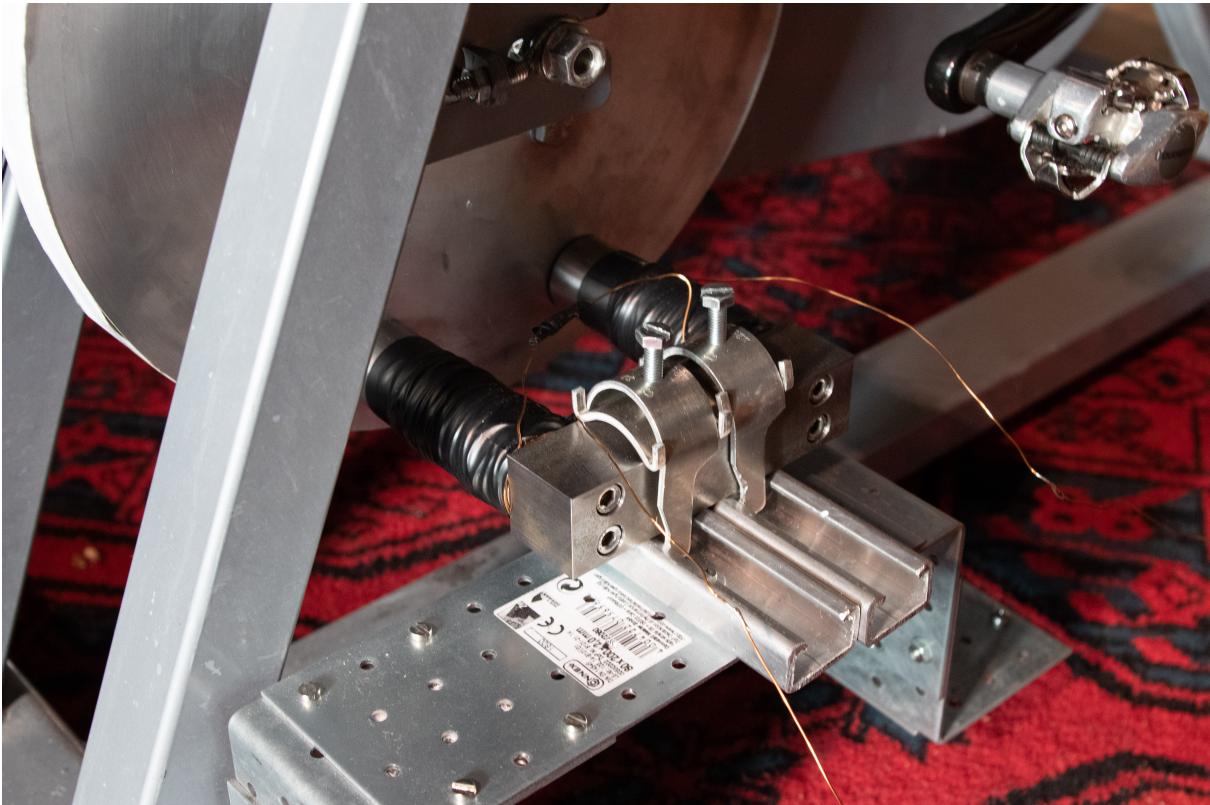


GEREGELTE WIRBELSTROMBREMSE



Verfasser

Joel von Rotz
Stefan Ruckli
Filip Estermann

Betreuungslehrperson
Antonio Russo

BBZB Luzern Februar 2019 IDPA-Nr. 1094

Inhaltsverzeichnis

1 Vorwort	2
2 Abstract	3
3 Einleitung	4
4 Einlesung	6
4.1 Magnetismus	6
4.1.1 Metalle und deren Magnetfeld	6
4.1.2 Wirbelstrom	8
4.1.3 Elektromagnetismus	9
4.2 Physik	10
4.2.1 Drehmoment	10
4.3 Regler	11
4.3.1 PID-Regler	12
4.3.2 Proportionalität	13
4.3.3 Integral	14
4.3.4 Differenzial	16
4.3.5 PID	17
5 Material	19
5.1 Mechanik	19
5.2 Magnet	19
5.3 Elektronik	20
5.3.1 Mikrocontroller	20
5.3.2 USB	21
5.3.3 MOSFET	21
6 Methoden	22
6.1 Planung	22
6.2 Magnet Design	24
6.3 Elektronik	31
6.4 Aufbau	33
6.5 Drehzahlmessung	34
6.5.1 Messungsaufbau	36
6.6 Magnetbremsung	36
6.7 Radanpassung	38
6.8 Datenauswertung	39
6.9 Magnetansteuerung - Konzept	41

7 Ergebnisse	42
7.1 Drehzahlmessung	42
7.2 Magnetbremsung	43
7.2.1 Vor Radanpassung	43
7.2.2 Nach Radanpassung	44
8 Diskussionen	45
8.1 Drehzahlmessung	45
8.2 Magnetbremsung	45
8.3 Nichterrereichung	46
8.3.1 Fehlberechnungen	46
8.3.2 Kenntnis über Regler	47
8.3.3 Zeitdruck	48
8.4 Schlussfolgerung	48
9 Schlusswort	49
9.1 Joel von Rotz	49
9.2 Stefan Ruckli	49
9.3 Filip Estermann	50
10 Glossar	52
11 Literatur	54
12 Anhang	55
12.1 Eidesstattliche Erklärung	55
12.2 QR-Codes	55

1 Vorwort

Unsere Projektgruppe bestand aus einem Elektroniker, einem Netzelektriker und einem Elektroinstallateur. Wir haben ein Projekt gewählt, worin jeder seine individuellen beruflichen Fähigkeiten einbringen konnte. Mit der Projekt geregelte Wirbelstrombremse konnte dieses Ansinnen erfüllt werden.

