5V)
2. Ground
3. X-Richtung
4. Y-Richtung
5. Z-Richtung
6. OUT Bezugssignal



(Bild 8: Der FLC 3-70 Fluxgate Sensor von Stefan Mayer Instruments)



(Bild 9: Pin Belegungen des Raspberry Pi)



(Bild 10: Das Messprinzip des Fluxgate Sensors)

Messprinzip des Fluxgate-Sensors:

Die beiden Kerne (Core 1, Core 2) sind von Empfängerspulen umwickelt. Bei Abwesenheit eines Magnetfeldes wird die Spannung aufgehoben ($V=0$). Wenn nun ein Magnetfeld auftritt, ist die Sättigung des einen Kernels früher erreicht, als der andere. Diese Asymmetrie ist proportional zur Feldänderung und wird als Spannungsveränderung wiedergegeben (Quelle 12).

Der Sensor zeigt mit den drei Spannungswerten die gemessene elektromagnetische Veränderung in Volt. Es wird in drei Richtungen gemessen. Diese werden als xv, yv und zv dargestellt. Mit den drei „raw-Werten“ (x-row, y-row, z-row) werden die zugehörigen Messwerte der Spannungsveränderungen in den unterschiedlichen Richtungen dargestellt.

4.2 Methode

Jetzt wird der Aufbau einigen Tests unterzogen, welche die Ergebnisse auf systematische Fehler überprüfen. Ein Teil dieser systematischen Fehler konnte bereits durch das out-Signal verringert werden. Wenn diese bestanden sind, ist es sicher, dass ein erfolgreicher Tages- und Nachtrhythmus aufgezeichnet werden konnte. Als Referenz dienen die Aufzeichnung der PTB. Der Tages- und Nachtrhythmus weist Schwankungen im Bereich von 1‰ auf (Quelle 8).

4.3 Ergebnisse Versuch 2

Der Sensor FLC3-70 der Firma Stefan Mayer Instruments erlaubt hochaufgelöste Messdaten im Bereich von Nanotesla. Der Betrag ist das Ergebnis aus den zusammengefassten Werten: x-row, y-row, z-row. Die Formel zur Berechnung lautet:

$$(\text{x-row}^2 + \text{y-row}^2 + \text{z-row}^2)^{0,5} = \text{Betrag}$$

Die Messdaten zeigten, dass eine Erfassung von Messwerten der elektromagnetischen Veränderungen durch die beiden Sensoren FLC3-70 erfolgreich vorgenommen werden konnte. Die gespeicherten Werte konnten ebenfalls erfolgreich auf der Micro-SD-Karte abgespeichert werden, und als Messdatentabelle sowie als Diagramme gezeigt werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Sensoren eine systematische Messungenauigkeit aufweisen, welcher beispielsweise am Mittelwert-Betrag zu erkennen ist. Diese Ungenauigkeit ist weitaus größer, als die statistischen Messungenauigkeiten. Die Standardabweichungen dabei betragen 5 Nanotesla, dies ergibt sich durch das Mitteln von 300 Werten, die in 150 Sekunden aufgezeichnet wurden. Diese Schwankung deuten wir als stochastische Messungenauigkeit. Die systematischen Messungenauigkeiten dagegen wurden untersucht.

Das Ziel des Versuch 2 war, die systematischen Messungenauigkeiten auf 0,1‰ zurückzuführen, denn dadurch ist eine hochdetaillierte Messung des Tages- und Nachtrhythmus möglich. Der „Zwei-Sensor-Betrieb“ stellte sich, nach Absprache mit dem Sensorhersteller als kontraproduktiv heraus, da sich die Spulen gegenseitig anregen, und das Messergebnis verfälschen.

5. Versuch 3: Aufbau und Inbetriebnahme einer eigenen stationären Messstation mit einem Fluxgate-Sensor

Zur weiteren Verbesserung meiner Messdaten und Ausbau meines Projektes habe ich die Vorgehensweise und den Aufbau einer Messstation der PTB als Vorbild genutzt, da diese in einer störungsfreien Umgebung Messdaten aufzeichnet (siehe Punkt 2).

6. Kalibrierung des Sensors

Um die systematischen Messungenauigkeiten zu untersuchen, welche in dem vorherigem Versuch aufgetreten sind, wurde der Sensor einer Kalibrierung durchgezogen.

6.1 Maßnahmen zum Ausschließen systematischer Messungenauigkeiten

6.1.1 Abschirmung des Erdmagnetfeldes durch Mu-Metall 07.07.2020

Ich habe nach einer Alternative zu Stahl gesucht, welcher der erste Gedanke zur Abschirmung der Felder war. Die Idee zur Abschirmung mit Stahl habe ich jedoch nach ein paar Tagen verworfen, da das Bauen einer Box aus Stahlplatten und das Erreichen einer Abschirmung des Magnetfeldes durch Erhitzen bis zur Curie-Temperatur nicht gelungen ist (Quelle 13-15). Ich bin bei weiteren Recherchen auf Mu-Metall gestoßen (Material 3). Mu-Metall ist von Natur aus magnetisch abschirmend (Quelle 16). Diese einfache Lösung hat mir schließlich den Nachweis auf eine Abschirmung von 2 Mikrottesla (95% Abschirmung) gebracht.

Ergebnis:

Die Ergebnisse zeigten, dass die zuvor aufgetretene Messungenauigkeit nicht systematisch verursacht wurde. Da ein systematischer Fehler ausgeschlossen werden konnte, mussten die anderen möglichen Ursachen für derart schwankende Ergebnisse untersucht werden. Eine bekannte Störung des Magnetfeldes ist die Zivilisation. Hochspannungsleitungen und Autos haben einen großen Einfluss auf die Messergebnisse des Erdmagnetfeldes. Hinzu kommt, dass diese Faktoren nicht konstant, also sporadisch auftreten. Die PTB etwa hat, um diese Störungen auszuschließen, ihr Sondenhaus 80 Meter entfernt von zivilisatorischen Störungsquellen gebaut (Quelle 17). Um den Einfluss der Zivilisation auf die Messergebnisse zu untersuchen, muss eine ruhigere Umgebung gefunden werden.

