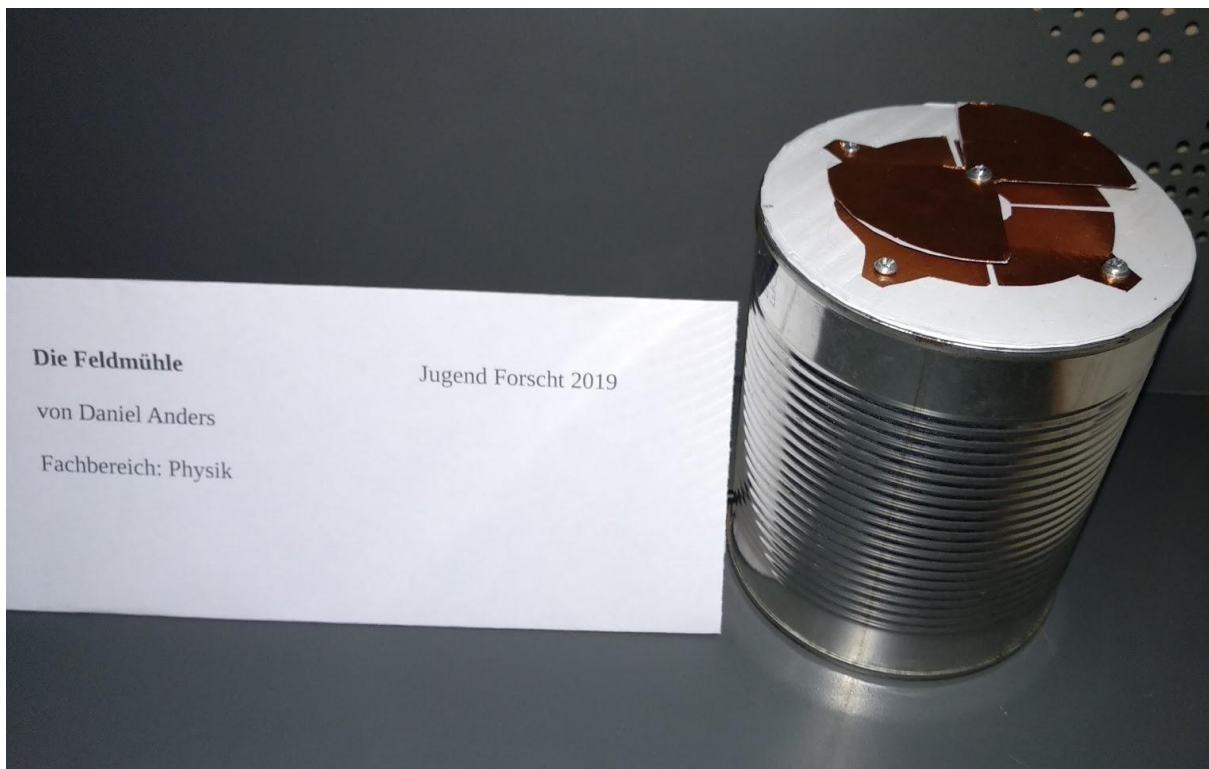




Die Feldmühle 2.0



von:	Daniel Anders
Betreuender Lehrer:	Freddy Stiehler
Schule:	Paul-Gerhardt-Gymnasium Gräfenhainichen
Fachbereich:	Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	2
2. Vorbetrachtung	2
2.1 Elektrische Felder in der Natur	2
2.2 Das elektrische Feld	2
3. Untersuchung der Spannungen an einer Feldmühlenmechanik	5
4. Schaltplan	6
5. Design der Mechanik	8
6. Software des Arduino	9
6.1 Grundlagen	9
6.2 Quelltext	9
7. Kalibrierung	10
7.1 Der Versuchsaufbau	10
7.2 Die Umrechnung	11
7.3 Praktische Umsetzung der Kalibrierung	11
7.4 Umrechnung der Messwerte	12
7.4 Messergebnisse und Anwendungsbeispiele	13
8. Zusammenfassung und Ausblick	14
9. Danksagung	14
Quellen	15

1. Einleitung

Elektrische Felder sind unsichtbar und für die Sinne des Menschen nicht zu erfassen. Einfache elektrostatische Aufladungsexperimente mit Reibungselektrizität zeigen aber, dass wir von diesen Feldern fast immer umgeben sind.

Wenn man die Fachliteratur durchsucht, erfährt man, dass es für die Messung der Felder kein einfaches Messinstrument zu geben scheint.

Das bekannteste Messinstrument ist die Feldmühle mit einer komplizierten elektronischen Schaltung und einer motorisierten Mechanik.

Die Schaltpläne haben sich dabei seit vielen Jahren kaum verändert.

Das vorliegende Projekt will die Elektronik des Feldmühlenkonzepts im Zeitalter von Mikrokontrollern neu gestalten und dabei möglichst vereinfachen.