Wir bedanken uns bei Antonio Russo, da er sich bereit erklärt hat, uns bei diesem Projekt zu unterstützen. Bei maxon motor ag, für das zur Verfügungstellen von den Messgeräten und bei der CKW, für das zur Verfügungstellen von den Bearbeitungsmaschinen und dem Rohmaterial.

2 Abstract

Das Ziel dieses Projektes war, eine Wirbelstrombremse zu bauen, die die Geschwindigkeit eines Rades bis zu fünf Prozent genau regeln kann. Dafür wurde ein Spinning Wheel (ein Fitnessstrainer) umgebaut und mit einem Elektromagneten, als Erzeuger der Bremskraft, erweitert. Dies wurde mit einer elektrisch leitenden Scheibe, die die Bremskraft auf das Rad übertragen soll, und mit einer Messeinrichtung, die die Frequenz, mit der sich das Rad dreht, bestimmt. Außerdem wurde ein elektronischer Regler, der die Spannungsversorgung des Elektromagneten und dessen Bremskraft regeln soll, erstellt.

Nach der Planung und nach den ersten Tests wurde analysiert, wo noch Probleme liegen und was angepasst werden muss: dass das Rad noch zu schwer war und verkleinert werden musste.

Nach den entsprechenden Änderungen und Umbauten konnte die Wirbelstrombremse wunschgemäß eingesetzt werden und sie bremste das Rad relativ schnell ab.

Bei der Regelung wurde allerdings festgestellt, dass die Berechnung des Elektromagneten fehlerhaft war. Deshalb konnte die Regelung nicht in Betrieb genommen werden.

In den folgenden Seiten erfahren Sie eine Einlesung in die wichtigsten Themen und die Gedanken der Verfasser dieser Arbeit.

3 Einleitung

Eine Wirbelstrombremse nutzt das Magnetfeld des Bremsmagneten aus, um die Bremsscheibe abzubremsen. Da sie nur mit der induktiven (magnetischen) Bremskraft arbeitet, ist sie verschleissfrei, also benötigt keine Bremsklötze.

Die Ziele dieser Arbeit waren, eine gut funktionierende Wirbelstrombremse zu bauen und damit auch die Geschwindigkeit zu regeln. Dazu wurde folgende Hypothese formuliert: Eine Wirbelstrombremse, mit der die Geschwindigkeit auf 5% Toleranz geregelt wird.

Dafür sollte eine elektrisch leitende Platte am Rad eines Spinning Wheels befestigt werden. Mit möglichst wenig Abstand zur der Platte, damit der magnetische Widerstand so gering wie möglich ist, soll ein Elektromagnet in Hufeisenform befestigt werden. Dieser Elektromagnet soll über einen Spannungsregler mit Spannung versorgt werden. Der Elektromagnet induziert in der elektrisch leitenden Platte eine Spannung, welche die Entstehung von Wirbelströmen und die Verzögerung der Platte zur Folge haben soll. Eine Messeinrichtung, bestehend aus einem Magneten, welcher am Rad befestigt ist, sowie einen Magnetschalter, welcher das vorbeibewegende Magnet erkennt, soll die Umdrehungsfrequenz des Rades bestimmen.

Nach der Planung und der Materialbeschaffung wurden die Komponenten wie oben beschrieben zusammengebaut und die ersten Tests wurden vorbereitet. Um sicher zu gehen, dass die gemessenen Ergebnisse stimmen, wurde für die Tests eine zusätzliche Messeinrichtung installiert. Für diese Messeinrichtung wurde ein weisses Band um das Rad geklebt und eine Stelle wurde schwarz markiert. Ein Drehzahlmessgerät soll den Kontrast zwischen der schwarz markierten Stelle und dem weissen Band erkennen. Somit erkennt das Gerät, wann sich das Rad einmal im Kreis gedreht hat. Aus diesen Informationen berechnet es die Frequenz des Rades.

Bei den ersten Tests funktionierte die Bremse nicht wunschgemäß. Die Bremsung war nur gering festzustellen. Nach der Fehleranalyse stand fest: Das Rad ist zu schwer und muss verkleinert werden, sodass es an Masse verliert.

Nach dieser Anpassung wurde das Spinning Wheel erneut für die Tests aufgebaut. Bei diesen erneuten Tests stellten beide Messeinrichtungen einen deutlichen Unterschied zwischen der Verzögerung des Rades mit aktivierter und deaktivierter Wirbelstrombremse fest.