6.2 Messung im Wald abseits zivilisatorischer Störfelder 29.08.2020

Um ähnliche Ergebnisse wie die PTB erzielen zu können, habe ich ebenfalls nach einer möglichst ungestörten Umgebung gesucht. Da die bisherigen Messungen den Abstand zu populären Störfeldern nicht eingehalten haben, ist eine ähnliche Umgebung zu schaffen wie die der PTB erfolgsversprechend. Am 29.08.2020 habe ich dann eine Messung in einem naheliegenden Wald vollzogen. Dort sind geringere Störfelder zu erwarten, wie in den Versuchen zuvor. Die Messung wurde auf einer Styropor-Platte aufgebaut, um Erschütterungen des Bodens, und damit die Beeinflussung der Ergebnisse zu minimieren. Außerdem wurde die Box mit einem Gewicht versehen, um minimale Bewegungen, wie sie etwa der Wind verursacht, auszuschließen. Den Strom liefert eine mobile Powerbank, welche einen Meter abseits der Messung steht, da ein Lithium-Ionen Akku ebenfalls minimale Störfelder verursacht. Die Messergebnisse zeigen, dass sich der Verdacht



(Bild 11: Die Messung im Wald)

bestätigt hat, dass die Zivilisation einen störenden Einfluss auf die Genauigkeit der Messung hat. Um eine möglichst natürliche Darstellung des Erdmagnetfeldes zu gewährleisten, wird eine stationäre Messstation außerhalb der bekannten Störfaktoren eingerichtet. Dies lässt viel bessere Ergebnisse erwarten als eine mobile Station, da ein Langzeitverlauf aufgezeichnet werden kann.

7. Stationäre Messtation

Bei der Suche eines stationären Standortes und auch bei dem Bau der Station mussten die Faktoren für eine möglichst unbeeinflusste Messung beachtet werden. Um dies zu gewährleisten, sollte der Sensor in 80cm Bodentiefe eingegraben werden. In 80cm Bodentiefe sind die Temperaturschwankungen reduziert, außerdem sind keine witterungsbedingten Störungen zu erwarten zum Beispiel durch Wind, Regen und Hagel. Auch minimale Positionsveränderungen durch Windstöße werden dadurch reduziert, wie sie etwa bei der Installation am Hausdach entstanden sind (siehe Versuch 1). Die Standortsuche gestaltete sich schwierig, da eine Fläche gefunden werden musste, die 80 Meter entfernt von Bebauung und anderen Störungen (Hochspannung, Autos) ist. Außerdem sollte eine Stromversorgung und eine Internetverbindung gewährleistet sein. Um eine geeignete Umgebung zu finden, habe ich Messreihen an möglichen Standorten unter Berücksichtigung des Abstandes zur Bebauung vollzogen. Diese fanden am 6. und 9. September an einem Feldweg im Bützflethermoor in Stade statt. Die aufgezeichneten Daten waren vielversprechend, der Standort schien also geeignet um das Magnetfeld aufzuzeichnen. Die Stromversorgung gestaltete sich dort schwierig, sodass an ein Konzept mit Solarmodulen und einem Akku gedacht wurde. Da dies zu aufwendig und störanfällig ist, habe ich mich weiter nach geeigneten Standorten in unmittelbarer Umgebung erkundigt. Das Gebiet rund um das Bützflethermoor ist sehr geeignet, da es dünn besiedelt ist, und Störfelder der Bevölkerung auf ein Minimum reduziert sind. Die Jury des Regionalwettbewerbes Celle 2021 hat mich anschließend darauf hingewiesen, dass bei der Messstation verlegte unterirdische Leitungen das Magnetfeld stören könnten. Daraufhin habe ich am 20.02.2021 Kontakt zu EWE, dem Regionalen Stromanbieter aufgenommen. Diese stellten mir die Pläne dieses Gebietes zur Verfügung. Mithilfe der Auskunft konnte ich ausschließen, dass dort Stromleitungen vergraben worden sind, welche Störfelder erzeugt hätten.

Nach einigen Gesprächen hat sich nur 500m entfernt von den ersten erfolgreichen Testmessungen im Bützflethermoor eine neue Möglichkeit aufgetan. Dort wohnende Freunde können die Messstation dauerhaft mit Strom und Internet versorgen. Daraufhin habe ich am 13. September eine Testmessung an diesem Standort getätigt, welche den bekannten Kriterien für eine störungsfreie Messung entsprechen, diese war ebenfalls vielversprechend. Dieser Standort scheint der am besten geeignete Standort von den bis dahin getesteten. Daher habe



(Bild 12: Die Entfernung der Messstation zu der Bebauung aus der Vogelperspektive)



(Bild 13: Die Testmessung im Bützflethermoor)

ich mich dazu entschieden dort eine stationäre Station zu bauen. Um eine ähnliche Umgebung zu schaffen wie die PTB, wird meine Station ebenfalls 80m abseits der übrigen Bebauung gebaut.

7.1 Aufbau der stationären Messstation - ab 09/2020

Stationäre Messstation:

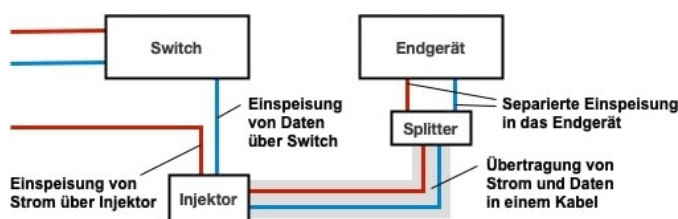
Vorab wurde ein Kanalgrundrohr (KG-Rohr) mit 1,4 Meter Länge besorgt. Das untere Ende wurde mit Beton versiegelt, um eine Wasserdichte zu erreichen wenn das Rohr an seinem Standort eingegraben wird. Meine Station wird in Bützflethermoor, einem landwirtschaftlich geprägtem Ortsteil mit Moorgebiet von Stade, aufgebaut. Dafür darf ich einen Ackerrand nutzen, der selten bewirtschaftet wird. Freunde meiner Eltern haben ein Einfamilienhaus mit Grundstück anliegend zu dem Acker, sodass ich von denen Strom und Internet beziehen kann. Dafür wurde am Grundstücksrand eine Gartensteckdose verlegt, an die ich meinen Aufbau anschließen kann. Von diesem Punkt aus, habe ich am 29.09.20 mit meiner ganzen Familie ein Kabel über ungefähr 80 Meter in das Erdreich an den Ackerrand verlegt, um diesen Abstand von der Messstation bis zur Bebauung erreichen zu können. Dieser ist wichtig, um zivilisatorische Störfaktoren weitgehend auszuschließen.