2. Vorbetrachtung

2.1 Elektrische Felder in der Natur

Elektrische Felder kennt man vor allem aus elektrostatischen Spass-Experimenten, wo z.B. Papierschnipsel und Haare wie von Geisterhand bewegt werden können. In elektronischen Geräten wirken sie unbemerkt und sorgen für ihre Funktion.

Elektrische Felder können von Zitteraalen und Zitterrochen zur Jagd genutzt werden und sie werden von Haien und Rochen zum Aufspüren von Beute eingesetzt.

Elektrische Felder spielen bei Gewittern eine große Rolle, da sie die Auslöser für Blitze sind. Gewitter laden auch die Ionosphäre auf, eine Schicht am oberen Ende der Atmosphäre, die um die ganze Erde verläuft.

Das elektrische Feld zwischen der Ionosphäre und der Erdoberfläche gibt daher Aufschluss über die weltweite Gewitter-Aktivität der Atmosphäre und damit auch über die Entwicklung des weltweiten Klimas.

2.2 Das elektrische Feld

Das elektrische Feld ist ein Modell des Raumes um, oder zwischen elektrischen Ladungen. Dieser Raum zeichnet sich dadurch aus, dass auf eine elektrische Ladung eine Kraft wirkt.

Die **elektrische Feldstärke** (Formelzeichen **E**) gibt an, wie groß die Kraft F auf eine Ladung Q im elektrischen Feld ist. Daher kommt auch die Definition der Feldstärke E :

$$E = \frac{F}{Q}$$

Die Einheit der Feldstärke ist zunächst 1 N/C (ein Newton pro Coulomb). Durch weitere Umformungen kommt man zu der auch üblichen Einheit 1 Volt/ Meter:

$$\frac{1N}{1C} = \frac{1N}{1As} = \frac{1Nm}{1Asm} = \frac{1Ws}{1Asm} = \frac{1VAs}{1Asm} = \frac{1V}{1m}$$

Damit würde ein Spannungsmessgerät zur Feldmessung reichen, wenn man den Abstand d der Messelektroden berücksichtigt:

$$E = U/d.$$

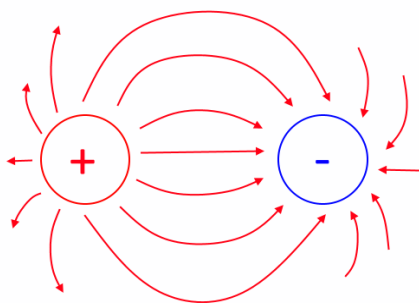
Das reale Spannungsmessgerät benötigt aber immer einen kleinen Eingangsstrom, weshalb man mit dieser Methode nur Felder in elektrolytischen Flüssigkeiten messen kann, weil dort dieser Strom nachfließen kann. In Luft oder Vakuum fließt kein Strom, d.h. diese Messmethode ist dafür nicht geeignet.

Die Messung einer Kraft, z.B. auf eine geladenen Kugel, ist aber auch unpraktisch, da sie sich diese Kraft ständig mit der Erdanziehung überlagert und damit von der Aufstellung des Messgerätes abhängt. Die Aufrechterhaltung der Ladung der Kugel müsste zudem mit einer hohen Versorgungsspannung ständig gesichert werden.

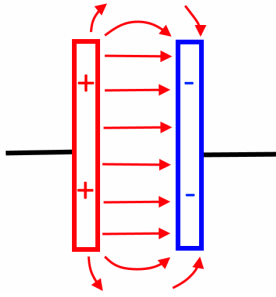
Es sollte also eine andere Messmethode eingesetzt werden.

Das Feldmodell geht davon aus, dass die Ladungen selbst Ausgangspunkte von Feldlinien sind, die als grafische Darstellung des Feldes dienen.

Bekannt sind die nachfolgenden Darstellungen von Feldlinien zwischen Punktladungen (inhomogenes Feld):