Die Wirbelstrombremse funktionierte jetzt wunschgemäß und der Fokus lag nun auf dem zweiten Ziel, der Regelung. Dafür wurde ein elektronischer Regler erstellt. Dieser Regler vergleicht die am Rad gemessene Frequenz mit einer am Regler einstellbaren Frequenz. Anhand von diesen beiden Werten ermittelt der Regler, ob und wie stark das Rad abgebremst werden muss. Der Regler soll dann die Spannungsversorgung des Elektromagneten bestimmen: Muss das Rad stärker abgebremst werden, wird eine höhere Spannung an den Magneten angelegt. Durch die höhere Spannung soll der Elektromagnet eine höhere Bremskraft auf das Rad haben.

Der Regler wurde in der Messeinrichtung und in der Spannungsversorgung eingebaut und das Spinning Wheel wurde erneut für die Tests aufgebaut. Die Tests ergaben, dass die Regelung nicht wunschgemäß funktionierte. Der Fehler lag bei der Dimensionierung des Elektromagneten. Dieser lieferte auf die von Konstantstromquelle gespiesene Spannung keine zufriedenstellenden Resultate.

4 Einlesung

4.1 Magnetismus

Magnetische Felder ist für das menschliche Auge nicht sichtbar und trotzdem finden sie ein weites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten in unserer heutigen Gesellschaft. Magnetische Felder dienen zum Beispiel für den Kompass, da die Felder die Nadel immer nach Norden zeigen lässt, oder für Lautsprecher, damit anhand Schwingungen, welche das Magnetische Feld erzeugt, elektrische Signale zu akustischen Signalen umgewandelt werden können.

In den folgenden Unterkapiteln wird die Beeinflussung des Magnetfeldes von verschiedenen Metallen und die Erzeugung eines Magnetfeldes durch den elektrischen Strom erklärt.

4.1.1 Metalle und deren Magnetfeld

Eisen gilt als ein Metall, welches ein eigenes Magnetfeld erzeugen kann, indem es in Kontakt mit einem Magnet kommt. Ein Metall, welches ein starkes Magnetfeld erhalten kann, wird als magnetisierbar oder in der Physik als ferromagnetisch bezeichnet.

Wird ein Eisen-Stück magnetisiert, entstehen zwei Magnetpole: Norden und Süden. Diese Magnetpole dienen nicht zum Herausfinden des Nord- und Südpols, sondern dienen zum Bestimmen der magnetischen Feldlinien (Siehe Abbildung 1).

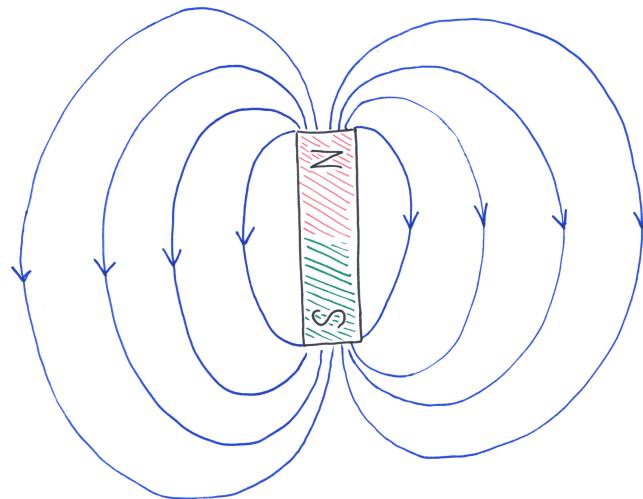


Abbildung 1: Pole & Feldlinien eines Magnets

Diese Feldlinien machen wichtige Informationen sichtbar, zum Beispiel wie das Magnetfeld orientiert ist, wie das Magnetfeld von anderen Magnetfeldern beeinflusst wird oder wie stark das Magnetfeld ist (Siehe Abbildung 2). Die Stärke wird dabei anhand der Ausbreitung der Feldlinien dargestellt.

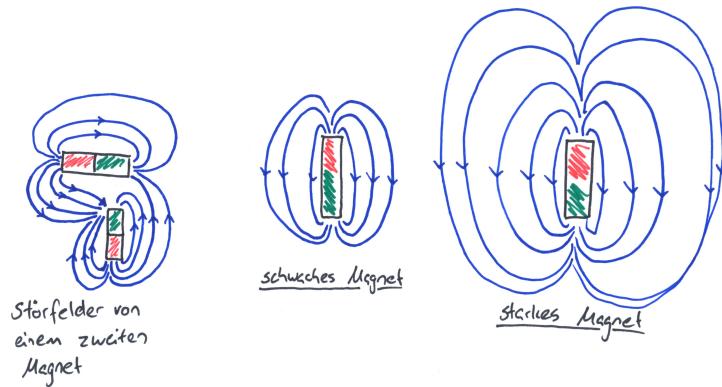


Abbildung 2: Darstellung von Feldlinien

Wie vorher erwähnt, geben Feldlinien an, wie stark ein Magnetfeld sein kann, aber wie kann ein starkes Magnetfeld aufgebaut werden? Das Magnetfeld wird durch die Permeabilität beeinflusst, welche je nach Metall verschieden ist.