(Bild 14: Das KG-Rohr im Boden)

Anschließend haben wir das Rohr ca. 80 cm in das Erdreich vergraben. Das obere Ende guckt ca. 60cm aus dem Erdreich, und kann mit einem Deckel wasserdicht verschlossen werden. Auf dem Betonboden des Rohres liegt der Fluxgate-Sensor in einer Box mit dem erforderlichem Zubehör. Der Hohlraum zwischen dem Boden mit dem Sensor und dem Deckel wurde mit Schaumstoff als Isolierung ausgefüllt, um eine konstante Temperatur des Sensors zu erreichen.

Für die Strom- und Internetversorgung habe ich mich für ein PoE (Power over Ethernet) Kabel entschieden. Dieses ist kostengünstig und ermöglicht, Strom und Internet über ein Kabel zu übertragen. Der Vorteil ist, dass nur ein Kabel verlegt werden muss, um Stromversorgung und Internet für den Datenexport bereitzustellen. Bei der PoE- Technologie wird mithilfe eines PoE-Injectors Strom eingespeist. Um Strom und Internet über eine Leitung zu entnehmen, benötigt es ein PoE fähiges Endgerät. Der Raspberry Pi 4B ist erst nach einer Aufrüstung PoE fähig. Daher habe ich mich für einen PoE Splitter entschieden. Dieser trennt den Strom und das Internet wieder auf zwei verschiedene Kabel (Quelle 18).



(Bild 15: Das verwendete PoE-Schema)

Danach habe ich ein 100m langes Cat 7 Ethernetkabel, welches damit PoE fähig ist verlegt (Material 4). Bevor dieses angeschlossen werden konnte, habe ich das Verlegekabel noch an Netzwerkstecker angeschlossen

(Material 5). Dabei musste die PoE Technik am Anfang des Kabels wetterfest verbaut werden.

Wetterfeste Box an der Gartensteckdose auf dem Grundstück:

An der Gartensteckdose habe ich eine wetterfeste Box (Bild 16) für das erforderliche Equipment abgelegt und mit Schaumstoff isoliert. Der Inhalt ist eine PoE fähige unterbrechungsfreie Stromversorgung, welche bei einem Stromausfall die Messung ohne Unterbrechung einige Stunden versorgen kann, bis das Stromnetz wieder verfügbar ist (Material 6), und ein Powerline Adapter (Material 7). Diese werden durch eine Steckdosenleiste mit Strom versorgt. Der Powerline Adapter überträgt Internet via WLAN-Verbindung aus dem Haus in das Stromnetz des Kabels bis zum Abnehmer. Von dem Adapter führt ein Ethernetkabel an die unterbrechungsfreie Stromversorgung. Diese wandelt Strom und Internetverbindung um für das 100m lange PoE-Kabel bis zum Sensor in der Messstation. Die verbaute USV liefert bis zu 48V und 24 Watt, welches ausreicht für den Raspberry Pi. Über die 100m Ethernetkabel wandelt sich jedoch ein Anteil des Stroms in Wärme um, somit erreichen noch 22,4 Watt den Raspberry. Dieser verbraucht im Leerlauf 4,4 Watt und bei maximaler Last 7,6 Watt (Quelle 19). Ich wurde durch meine Betreuer auf mögliche Gefährdungen hingewiesen. Daher habe ich die Gefährdung anhand der DIN VDE 0100 Teil 410 Schutzspannung bis 60 V DC beurteilt und kein Risiko festgestellt.



(Bild 16: Der Inhalt der Box am Anfang des Kabels)

Wetterfeste Box mit dem Sensor in der Messstation:

Der Sensor mit Raspberry Pi wurde ebenfalls in einer wetterfesten Box verstaут. Das PoE Kabel endet in der Box an einem PoE Splitter (Material 8). Dieser trennt Strom und Internet auf zwei verschiedene Kabel. Diese Box wurde dann in das Rohr herabgelassen. Da der Fluxgate Sensor temperaturanfällig ist, und sich die Messdaten eventuell verfälschen, wurde der restliche Hohlraum des Rohrs mit Schaumstoff ausgefüllt. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu belegen, wurde am 29.12.2020 ein Temperatur Sensor DS18B20 (Material 9) angebaut. Dieser liefert Aufschluss über den Temperaturverlauf in der Box und hilft, die Messergebnisse zu untersuchen.



(Bild 17: Der Inhalt der Box am Ende des Kabels in dem KG-Rohr)

7.2 Methode

Die Daten meiner Messstation kann ich nun mit denen der PTB korrelieren, um die prozentuale Genauigkeit und Ähnlichkeit der Messdaten zu errechnen. Bild 18 zeigt die Messdaten der PTB auf der zugehörigen Website dargestellt.



(Bild 18: Die Messwerte der PTB)

Programmierung:

Bei der Programmierung der stationären Station konnte ich vieles aus dem Programm des Versuches 2 benutzen. Doch um den Einbau der weiteren komplizierten Programmänderungen durchzuführen habe ich nach Unterstützung gesucht. Schließlich bin ich durch den Informatikunterricht mit einem Schüler mit Python Kenntnissen in Kontakt getreten, der ein ähnliches Programmierungsprojekt durchführt, sodass wir voneinander profitieren. Seit dem 10.11.2020 besprechen wir die nächsten Schritte der Programmierung, welche ich dann umsetze. Seit der Installation der Messstation liefert diese verlässlich Messdaten, die ich über eine Remote-Desktop Verbindung von Zuhause ablesen und auswerten kann. Dabei habe ich bis zu dem 5.01.2021 den TeamViewer Client genutzt, dieser ist jedoch häufig nach dem Neustart des Raspberry abgebrochen. Das ist ein großes Problem, da ich einen 20 minütigen Anfahrtsweg bis zu der Messstation habe. Um eine stabilere Verbindung gewährleisten zu können, bin ich auf RealVNC-Viewer gewechselt. Dieses ist auf dem Raspberry zuverlässiger als TeamViewer. Außerdem ist der Quellcode Open-Source, also öffentlich einsehbar. Doch langfristig sind diese Lösungen zeitaufwendig. Daher wird aktuell an einem Log-System gearbeitet, wobei alle Werte aufgezeichnet werden und nichts verloren gehen kann. Bei der Auswertung der Daten können die Rohdaten als Backup dienen. Dadurch wird für Stabilität bei zukünftigen längeren Messungen gesorgt.