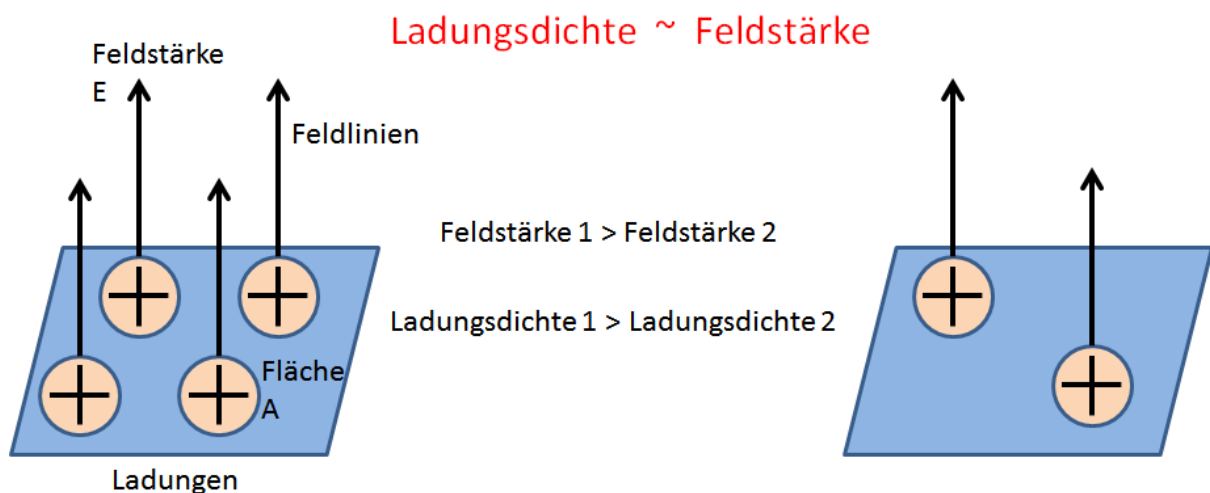


und den parallelen Platten eines Plattenkondensators (homogenes Feld):



Lässt man von gedachten Punktladungen jeweils nur eine Feldlinie aus der Oberfläche austreten, so ergibt sich der Zusammenhang zwischen Ladungsdichte und Feldstärke zusammen mit der elektrischen Feldkonstante als Faktor zu:

$$E \cdot \epsilon_0 = \frac{Q}{A}$$



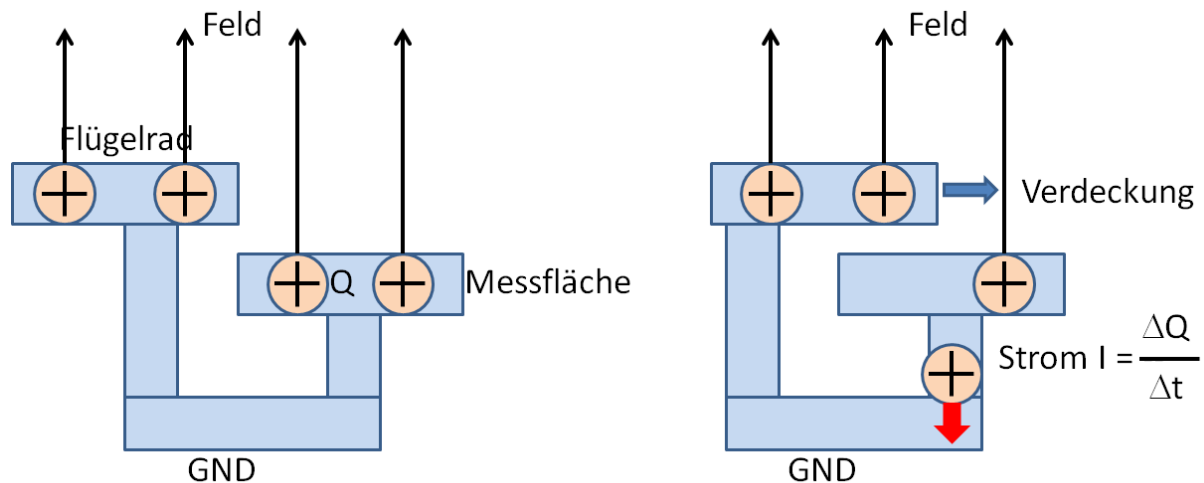
Damit kann man Feldstärken aus den Ladungen auf einer Oberfläche berechnen:

$$E \sim Q$$

Damit diese Ladungen gemessen werden können, werden sie in Ströme verwandelt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Hierzu muss das Feld abwechselnd von einer Fläche abgeschirmt werden, damit die Anziehungskräfte entfallen und die Ladungen abfließen.



Die Messung der Amplitude dieses Wechselstromes I liefert einen Wert, der der Ladung Q und somit auch der Feldstärke E entspricht.

Der Aufbau des Messgerätes kann - nicht wie bei Magnetfeldern - in geschlossenen Gehäusen erfolgen. Die Oberfläche eines solchen Gehäuses würde bei elektrischer Leitfähigkeit selbst Ladungen ansammeln und als Faradayscher Käfig wirken. Bei einem isolierenden Material, könnten sich andererseits elektrostatische Ladungen ansammeln, die das Messergebnis letztlich verfälschen würden.

2.3 Funktionsweise einer Feldmühle

Das sich drehende **Flügelrad** verdeckt abwechselnd immer ein Elektrodenpaar und unterbricht somit das externe elektrische Feld, dass gemessen werden soll. Da das Flügelrad geerdet ist, wird ein Teil des Feldes vom Flügelrad abgefangen.