Die Permeabilitätszahl kann angeben, ob das Metall magnetisch oder nichtmagnetisch ist. Ein Magnet, welches aus Eisen besteht (Permeabilitätszahl = $300\dots 10'000$) wird nicht dasselbe Magnetfeld eines Aluminium-Magneten (Permeabilitätszahl = $1+2.2\cdot 10^{-5}$) sein, da die Permeabilitätszahl sich untereinander stark unterscheiden. Es kann daher bereits durch Be trachtung der Permeabilität der Metalle herausgefunden werden, ob das Metall magnetisch oder nichtmagnetisch ist. Ein typischer Bereich der Permeabilitätszahl von ferromagnetischen Metallen beträgt $300\dots 10'000$.

4.1.2 Wirbelstrom

Der Effekt von Wirbelstrom ist bereits in heutigen grossen Transportmitteln weit verbreitet. Heutige Züge sind, neben normalen Bremsen, mit Wirbelstrombremsen ausgestattet (Siehe Abbildung). Dies ermöglicht den Zügen steile Gefälle befahren zu können, ohne die normalen Bremsen verwenden zu müssen. Lastwagen verwenden ebenfalls Wirbelstrombremsen um bei Gefällen nicht ausser Kontrolle zu geraten (unbekannt, 2015).



Abbildung 3: Wirbelstrombremse eines Zuges. Heruntergeladen von <http://www.lokifahrer.ch/Lukmanier/Rollmaterial/Bremse/Verschleisslos.htm>

Der Wirbelstrom zeigt seinen Effekt nur wenn ein Magnet über eine Platte oder eine drehende Scheibe gezogen wird. Damit nicht zu physikalisch gesprochen wird, wird der Wirbelstrom anhand einem Schlittenbeispiel erklärt. Im folgenden Beispiel wird der Wirbelstrom als die Füsse, welche zum Bremsen verwendet werden, repräsentiert und die Strecke als Elektronenfluss.

Man sitzt auf einem Schlitten und fährt eine Strecke herunter. Die Geschwindigkeit des Schlittens erhöht sich konstant, bis es zu schnell wird. Nun drückt man mit den Füßen in den Schnee, um die Geschwindigkeit zu verringern. Man drückt mit der Kraft, welche von den Füßen eingewirkt wird, in den Schnee, was zu einer Reibung und zur Bremsung führt.

Wirbelstrom ist also eine Art Energie, welche beim Eindrücken eines Magnetfeldes in eine elektrisch leitfähige Platte erzeugt wird. Der Bremseffekt wird durch *Hineingreifen* des Elektronenflusses erzeugt, was zur Reibung und Bremsung führt (Eberli, 2017).

4.1.3 Elektromagnetismus

“Elektromagnetismus ist ein Teilgebiet der Physik, das als Elektrodynamik bezeichnet wird.”(S. Volker und R. Volker, unbekanntes Jahr)

Ein Hauptteil der Elektrodynamik beschreibt, dass ein Magnetfeld aufgebaut werden kann, indem elektrischer Strom durch einen Leiter fliesst. Abbildung 4 zeigt die Ausrichtung des Magnetfelds bei einem stromdurchflossenen Leiter und eine Darstellung mit der *Rechte-Hand* Regel. Der Daumen zeigt in die Richtung des Stromflusses und die restlichen Finger greifen um den Leiter, was als Magnetfeld bezeichnet wird (Eberli, 2017).

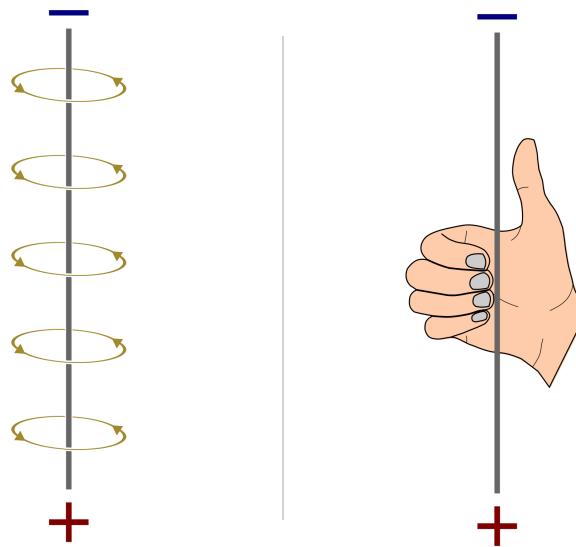


Abbildung 4: Rechte-Hand Regel. Heruntergeladen von <https://www.grund-wissen.de/physik/elektrizitaet-und-magnetismus/magnetismus.html>

Wird ein Kupferkabel, welches um ein Eisenstück gewickelt wurde, mit Strom versorgt, entsteht einen grossen magnetischen Fluss, welcher durch das Eisenstück fliesst (Siehe Abbildung 5 folgende Seite). Dabei ist zu bemerken, dass sich der Fluss (Abbildung 5 folgende Seite rechts) jeder Windung zusammensummiert, da alle in die gleiche Richtung fliessen.