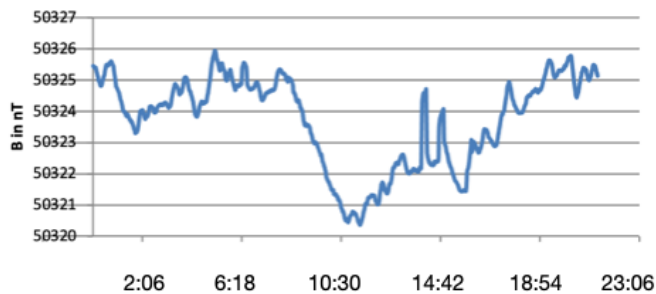
Das Programm misst zwei Mal pro Sekunde. Nach 150 Werten oder 75 Sekunden werden die gemessenen Werte gemittelt und in die Tabelle eingetragen. Das wird gemacht, um statistische Fehler zu verringern, und damit führt eine Mittelung zu einem genaueren Ergebnis. Außerdem zeichnet das Python Programm die Temperatur und die RAM-Auslastung auf. Diese Daten sind wichtig, um einen Einblick in die Umweltbedingungen der Messung zu bekommen.

Die Messreihen seit Januar 2022 werden alle 60- statt 75 Sekunden gemittelt, da dies bei der Korrelation mit anderen Messstationen, welche ebenfalls alle 60 Sekunden einen Wert aufzeichnen, praktikabler ist. Der aktuell genutzte Python Code ist unter: <https://github.com/Zyzonix/MGFieldPy/> zu finden. Außerdem ist eine Statusseite vorhanden, welche im Störfall zusätzliche Informationen liefert: <http://status.florianvonbargen.de/>

7.3 Ergebnisse der stationären Messstation

Die Datenanalyse erfolgt folgendermaßen: zuerst muss berechnet werden, wie viele Werte einem Tag (24 Stunden) entsprechen. Da alle 75 Sekunden ein Wert entsteht, benötigt es 1152 Werte für 24 Stunden. Danach wurden die Werte nummeriert. Dabei ist „diff“ der zuvor berechnete Faktor des Aufwärtstrends, falls es einen gibt. Der Aufwärtstrend entsteht dann, wenn der Deckel der Station geöffnet wird und die Isolationsschicht abgenommen wird, um Hardware-Veränderungen vorzunehmen. Dann strömt die Umgebungsluft in die Röhre und kühlt damit die gesamte Station. Sobald die Station wieder verschlossen wird, heizt sich die Luft nach und nach auf, geschuldet der Abwärme des Raspberry Pi und der Sonneneinstrahlung. Damit habe ich künstlich den Aufwärtstrend mindern. Lässt man nun diese Daten graphisch darstellen, zeigt dies den Tagesverlauf des Erdmagnetfeldes. Zu sehen ist, dass wie erwartet das Erdmagnetfeld zu der Mittagszeit schwächer ist, als den Rest des Tages. In einer weiteren Berechnung, um den Gesamtverlauf der Station darzustellen, kam es zu einem unnatürlichen Bruch. Die Messwerte fielen auf einmal

ab, zeichneten daraufhin wieder den Tagesverlauf auf, und nach einigen Tagen stiegen die Werte sprunghaft auf das vorherige Niveau. Dieser Vorfall wurde untersucht, ich habe die Hypothese aufgestellt, dass ein sporadisches Fremdfeld die Störung verursacht hat, da der Messaufbau keine Fehler aufwies und alle möglichen Ursachen untersucht worden sind. Ein Vorfall wie dieser ist innerhalb von eineinhalb Jahren nicht noch einmal aufgetreten. Der Graph und die zugehörigen Daten mit ihren Formeln sind im Anhang zu finden.



(Diagramm 1: Der gemittelte Tagesverlauf meiner Station)

In Diagramm 1 ist gut zu erkennen, dass ein deutliches Tagesminimum zu erkennen ist. Meine Deutung ist, dass der Solar quiet-Strom, ein Dynamo, welcher dem Mittagsstand der Sonne folgt, das Magnetfeld eindrückt (siehe Bild 1). Dies zeichnet die Station auf. Dieser Effekt ist Mittags am stärksten. Dieses Tagesminimum tritt auch bei den Messungen der

PTB auf, und ist charakteristisch für den normalen Tagesverlauf des Erdmagnetfeldes. Diese nutze ich, um meine Daten mit denen der PTB zu korrelieren. Eine Korrelation zeigt sowohl die Unterschiede als auch die Gemeinsamkeiten der beiden Messungen auf. Unterschiede weisen auf die verschiedenen Sensoren oder auf die abweichenden Begebenheiten des Standortes hin. Um die Messdaten zu korrelieren habe ich den Betrag des Tagesminimums beider Stationen in einer Tabelle aufgeführt. Um dies zu erreichen ist es wichtig, eine lange Messreihe aufzuzeichnen.

Die Dauer und gleichzeitig die Qualität der Aufzeichnung zu verbessern stellte sich als eine große Herausforderung dar, konnte jedoch über die letzten Monate immer weiter verbessert werden.

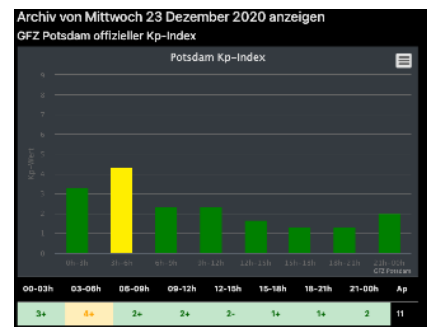
Wenn ich eine Korrelation anfertige, frage ich die Daten der PTB des benötigten Monats an. Die Ansprechpartner der Abteilung Magnetische Messfeldtechnik an der PTB, Dr. Martin Albrecht und Dipl.-Ing. Hans Harcken stellen mir ihre Daten zur Verfügung. Eine Korrelation meiner Messstation mit einer Bundesoberbehörde wie der PTB liefert einen qualitativen Abgleich zur Einordnung meiner Messgenauigkeit. Eine Korrelation ist ein Messprozess zur Feststellung und Dokumentation der Abweichung eines Messgerätes (mein Fluxgate-Sensor) gegenüber einem anderen Messgerät (PTB), das in diesem Fall als maßgeblich eingeordnet werden kann. Dazu gehört anschließend auch die Berücksichtigung der ermittelten Abweichung bei der Benutzung und Deutung der Messdaten von meinem Sensor zur Korrektur zum maßgeblichen Messgerät (Quelle 20).