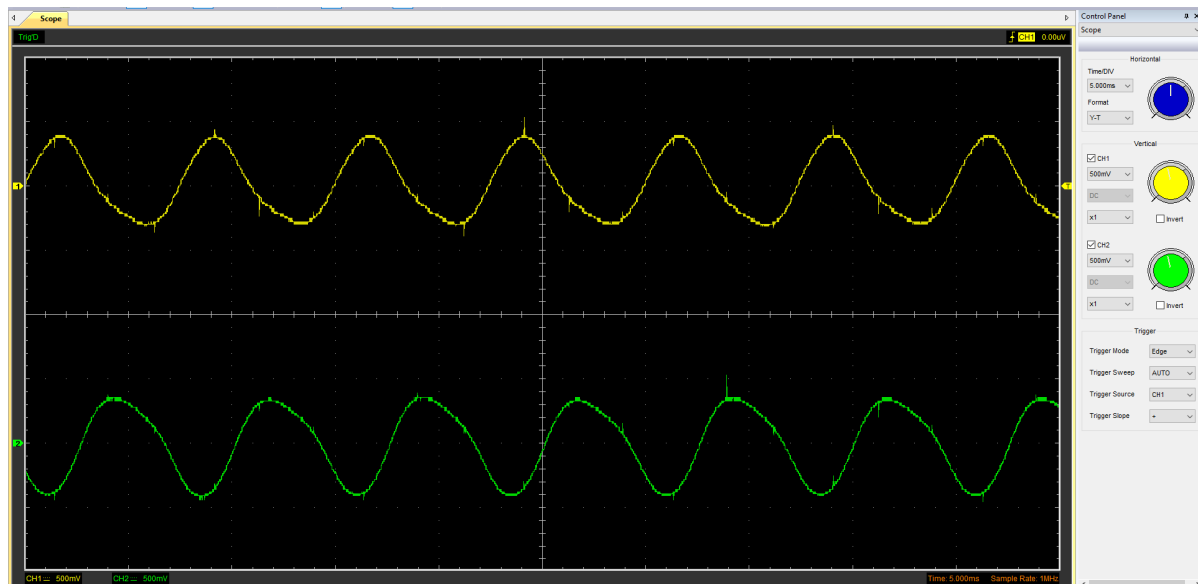
Die verdeckten Kupferflächen können sich so entladen, was einen Wechselstrom, bzw. über einen Widerstand eine Wechselspannung erzeugt. Da die Amplituden nur wenige Millivolt betragen, müssen diese mit einem Messverstärker auf wenige Volt angehoben werden. Dafür wird das Signal in bisherigen Schaltungen zu einem Operationsverstärker geleitet, der die Spannung der Amplituden erhöht. Mit einem Gleichrichter erzeugt man eine Gleichspannung, die über einen Kondensator stabilisiert und einem Gleichspannungsmessgerät zugeführt wird.

3. Untersuchung der Spannungen an einer Feldmühlenmechanik

Nach dem Design und Aufbau einer eigenen Feldmühlenmechanik sollten die wechselnden elektrischen Spannungen untersucht werden. Diese Spannungen stehen in Zusammenhang mit den Ladungen $U = Q/C$ (C = Kapazität des Flächen) führen letztendlich zu den wechselnden Strömen $I = U/R$ (R = Widerstand, in diesem Fall im Arduino).

Der einfachste Weg, diese Spannungsunterschiede sichtbar zu machen, ist ein Oszilloskop an mindestens ein Elektrodenpaar anzuschließen und den abschirmenden "Propeller" an die Masse. Je stärker das von außen einwirkende Feld ist, desto höher sind die Amplituden der Spannung, wobei diese bei den vorliegenden Messversuchen ohne Vorverstärker höchstens 500 mV betragen haben.

Für die Messungen wurde ein Hantek 6022BE benutzt, der eine Bildschirmkopie für die Dokumentation ermöglichte.



Für diese Messergebnisse wurde die Reibungselektrizität genutzt, indem ein Plastikstab mit einem Stofftuch mehrmals gerieben und somit elektrisch geladen wurde. Das entstandene elektrostatische Feld hatte aus 2 cm Entfernung zum Rotorblatt starke Auswirkungen auf die Messergebnisse, indem die gemessene Amplitude auf ca. 300 - 400 mV gehoben wurde.

4. Schaltplan

Da die Nutzung eines Oszilloskops sehr unpraktisch für das direkte Auswerten der Daten ist, wird ein **Arduino Leonardo** genutzt, der mit entsprechender Vorschaltung diese Messwerte weiterverarbeiten kann.

Ein Arduino ist ein günstiger und leicht programmierbarer **Mikrocontroller**, den man problemlos in dem kleinen Gehäuse unterbringen kann. Die vielen **analogen** und **digitalen Pins** können benutzt werden, um andere elektrische Bauteile anzusteuern, wobei dieses Spektrum von einer einfachen LED, bis hin zu einem OLED-Display reicht. Zur Darstellung der Werte nutzt die gebaute Feldmühle ein **4x7 Segment Display** und die **serielle Schnittstelle** zwischen Computer und dem Arduino.