Die Stärke ist bei einem elektrischen Magnet von der Stromstärke und der Anzahl Windungen abhängig (Formel 1). Die Stromstärke dient zur Berechnung der magnetischen Kräfte der einzelnen Windungen. Die Windungszahl wird als Faktor für die magnetischen Kräfte verwendet.

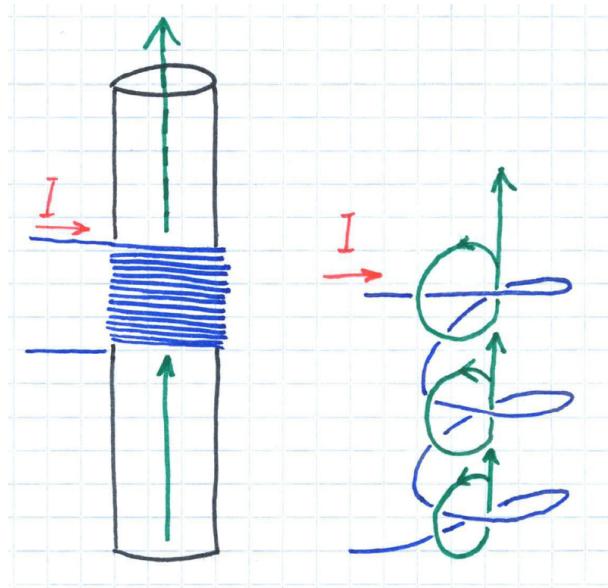


Abbildung 5: Magnetfluss bei einer Kupferspule

$$\Theta = N \cdot I \quad (1)$$

Begriffe:

- N Anzahl Windungen der Wicklung
- I elektrische Stromstärke

(Kuchling, 2014, S.452)

4.2 Physik

4.2.1 Drehmoment

Bei einer Bremsung wird kinetische Energie in eine andere Energieform, meistens Wärmeenergie, umgewandelt. Durch diese Energieumwandlung sinkt die Geschwindigkeit des zu bremsenden Objektes (kfzteile42, unbekanntes Jahr).

Eine Geschwindigkeitsänderung im Verhältnis zu der dafür benötigten Zeit wird als Beschleunigung bezeichnet.

Eine Kraft setzt sich aus der Beschleunigung multipliziert mit der beschleunigten Masse zusammen. Daraus folgt: Je grösser die eingesetzte Kraft ist, desto grösser ist die Beschleunigung. Da diese Kraft auf einen drehbaren, starren Körper ausgeübt wird, wird ein Drehmoment erzeugt. Ein Drehmoment ist das Produkt einer Kraft und dem senkrechten Abstand zum Drehpunkt. Die Wirkung eines Drehmoments entspricht der eines Kräftepaars. Das heisst, je grösser das Drehmoment ist, desto grösser ist seine Kraftwirkung.

Aus diesen Erkenntnissen ergibt sich, dass die Position und die Kraft der Bremse eine wichtige Rolle spielen. Um aufgrund des Drehmoments eine optimale negative Beschleunigung zu erzeugen, sollte die Bremse deshalb möglichst weit von der Drehachse entfernt sein und die Kraft, welche im Falle der Wirbelstrombremse von Magneten erzeugt wird, sollte möglichst gross sein. Es spielen aber auch noch andere Faktoren wie die Induktion (siehe Kapitel Induktion) eine Rolle, wo die Bremse optimalerweise positioniert wird. Deshalb darf sie nicht ganz am Rand der zu bremsenden Scheibe sein (Kuchling, 2014).

4.3 Regler

Regeln ist ein Vorgang, bei dem die Ausgangsgrösse, eine physikalische Grösse wie zum Beispiel die Drehzahl eines Rades, konstant überwacht und bei Abweichungen von einem Sollwert durch die Stellgrösse korrigiert wird (Waste, 2005). Die Regelungstechnik ist sehr nützlich für Funktionen, welche einen Zustand konstant behalten müssen, wie zum Beispiel eine Heizung, die 25°C konstant heizen muss. Verändert sich die Temperatur zu 23°C, muss die Heizung das Heizelement erhitzten, um wieder auf 25°C zu kommen. Ist die Temperatur 27°C, muss die Heizung das Heizelement abkühlen lassen.