Eine Korrelation der Beträge des Tagesminimum ist wie zu erwarten nicht aussagekräftig genug. Die lokalen Begebenheiten sind dafür zu unterschiedlich. Daher wird eine Korrelation der Uhrzeiten des Minimums erstellt.

Ergebnis Dezember 2020

Eine Korrelation des Dezember Monats 2020 hat mir erstmalig bestätigt, dass meine Station hochauflösend - ähnliche wie die der PTB aufzeichnen kann.

Am 23. Dezember 2020 hat meine Station um 3:58 Uhr ein Tagesminimum gezeigt. Das Tagesminimum der PTB wurde 49 Minuten später um 4:47 Uhr aufgezeichnet. Es wurde daraufhin der Kp-Index des 23. Dezember aufgerufen, dieser zeigt die geomagnetische Aktivität (Quelle 21,22). Der Kp-Index ist von 3:00-6:00 Uhr UTC erhöht (Kp-Index 4+, Bild 21). Nun wird zu dieser Zeit eine Stunde addiert, um die mitteleuropäische Zeit (MEZ) zu errechnen. Laut diesen Berechnungen war das Erdmagnetfeld von 4:00-7:00 Uhr besonders aktiv. Dies bestätigt einen gemeinsamen Zusammenhang der beiden Magnetfeldmessungen. Ein weiteres Ereignis hat nur meine Station am 20. Dezember 2020 um 3:38 Uhr aufgezeigt, dieses wurde von der PTB nicht aufgezeichnet. Ein weiteres Ereignis am 22. Dezember um 0:22 Uhr, zeigte nur die PTB auf. Entfernt man die beiden Ereignisse, welche jeweils nur von einer Station aufgezeigt wurden, erhält man einen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,70314$. Fügt man allen drei Ereignissen den Korrelationskoeffizienten hinzu, sinkt der Korrelationskoeffizient deutlich auf $R = 0,23409$.



(Bild 19: Der Kp-Index des 23. Dezember)

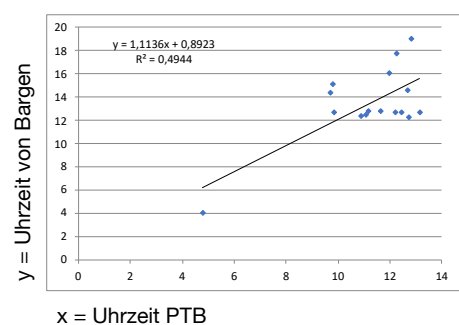


Diagramm 2: Die Korrelation der beiden Stationen

Werden alle drei Ereignisse entfernt, beträgt der Korrelationskoeffizient $R = 0,16523$. Die Kalkulationstabellen finden Sie im Anhang unter OneDrive: <https://1drv.ms/f/s!ArwSq4QFJCingZftaGYi9LOFABU>

Ergebnis November 2021

Anfang November 2021 gab es eine große Sonneneruption. Die Medien haben zwei Tage vor dem Auftreten berichtet, auch darüber dass Polarlichter in Deutschland gesehen werden könnten. Ich habe zu diesem Zeitpunkt keine Polarlichter gesehen, jedoch die Magnetfelder, die den Polarlichtern entsprechen. Wie sich herausstellte war dieses Ereignis eine der 44. stärksten geomagnetischen Stürme seit 1994 (Quelle 23). Messstationen konnten vom 3.11- 4.11.21 eine große Anomalie aufzeichnen, so auch meine Station. Der KP-Index an diesen Tagen lag in der Spitze bei 8-. Im Vergleich dazu lag der KP-Index bei dem Ereignis am 23.12.2020 nur bei 4+. Die Auswertung hat ergeben, dass dies der größte Sonnensturm war, den meine Messstation seit September 2020 aufgezeichnet hat.



Diagramm 3: Magnetfeldmessdaten der Wingst, PTB, Hel und meiner Station im Vergleich, Zeitraum 3.11.21 18:35 - 4.11.21 23:00

In Diagramm 3 ist das Ereignis des 3.11 - 4.11.21 zu erkennen. Für den Messdatenvergleich wurde die bereits beschriebene Station der PTB genutzt. Außerdem konnte ich über intermagnet.org noch Daten von zwei weiteren Stationen ausfindig machen. Auf intermagnet.org gibt es öffentlich zugängliche Daten von mehreren hundert Stationen weltweit. Dies ermöglicht mir meine Daten mit dutzenden Stationen - nur einige hundert Kilometer entfernt von meiner Station - abzugleichen und auf Korrelationen zu untersuchen. Oberhalb sind die Messdaten der PTB, der Station Hel in Polen und die der Wingst, einer Messstation nicht weit von meiner Station, eingetragen. Die Stationen messen unterschiedliche Intensitäten, welche auf den Standort und die verschiedenen Messmethoden zurückzuführen sind. Die Veränderungen, verursacht durch den Sonnensturm ist gut zu erkennen. Ähnlich ist es mit dem grünen Graphen - meiner Messung. Die Messdaten der Messstationen in der Wingst, Hel und von der PTB sind vergleichbar mit meinen Messdaten. Es fällt auf, dass die vier Stationen eine große zeitliche Variabilität aufweisen. Auch der Vergleich mit der Station in der Wingst, welche nur wenige Kilometer von meiner Station entfernt ist, weist große zeitliche Verschiebungen von teilweise mehr als 5 Minuten auf. Dies habe ich so deutlich nicht erwartet. Die Vergleichbarkeit der vier Stationen stellt sich als sehr günstig heraus für eine Deutung oder Analyse meiner Messdaten. Somit können auch die zeitlichen Variabilitäten besser und genauer aufgeschlüsselt werden. Durch diese wegweisende Erkenntnis können weitere Analysen der vier Stationen miteinander verglichen werden. Um das Ereignis selbst gut darstellen zu können, und den Faktor der Zeitverzögerung zu untersuchen, habe ich in einem Stackplot die Zeitdifferenz verschiedener Stationen des 53-55. Breitengrades abgezogen. Zu den bekannten Stationen kommen zwei Observatorien aus England hinzu: Valentia und Eskdalemuir. Alle gezeigten Ergebnisse und die Graphen sind unter: <http://florianvonbargen.de/downloads/> zu finden.