Da ein Arduino allerdings nur auf einen **Gleichstrom** ausgerichtet ist, den eine Feldmühle selber nicht bieten kann, muss eine entsprechende Vorschaltung den

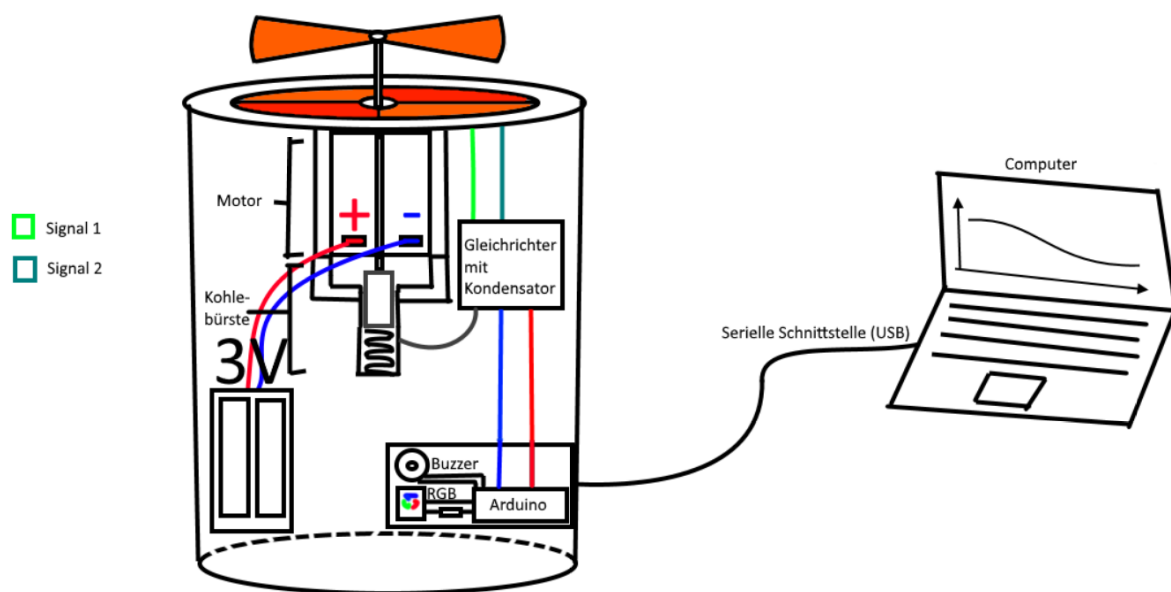
Mit $t_H = R \cdot C \cdot \ln(2)$ stellt sich das System mit einer Halbwertszeit von 0,33 Sekunden auf neue Messwerte ein.

5. Design der Mechanik

Die gesamte Konstruktion wurde so zusammengestellt, dass sie in eine Konserven-/Blechdose passen könnte. Dieser Metallrahmen stellt dabei auch einen Schutz vor ungewollten elektrostatischen Feldern dar, die das Messergebnis verfälschen könnten. Die gesamte Motor- und Kohlebürstenhalterung wurde zusammen mit dem Flügelrad in der Software **Blender** entwickelt und später mit Hilfe eines **3D-Druckers** umgesetzt.

Der **Arduino** wurde samt **4x7-Segment-Display** und der **Diodenbrücke** mit Hilfe eines Steckbrettes verkabelt.

Die Elektrodenflächen und das Flügelrad werden mit einer elektrisch leitenden **Kupferfolie** abgeklebt, um die geringe Masse des Flügelrades beizubehalten und um die 4 Elektroden leichter befestigen zu können.



6. Software des Arduino

6.1 Grundlagen

Der Arduino ist ein **Mikrocontroller**, der hauptsächlich über die kostenlose **Arduino-IDE** programmiert wird. Die Programmiersprache des Arduino basiert dabei hauptsächlich auf **C**, **C++** und **Java**, wodurch er auch sehr einsteigerfreundlich

anzusteuern ist. Dabei gibt es unzählige Anleitungen und Beispiel-Sketches im Internet und in Büchern, die vor allem Einsteigern vereinfachen, erste Erfolge mit dem Mikrocontroller zu erzielen.

Der Arduino wird dabei fast immer über ein USB-Kabel angesteuert, das auch für die grundlegende **Stromversorgung** von **5V** benutzt wird.

6.2 Quelltext

Der Quelltext des Arduino wird zur Strukturierung in 2 Hauptsektionen geteilt: den **Setup-** und **Loop-Teil**.