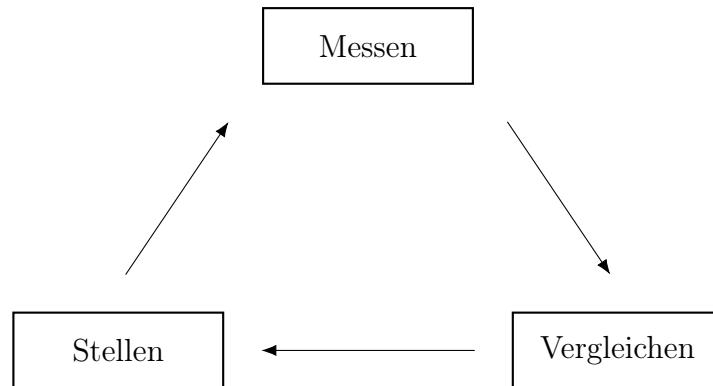


Abbildung 6: Regler Blockdiagramm

Die Funktion des Reglers kann in drei Funktionsblöcke eingeteilt werden, welche miteinander interagieren: **Messen**, **Vergleichen** und **Stellen** (Siehe Abbildung 6). Im Funktionsblock *Messen* übersetzt ein Sensor die physikalische Grösse in ein Format, welches die Elektronik verstehen kann. Unter *Verstehen* gilt das Umwandeln und Bereitstellen brauchbarer Informationen, wie zum Beispiel die Umwandlung einer Umdrehung eines Rades zu der Zeit, welche dafür benötigt wurde. Im Block *Vergleichen* wird der gemessene Wert mit dem Sollwert verglichen (Siehe Formel 2). Die Differenz wird die Regeldifferenz oder auch Regelabweichung, welche im Regler verarbeitet wird. Daraus entsteht die Regelausgangsgrösse, welche in den Aktor geführt wird. Schlussendlich wird im Block *Stellen* aus der Ausgangsgrösse die Stellgrösse mit dem Aktor bestimmt, was zur Veränderung der physikalischen Grösse führt. Durch die Veränderung wird wieder ein neuer Wert gemessen und der gesamte Prozess beginnt von vorne (Siehe Abbildung 7)(Waste, 2005).

$$e = w - r \quad (2)$$

Begriffe:

- w Sollwert
- r Istwert
- e Regelabweichung, Regeldifferenz

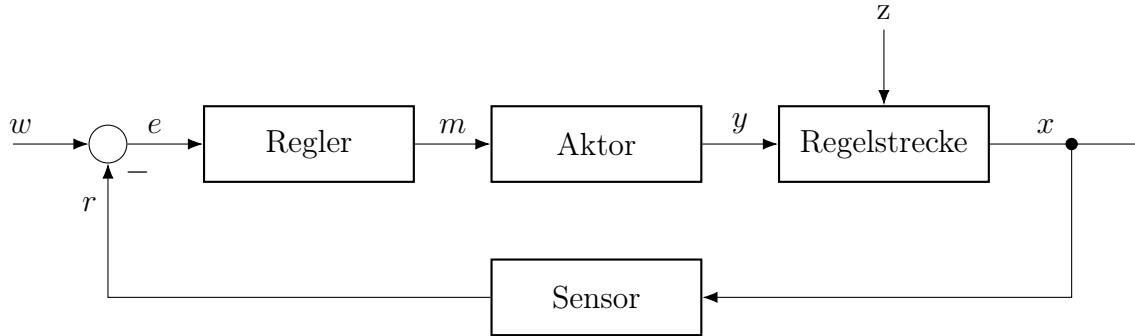


Abbildung 7: Regler Blockdiagramm

Begriffe:

- w Sollwert
- r Istwert
- e Regelabweichung, Regeldifferenz
- m Regelausgangsgrösse (Befehl von Regler)
- y Stellgrösse (bewirkt eine Änderung der Regelgrösse)
- x Regelgrösse (physikalische Grösse → km/h, rpm, °C, etc.)
- z Störgrösse (beeinflusst die Regelgrösse → °C, von aussen wirkende Kraft)

4.3.1 PID-Regler

In der Wirbelstrombremse war ein PID-Regler geplant, welcher anhand von Geschwindigkeitsmessungen die Stärke des Magneten ansteuert. PID-Regler steht für **P**roportional-**I**ntegral-**D**ifferenzial-Regler und basiert auf mathematische Funktionen (Eberli, 2018).

Was genau diese Funktionen für einen Nutzen haben, wird in den folgenden vier Kapiteln erklärt.

4.3.2 Proportionalität

Der P-Anteil (Proportionalität) gilt als Hauptregler der drei Funktionen und berücksichtigt die Abweichung zwischen Istwert und Sollwert, in dieser Arbeit ist es die Differenz zwischen der gewünschten Maximalgeschwindigkeit und der aktuellen Geschwindigkeit. Diese Abweichung wird mit dem Faktor K_P multipliziert (Siehe Formel 3) (Eberli, 2018).

$$P_{OUT} = e \cdot K_P \quad (3)$$

Der Faktor K_P gibt an, wie stark der Regler bei Abweichungen reagieren soll. Je grösser der Faktor, desto stärker reagiert der Regler (Eberli, 2018). Dieser Faktor lässt dem System zu, das Rad bei Überschreitung der Maximalgeschwindigkeit abzubremsen. Der Nachteil daran ist, dass durch die Verkleinerung der Abweichung auch der P-Anteil kleiner wird, was heisst, dass das Rad nie genau auf die Maximalgeschwindigkeit gebremst werden kann.

Folgende Abbildung (Abbildung 8) stellt die Proportionalität bei einer konstanten Abweichung grob dar.