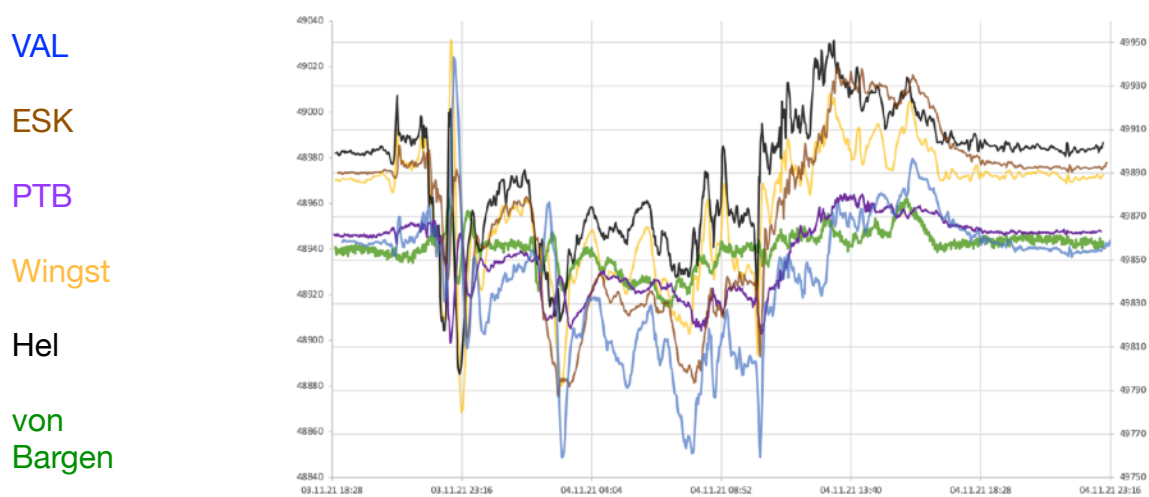


Diagramm 4: Das Ereignis des 3.11.21 - 4.11.21, herausgerechnet: die zeitliche Differenz zwischen den Stationen, Florian von Bargaen

Die Ergebnisse aus Diagramm 4 sind sehr interessant. Alle Stationen zeigen einen erstaunlich ähnlichen Ausschlag, wenn die zeitliche Differenz zwischen allen Stationen abgezogen wird. Es ist auf die Minute genau eine sehr ähnliche Veränderung aufgezeichnet, obwohl die Stationen bis zu 1317 km auseinander liegen! Dies lässt mich schlussfolgern, dass dieser Sonnensturm sehr zentriert die Erde getroffen hat. Die geladenen Teilchen zerstreuen sich also auf dem Weg durch das All nicht. Dies lässt mich darauf schließen, dass es einen selbstfokussierenden Effekt gibt, welcher dafür sorgt, dass alle Stationen einen nahezu gleichen Verlauf

messen. Wäre dies nicht der Fall, würden die Graphen nicht so ähnlich verlaufen wie hier zu sehen. Auf 1317 km Entfernung hätte ich eine sichtbare Veränderung des Messverlaufs erwartet, doch dies war in diesem Fall nicht so. Ich werde weitere Observatorien, welche weiter entfernt sind als die aktuell verwendeten, in einen Vergleich aufnehmen um diese Beobachtung zu verifizieren.

8. Ergebnisdiskussion

Die Korrelation ermöglicht eine mir eine sehr wertvolle Art von Analyse. Dabei sticht vor allem das Ereignis am 23.12.2020 und am 3.11- 4.11.2021 hervor. Beide Ereignisse haben bewiesen, wie genau meine Station das Erdmagnetfeld aufzeichnen kann. Die Verbesserungen im Bereich Genauigkeit und Robustheit der Messung haben dazu einen großen Teil beigetragen. Durch Korrelationen und Vergleiche der Magnetfeldmessungen mit denen der PTB und der Station in der Wingst konnte die Aussagekraft meiner Daten bestätigt werden. Die großen Auswirkungen des Sonnensturms selbst sind gut dokumentiert, der weitere Verlauf weist Unterschiede zwischen den vier Stationen auf. Diese werden in folgenden Ereignissen untersucht. Der neue Messdatenvergleich mit der Wingst, der PTB, Hel wird beibehalten, da interessante Ergebnisse aufgetreten sind. Für die deutlichen Variabilitäten zwischen den vier Stationen gibt es derzeit keine einfache oder zufriedenstellende Erklärung. Um diese Ergebnisse einordnen zu können, müssen weitere Ereignisse folgen, um wiederholende Entwicklungen beobachten zu können.

8.1 Ausblick

Wie auch in der Vergangenheit wird die Messstation im Bützflethermoor immer weiter verbessert. Besonders die Programmierung ist noch zu verbessern, dies kann die Effektivität zukünftigen Analysen und Stationen steigern. Durch ein Praktikum bei Stefan Mayer Instruments konnte ich viele neue Erkenntnisse erlangen. Für die nächsten Entwicklungsschritte werde ich mich weiterhin mit Stefan Mayer Instruments absprechen. Durch Stefan Mayer habe ich Kontakt zu Dr. Beggan aufbauen können, welcher als Professor für Geophysik an der Universität Edinburgh eine ähnliche Versuchsreihe aufgebaut hat, auch hier werde ich weiterhin Kontakt aufrechterhalten um sich auszutauschen.

Ich möchte die zeitlichen Variabilitäten, welche sehr deutlich aus den Ergebnissen des November 2021 hervorgehen ausgiebig untersuchen. Das es innerhalb Niedersachsens eine so große zeitliche Variabilität des Erdmagnetfeldes gibt, habe ich so nicht erwartet. Bei der Analyse und Interpretation zukünftiger Messreihen wird besonders auf diese Verschiebung geachtet. Für diese Untersuchung eignet sich das Programm „INTERMAGNET“. Dort stellen hunderte Observatorien ihre Messdaten ein, dadurch entsteht ein großes Netz an Stationen, verteilt über den Globus. Die Daten internationaler Stationen möchte ich benutzen, um das Verhalten des Erdmagnetfeldes zu untersuchen. Mein Ziel ist es Teil dieses Programmes zu werden, um zu der Erdmagnetfeld-Forschung beizutragen. Dazu muss meine Station eine große Zahl an Kriterien erfüllen. Daher arbeite ich hart daran die Qualität und Stabilität weiter zu steigern.