Der **Setup-Teil** wird dabei nur **einmal** und **vor** dem **Loop-Teil** durchgeführt, weshalb er auch für das grundlegende Einrichten genommen wird, wie das Bestimmen von **Variablen**, die Zuweisung einzelner Pins und das Laden von **Libraries**, die den Programmiervorgang erweitern und vereinfachen können.

```
const int analogPin = A1; // analogPin wird als Variable für den AnalogPin 1 verwendet
int sensorWert = 0;       // sensorWert wird als Zwischenspeicher für einen gemessenen Wert benutzt
int MessWert = 0;         // MessWert wird als Zwischenspeicher für den umgerechneten Wert verwendet

void setup() {

  pinMode(10, OUTPUT); // Die DigitalPins werden als Ausgang für Signale definiert.
  pinMode(14, OUTPUT);
  pinMode(16, OUTPUT);
  pinMode(15, OUTPUT);

  Serial.begin(9600); // Eine serielle Schnittstelle wird hier mit der Baud-Rate 9600 geöffnet.
}
```

Daraufhin folgt der **Loop-Teil**, der sich nach der einmaligen Ausführung des **Setup-Codes** selber endlos oft wiederholt. Dieser Vorgang läuft solange ab, bis die Stromverbindung unterbrochen wird oder der **Resetknopf** am Arduino gedrückt wird. Dieser wird verwendet, um die Messwerte ständig neu auszulesen und diese innerhalb eines sehr geringen Zeitfensters zu verarbeiten.

```

void loop() {

    sensorWert = analogRead(analogPin); // sensorWert wird hier mit AnalogPin gleichgesetzt und gespeichert.

    float voltage = sensorWert * (5.0 / 1023.0);

    MessWert = map(sensorWert, 0, 1023, 0, 1610); // Der Endwert liegt bei 1610 V/m, welche mit dem Arduino messbar sind.

    Serial.print("gemessener Wert = ");
    Serial.print(voltage);           // Die Spannung wird hier im Seriellen Monitor mit einem Zeilenumbruch angegeben.
    Serial.print(" umgerechneter Wert = ");
    Serial.print(MessWert);
    Serial.println(" V/m");
}

```

Der Rest des Codes im **Loop-teil** ist für das Ansteuern der **Displays** und für das Hochladen auf die Datenbank zuständig.

7. Kalibrierung

7.1 Der Versuchsaufbau

Dieser Schritt ist notwendig, um einheitliche Messwerte anzugeben, da die komplexe Schaltung eine **Spannungs(Feldstärker)** Kurve erzeugt, die nicht 100%ig genau voraus berechnet werden kann.

Diese Kurve sollte in optimaler Weise linear verlaufen.

Die Kalibrierung benötigt zwei große Metallplatten, die als Elektroden fungieren und dabei einen **Plattenkondensator** bilden. Dabei müssen die beiden Platten unter einer bekannten Spannung und in einem vorher abgemessenen Abstand stehen.

Optimal wären hier Spannungen von mehreren hundert Volt, wobei man hier definitiv die Sicherheitsvorkehrungen für die Arbeit mit Hochspannung treffen muss.

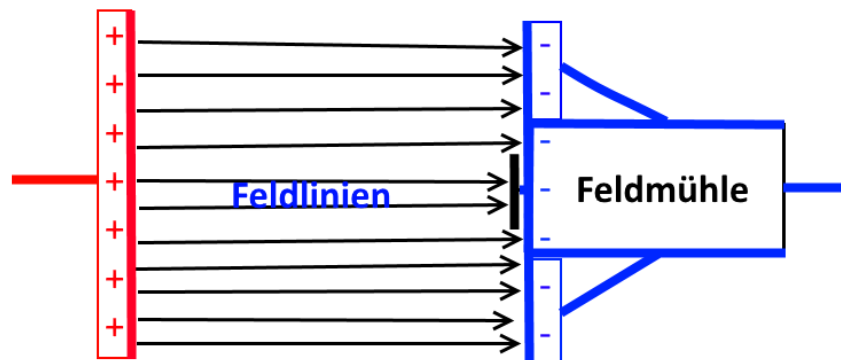
Die Feldmühle wird dabei in den runden Ausschnitt einer Elektrodenplatte gestellt, wobei ein elektronischer Kontakt zu der Dose hergestellt wird.

7.2 Die Umrechnung

Um die Messergebnisse des Arduino in **Volt/Meter** umzurechnen, müssen alle gemessenen Werte in einen Zusammenhang gebracht werden.