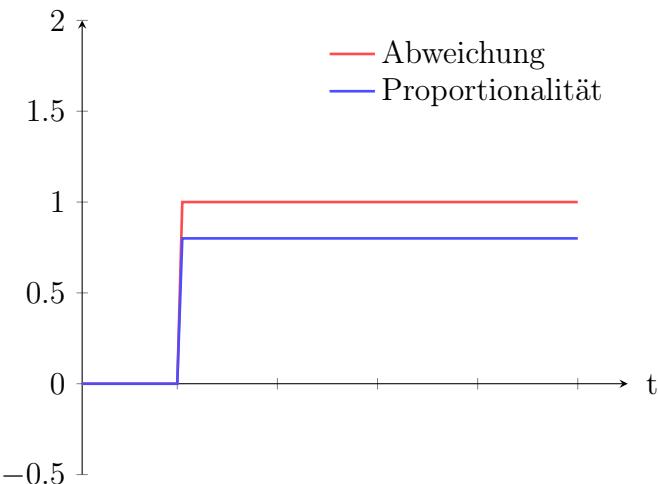


Abbildung 8: P-Regler mit konstanter Abweichung

Abbildung 9 stellt nun die Proportionalität mit einer sich anpassenden Abweichung dar. In dieser Art würde man es in realen Experimenten sehen. Es kann nun der Nachteil der Proportionalität erkannt werden. In diesem Fall ist der K_P Faktor = 0.5, also 50% der Abweichung, was dazu führt, dass die Abweichung nie den Wert 0 erreichen wird, sondern sehr nahe an 0 kommen wird.

Hinweis: Die Grösse der Proportionalität kann verschiedene Formate annehmen. In diesem Fall besitzt die Proportionalität kein Format sondern wird nur als eine simple Zahl dargestellt. Die Proportionalität wird im Nachhinein auf den Aktor angepasst. Dasselbe gilt für die Diagrammen des Integrals und des Differenzials.

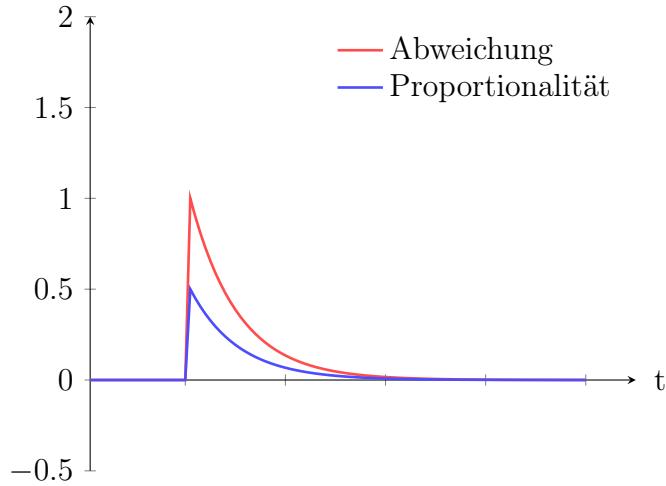


Abbildung 9: P-Regler mit Rückkopplung

4.3.3 Integral

Das Integral kann dieses Problem lösen. Wenn trotz Eingriff des P-Anteils immer noch eine Abweichung besteht, erhöht das Integral den P-Anteil bis die Geschwindigkeit der Maximalgeschwindigkeit entspricht. Dieser Anteil heisst I-Anteil und kann mit der Formel (4) dargestellt werden.

$$I_{OUT} = K_i \cdot \int_0^{\infty} e(t) \cdot \Delta t \quad (4)$$

Der Faktor K_i bestimmt, wie stark das System bei Abweichung reagieren kann. Da alle Abweichungen summiert werden, kann dieser Anteil sehr gross werden, was zu einer stärkeren Ausgangsgrösse führt. Die Abbildung 10 stellt das Integral visuell dar, wobei die Auswirkung des Integrals bei konstanter Abweichung realisiert ist. Solange die Abweichung sich nicht ändert, wird der I-Anteil des Systems mit der Zeit stärker (Eberli, 2018).

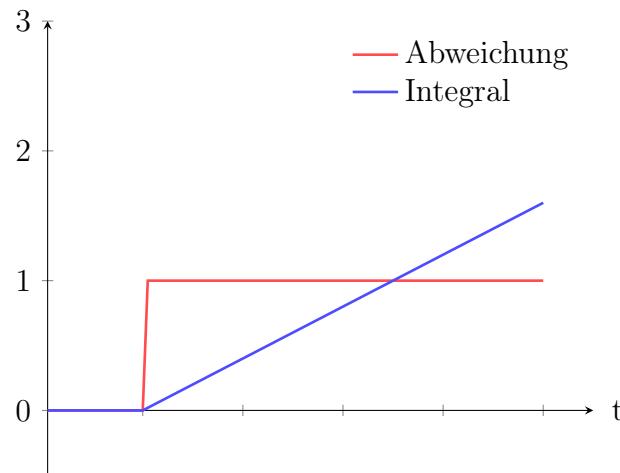


Abbildung 10: I-Regler mit konstanter Abweichung

Wird der Integral mit der Proportionalität kombiniert, erhält man einen PI-Regler (Siehe Abbildung 11). Dieser besitzt die Eigenschaften beider Regler: Ein System welches auf Abweichung reagiert und mit dem Integral die restliche Abweichung eliminiert.