Mein zukünftiges Ziel ist es mehrere Messstationen installieren, um dann eine veranschaulichende Darstellung der unterschiedlichen Ergebnisse erstellen können. Sobald der ständige Betrieb der Messstation im Bützflethermoor sichergestellt ist, kann ein weiterer stationärer Standort aufgebaut werden. Dieser sollte weit entfernt der ersten Station gebaut werden, da die Ergebnisse dann unterschiedlich ausfallen. Dadurch kann ich einen wichtigen Beitrag dazu leisten, die zeitliche Verschiebung verschiedener Standorte zu untersuchen, um weitere Erkenntnisse daraus ableiten zu können.

9. Literaturnachweis, Quellenverzeichnis und Materialien:

Bild 1: Das Erdmagnetfeld und die magnetischen Stürme der Sonne, https://nicolevandieken.com/wp-content/uploads/2015/11/Fotolia_90488691_XS_Magnetfelder_Sonne_Erde.jpg

Quelle 1: Felix Spanier, Welt der Physik, 10.06.2011, „Der Einfluss des Sonnenwindes auf die Erde“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/sonnenwind/#>, aufgerufen am 10.02.2020

Quelle 2: Jan Oliver Löffken, Welt der Physik, 12.05.2016, „Wie magnetische Stürme entstehen“, <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/news/2016/wie-magnetische-stuerme-entstehen>, aufgerufen am 10.02.2020

Quelle 3: Rekonnexion, Wikipedia, <https://de.wikipedia.org/wiki/Rekonnexion>, aufgerufen am 10.02.2020

Quelle 4: <https://www.chemie.de/lexikon/Erdmagnetfeld.html>, aufgerufen am 14.01.2020

Quelle 5: ESA Deutschland, Erdmagnetfeld, https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Das_Erdmagnetfeld_Ein_riesiger_Dynamo, aufgerufen am 14.01.2022

Quelle 6: Überspannungsschutz, <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%9Cberspannungsschutz>, aufgerufen am 11.02.2020

Quelle 7: NASA - Supersonnensturm, https://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2014/23jul_superstorm, aufgerufen am 14.01.2022

Quelle 8: Die live-Erdmagnetfeldmessung der PTB, <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>, aufgerufen am 31.12.2020

Bild 2: Das Sondenhaus der PTB, https://www.ptb.de/cms/index.php?eID=tx_cms_showpic&file=78223&md5=263df805a0ceb42771801fd1dfa1aff90db34653¶meters%5B0%5D=eyJ3aWR0aCI6IjkwMG0iLCJoZWlnaHQiOiI3MDEtliwiYm9keVRhZyl6Ijxib2R5¶meter%5B1%5D=IHN0eWxIPVwibWFyZ2luOjA7IGJhY2tncm91bmQ6I2ZmZjtlcj4iLCJ3cmFwIjoj¶meters%5B2%5D=PGEgaHJlZj1clmphaFzY3JpcHQ6Y2xvc2UoKTtclj4gfCA8XC9hPiJ9, aufgerufen am 03.01.2020

Quelle 9: „phyphox“ physical phone experiments, RWTH Aachen Universität, <https://apps.apple.com/us/app/phyphox/id1127319693?l=de&ls=1>, geladen am 20.12.2019

Bild 3: Einheiten von Tesla und Umrechnung, <https://www.convertworld.com/de/magnetische-flussdichte/millitesla.html>, aufgerufen am 15.01.2022

Bild 4: Eigene Aufnahme, Florian von Barga vom 31.12.2019, Vorversuch: Box mit Tablet am Dachstuhl unseres Hauses

Bild 5: Messprinzip des Hall-Sensors, <https://de.wikipedia.org/wiki/Hall-Sensor#/media/Datei:Halleffekt.svg>, 02.02.2020

Quelle 10: Hall-Sensor, <https://de.wikipedia.org/wiki/hall-sensor>, aufgerufen am 11.02.2020

Quelle 11: Der Sensor der Firma Stefan Meyer Instruments, <https://stefan-mayer.com/de/produkte/magnetometer-und-sensoren/magnetfeldsensor-flc3-70.html>, Dezember 2019

Bild 6: Eigene Aufnahme, Florian von Barga vom 05.01.2020, der Raspberry Pi 4 Model B

Material 1: Raspberry Pi 4 Model B 1GB Ram, https://www.reichelt.de/de/de/raspberry-pi-4-b-4x-1-5-ghz-1-gb-ram-wlan-bt-rasp-pi-4-b-1gb-p259874.html?&trstct=pos_0

Bild 7: Eigene Aufnahme, Florian von Barga vom 05.01.2020, der Digital/Analog Konverter für Raspberry Pi von joy-it

Material 2: Der ADC Konverter für Raspberry Pi, https://www.reichelt.de/de/de/raspberry-pi-analog-digital-konverter-rpi-adc-p226847.html?&trstct=pos_2

Bild 8: Der FLC3-70 von Stefan Mayer Instruments, <https://stefan-mayer.com/en/products/magnetometers-and-sensors/magnetic-field-sensor-flc3-70.html>, 28.01.2020

Bild 9: Pin-Belegung des Raspberry Pi, <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>, 05.01.2020

Bild 10: Das Messprinzip eines Fluxgate Sensors, https://de.wikipedia.org/wiki/Fluxgate-Magnetometer#/media/Datei:Magnetometro_fluxgate.svg, 2.02.2020

Quelle 12: <https://de.wikipedia.org/wiki/Fluxgate-Magnetometer>, aufgerufen am 11.02.2020

Quelle 13: Ferromagnetismus, <https://de.wikipedia.org/wiki/Ferromagnetismus>, aufgerufen am 03.01.2021

Quelle 14: Curie-Temperatur, <https://de.wikipedia.org/wiki/Curie-Temperatur>, aufgerufen am 03.01.2021

Quelle 15: Curie-Temperatur von Stahl, <https://www.netzsch-thermal-analysis.com/de/contract-testing/glossar/curie-temperatur/>, aufgerufen am 03.01.2021

Material 3: Mu-Metall, <https://www.reichelt.de/magnetfeldabschirmfolie-mu-metall-ac-dc-aar-ms-f-p154826.html>

Quelle 16: Mu-Metall Datenblatt, https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/D100/AAR_MS_F_DB.pdf