Liegt jetzt an den beiden Kondensatorplatten eine Spannung von 500 Volt an, die exakt 25 cm voneinander entfernt sind, so kommt man auf folgende Gleichung:

$$\frac{500V}{0.25m} = \frac{2000V}{1m}$$

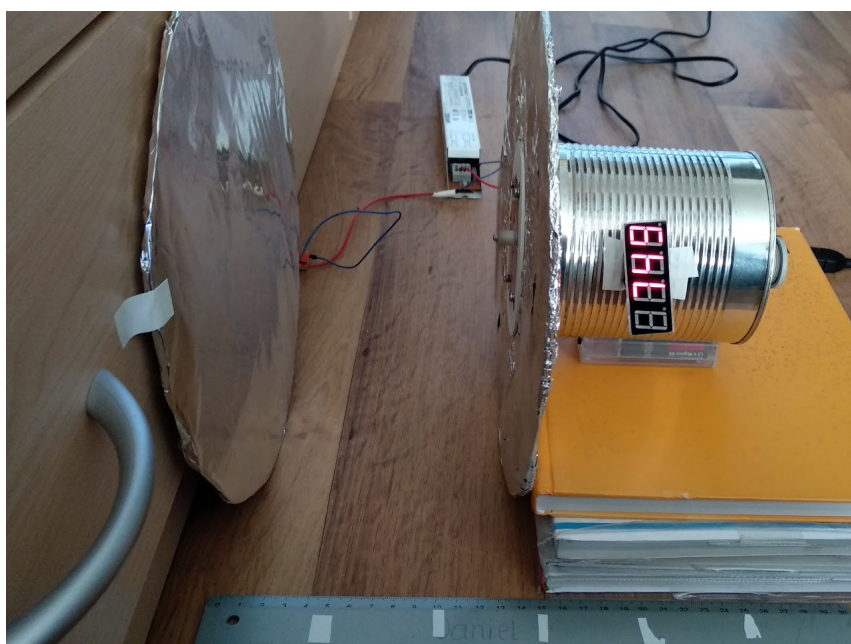


Sollte jetzt der Arduino eine Spannung von 200 mV messen, müsste der Wert um den Faktor 10 multipliziert werden, um der angelegten Spannung zu entsprechen.

7.3 Praktische Umsetzung der Kalibrierung

Für den Aufbau der beiden parallelen Metallplatten wurden bei diesem Versuchsaufbau zwei Pappkartonplatten mit einer straffen Aluminiumfolie abgewickelt, sodass diese auf **15 cm** Abstand einen Kondensator bilden. Als Spannungsquelle wurde ein **CCFL Treiber** verwendet, der normalerweise verwendet wird, um

Kaltkathodenröhren zum Leuchten zu bringen. Bei der Spannungsquelle handelt es sich um einen **OSRAM Quicktronic QT 1x18/230-240**. Dieser lieferte durchgängige 168 Volt an Gleichspannung, was für diesen Versuchsaufbau komplett ausreichend ist. Das Rotationsvoltmeter wurde in die Mitte des Kondensators gelegt und nachdem dieses mit einem Laptop und der Arduino IDE über ein USB-Kabel verbunden wurden, konnte man schon erste Messungen ablesen.



7.4 Umrechnung der Messwerte

Bevor die Feldmühle erste Messergebnisse liefern kann, muss erstmal das Verhältnis zwischen angelegter Spannung und dem Messwert geklärt werden. Hierfür wurden zwei Messwerte unter verschiedenen Bedingungen abgenommen. Bei beiden Kalibrierungsversuchen lagen 230V Gleichspannung an den Platten an, die einmal 25 cm und 20 cm voneinander entfernt waren. Dabei kommen folgende Gleichungen zustande:

$$\frac{230V}{0.25m} = \frac{920V}{1m} \qquad \frac{230V}{0.2m} = \frac{1150V}{1m}$$

Bei der Messung mit 25 cm Abstand wurde am Arduino eine Spannung von 2.75 V gemessen. Der zweite Messwert von 3.5 V entstand bei einer Kondensatorplattendistanz von 20 cm. Da es sich hier um eine Lineare Funktion handelt, kann man hier problemlos den Umrechnungsfaktor ausrechnen.

$$m = \frac{1150V - 920V}{3.5 - 2.75V} = 306.66$$

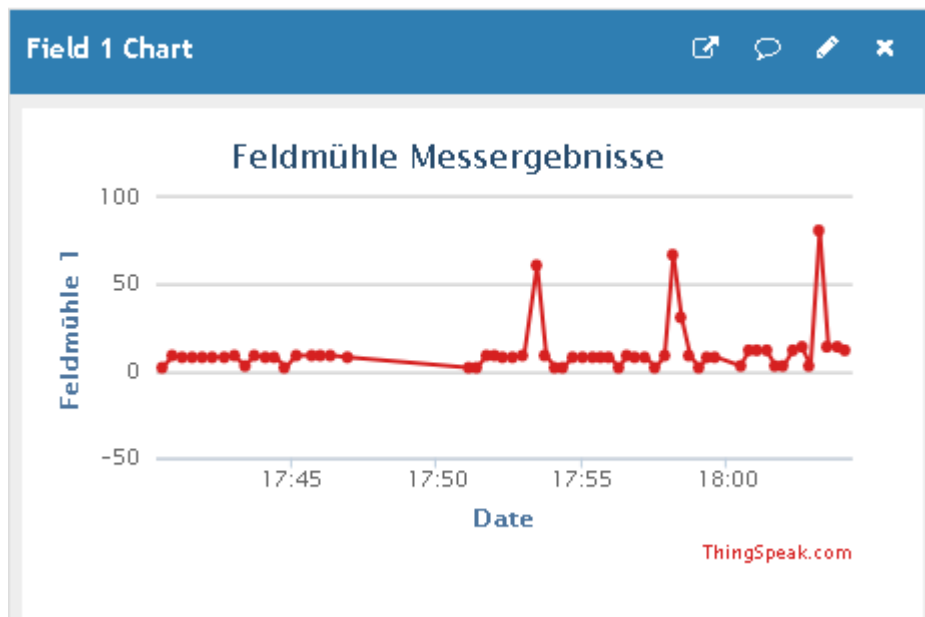
Stellt man die allgemeine Form einer Linearen Funktion jetzt nach n um, erhält man das Absolute Glied und kann somit auch die Gleichung aufstellen.

$$n = 920 - 306,66 * 2,75 = 76,685$$

$$y = f(x) = 306,66 * x + 76,685$$

7.5. IoT mit der ThingSpeak API

Die ThingSpeak Datenbank bietet eine passende Möglichkeit die Messwerte der Feldmühle problemlos hochzuladen, in einem Diagramm auswerten zu lassen und diese öffentlich zu teilen. Dabei kann man diesen Datensatz mit einem **ESP8266** anfragen und aktualisieren, solange eine Internetverbindung besteht. Mit Hilfe eines zugeordneten **API-KEYS**, lassen sich die vorhandenen Daten überschreiben bzw. ergänzen. Ein sogenannter **Channel** erlaubt normalerweise bis zu 8 Aktualisierungen der Messwerte gleichzeitig. Dies reicht komplett um einer Stadt unter einem Standort bis zu 8 Feldmühlen zuzuordnen. Die Diagramme lassen sich mit der richtigen Einstellung öffentlich und ohne Anmeldung einsehen.



(Werte wurden in Prozente umgerechnet | $1610 \text{ V/m} = 100\%$)

Ein solches Netzwerk aus Feldmühlen hilft dabei, die Untersuchungen an der Atmosphäre und besonders bei Gewittern anzustreben. Diese Werte können dann vom Wetterdiensten verwendet werden, um genauere Unwettervorhersagen zu aufzustellen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des Projektes war es, das bekannte Prinzip der Feldmühle mit einem modernen Mikroprozessor auf ein modernes Niveau zu bringen.

Das besondere an dieser Feldmühle ist daher, dass sie komplett **ohne Operationsverstärker** zum Anheben der Signalspannungen auskommt.

Für das Projektziel wurde sowohl eine eigene Mechanik, also auch ein eigenes Konzept für die Elektronik entwickelt und umgesetzt. Eine selbst entwickelte Software komplettierte das System.

Die Feldmühle wurde in einem eigens konzipierten Versuchsaufbau kalibriert und bereits angewendet.

Weiterführende Ziele:

Über das Projekt hinaus kann an der Verbesserung des Messbereiches der Feldmühle gearbeitet, damit sowohl größere, als auch kleinere Feldstärken ermittelt werden könne. Das wäre bereits mit einem Arduino mit integrierten Operationsverstärker erreichbar.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die schriftliche Projektarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Danksagung

Zum Schluss möchte ich mich definitiv für die tatkräftige Unterstützung meines Jugend-Forscht-Betreuer Herr Stiehler bedanken, der mir regelmäßig Verbesserungsvorschläge gegeben und einige Bilder für die schriftliche Arbeit zur Verfügung gestellt hat. Außerdem möchte ich mich noch bei den meisten anderen Teilnehmer der Jugend-Forscht-AG für ihre Hilfe bedanken.

Quellen

(Stand : 14.01.2019)

<http://www.hcrs.at/FELDMU.HTM>
http://www.dessauwetter.de/dw/de_efeld.php
<http://www.dg1sfj.de/index.php/elektronik/selbstbau/42-feldmuehle>
<https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrofeldmeter>
https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrische_Feldst%C3%A4rke
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf>
<https://www.itwissen.info/Graetz-Bruecke-Graetz-bridge.html>
<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/slt/1807181.htm>
<https://physik.cosmos-indirekt.de/Physik-Schule/Ladungsdichte>
<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/influenz>
https://www.hzg.de/imperia/md/images/hzg/presse/veranstaltungen/2010/fittosize__730_0_2a5d209de6bbf396ae8ba5c8dcc48d93_jugend_forscht__symbol_bearbeitet_kleiner.jpg

Hiermit bestätige ich, dass alle Bilder, mit Ausnahme des Jugend-Forscht-Logo, selber erstellt wurden.