Quelle 17: Entfernung des Sondenhauses der PTB zu der Zivilisation, <https://www.google.de/maps/@52.2915517,10.4656467,512m/data=!3m1!1e3>

Bild 11: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom 29.08.2020, Die Messung im Wald

Bild 12: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom 19.12.2020,

Bild 13: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom 13.09.2020, Die Testmessung im Bützflethermoor

Bild 14: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom, das KG-Rohr im Boden

Quelle 18: Die PoE-Technologie, <https://www.reichelt.de/magazin/ratgeber/power-over-ethernet/>

Bild 15: Das verwendete PoE-Shema, <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0807021.htm>

Material 4: 100m Cat 7 Ethernet Kabel, https://www.amazon.de/dp/B077XKYGYM/ref=cm_sw_r_wa_apip_QtuGQgBKnpX4q

Material 5: RJ45 Netzwerkstecker, https://www.amazon.de/dp/B07HKNHTLB/ref=cm_sw_r_wa_apip_waQR6teyiHA8l

Material 6: PoE USV 10000mAh https://www.amazon.de/Unterbrechungsfreie-Stromversorgung-Eingebauter-Powerbank-Batterie-Schwarz/dp/B07PHQNLFY?ref=ast_sto_dp&th=1&psc=1

Material 7: Powerline Adapter tp-link, https://www.amazon.de/TP-Link-TL-PA4010-s-Ethernet-Port-energiesparend-kompatibel/dp/B00A0VBPLM/ref=sr_1_11?mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=I43HVJH6N11K&keywords=tp+link+powerline&qid=1642272708&srefix=tp+link+powerline%2Caps%2C126&sr=8-11

Material 8: PoE-Splitter USB Type C, https://www.amazon.de/dp/B07TJ3ZNJ4/ref=cm_sw_r_wa_apip_56uXmB1pvak5y

Quelle 19: Leistungsaufnahme Raspberry Pi 4B, <https://www.heise.de/ct/artikel/Raspberry-Pi-4-4-GB-Byte-RAM-4K-USB-3-0-und-mehr-Rechenpower-4452964.html#:~:text=Die%20Leistungsaufnahme%20des%20Raspberry%20Pi,und%20Gigabit%2DEthernet%2DVerbindung.>, abgerufen am 2.01.2021

Bild 16: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom 19.12.2020, der Inhalt der Box am Anfang des Kabels

Material 9: DS18B20 Temperatur-Sensor wasserdicht, <https://eckstein-shop.de/3m-DS18B20-Digital-Wasserdicht-Temperatur-Sensor-Modul-LS4G>

Bild 17: Eigene Aufnahme, Florian von Bargaen vom 29.09.2020, der Inhalt der Box am Ende des Kabels in dem KG-Rohr

Bild 18: Die Messwerte der PTB, <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/fachabteilungen/abt2/fb-25/ag-251/live-daten-erdmagnetfeldmessung.html>

Diagramm 1: Der gemittelte Tagesverlauf meiner Station, Florian von Bargaen, 14.01.2020

Quelle 20: Die Kalibrierung, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kalibrierung>, 11.01.2020

Quelle 21: Der Kp-Index, <https://www.gfz-potsdam.de/Kp-index/>, 15.01.2020

Quelle 22: Das Space Weather Archiv- Kp-Index vom 23. Dezember 2020: <https://www.spaceweatherlive.com/de/archiv/2020/12/23/kp.html>

Bild 19: GFZ Potsdam offizieller Kp-Index 23.Dezember 2020, <https://www.spaceweatherlive.com/de/archiv/2020/12/23/kp.html>

Diagramm 2: Die Korrelation der beiden Stationen, Florian von Bargaen, 15.01.2020

Quelle 23: Die Top 50 geomagnetischer Stürme, <https://www.spaceweatherlive.com/de/polarlicht/top-50-geomagnetischer-sturme.html>, 14.01.2022

Diagramm 3: Magnetfeldmessdaten der Wingst, PTB, Hel und meiner Station im Vergleich, Zeitraum 3.11.21 18:35 - 4.11.21 23:00, 15.01.21 Florian von Bargaen

Diagramm 4: Das Ereignis des 3.11.21 - 4.11.21, herausgerechnet: die Zeitliche Differenz zwischen den Stationen, Florian von Bargaen

10. Unterstützungsleistungen und Danksagung

Ich möchte mich sehr bei Herrn Dr. Carmesin bedanken. Er begleitet dieses Projekt schon lange und steht mir jederzeit, auch in den Ferien, mit Rat und Tat zu Seite. Herr Carmesin hat mich bei der fachlichen Durchführung unterstützt.

Inga von Barga danke ich für die vielen hilfreichen Zielweisungen, der Fassung meiner Arbeit, dem Bau der Messstation und den vielen Stunden und Nerven bei der Besprechung der aktuellen Ergebnisse.

Ich bedanke mich bei der Firma Stefan Mayer Instruments für die kostenlose Bereitstellung der Sensoren, der an Privatpersonen sonst nicht verkauft wird und sehr teuer ist. Dabei hat mich Herr Dipl.-Phys. Dr. Philipp Glasenapp sehr unterstützt.

Peer Dietzmann danke ich für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Programmierung der stationären Messstation und der in Aufbau befindlichen Server-Struktur. Wir sind beide Schüler der Brecht-Schule Hamburg und werden im Informatikunterricht durch unsere Lehrkräfte, in meinem Fall Frau Turan, sehr gut gefördert und uns wird ein persönlicher Arbeitsplatz an der Schule bereitgestellt. Damit erfahren wir eine gute Unterstützung unserer Schule für unser persönliche Weiterentwicklung.

Bei Dipl. Ing. Hans Harcken, zuständig für die Magnetische Messstation an der PTB, möchte ich mich für die kurzfristige Bereitstellung der Messreihe der Dezember Daten danken.

Besonders möchte ich mich bei meiner gesamten Familie, einschließlich meiner Großeltern, bedanken, die mir beim Vergraben des 100 Meter langen Kabels auf dem Acker geholfen haben. Der Familie von N. von Schassen danke ich sehr, dass diese es mir ermöglicht haben meine Messstation mit Strom und Internet zu versorgen, sowie dem Landwirt C. von Schassen für die Möglichkeit zur Nutzung der Ackerfläche.

Dr Beggan hat mir als Geophysiker sehr geholfen. Ich wurde auf undeutliche Formulierungen aufmerksam gemacht und konnte Fragen stellen. Vielen Dank.