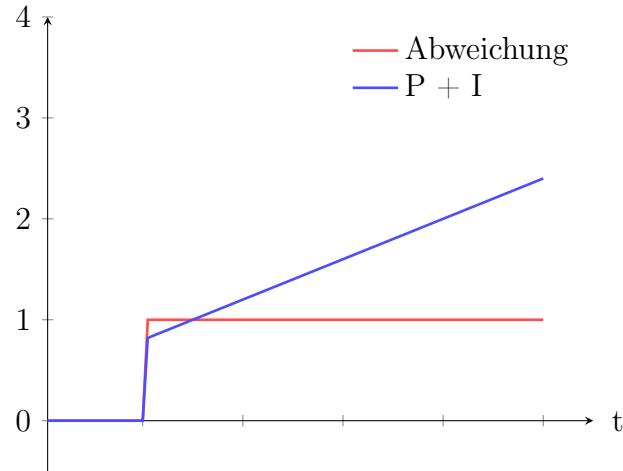


Abbildung 11: PI-Regler mit konstanter Abweichung

Abbildung 12 zeigt den Regler mit gut dimensionierten Faktoren. Der Regler reagiert schnell auf eine Abweichung und glättet diese aus. Ein bis zwei Schwingungen sind in diesem Fall erlaubt.

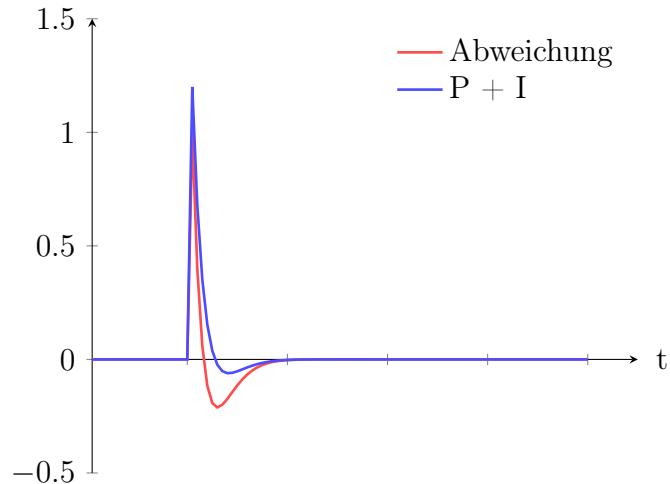


Abbildung 12: PI-Regler mit Rückkopplung

4.3.4 Differenzial

Wird aber das Rad stark beschleunigt, entsteht eine grosse Änderung der Geschwindigkeit, was zu einer grossen Änderung der Abweichung in einer kurzen Zeit führt. Der P-Anteil und der I-Anteil sind zu träge zum Reagieren, dafür reagiert das Differenzial (D-Anteil) auf diese Änderung sehr schnell. Im Normalfall, also eine sehr kleine Abweichung, wird das System vom D-Anteil gering beeinträchtigt. Sobald bei der Abweichung eine grosse Änderung in einer kurzen Zeit entsteht, übernimmt der D-Anteil einen grossen Anteil der Regelung (Eberli, 2018).

Die Abbildung 13 stellt die Reaktion des Differenzials in Kombination mit der Proportionalität bei einer grossen Steigung dar.

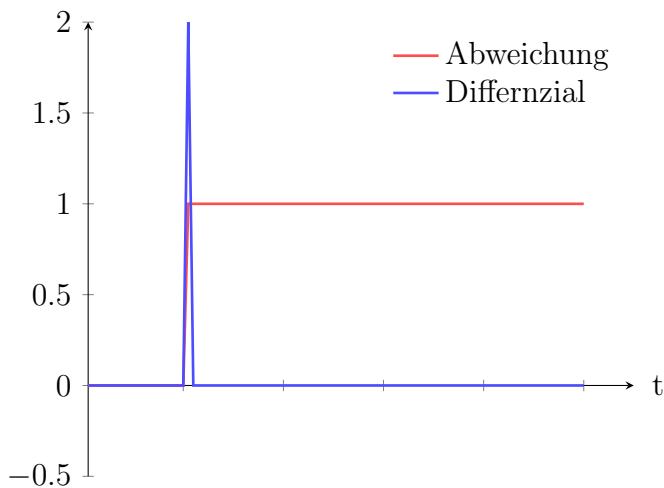


Abbildung 13: PD-Regler mit konstanter Abweichung

Die mathematische Funktion des Differenzials basiert auf der Änderung zwischen der aktuellen Geschwindigkeit und der vorherigen Geschwindigkeit innerhalb einer vergangenen Zeit (Δt), also der Steigung (Siehe Formel 5) Je grösser die Änderung ist, desto grösser ist die Steigung, was im Regler zur schnelleren Reaktion verwendet wird.

$$D_{OUT} = K_d \cdot \frac{e_t - e_{t-1}}{\Delta t} \quad (5)$$

Begriffe:

- e_t Abweichung ab Zeitpunkt t
- e_{t-1} vorherige Abweichung ab Zeitpunkt t

Wie in den vorherigen Funktionen, dient der Faktor, hier K_d , zur Bestimmung der Stärke des Differenzials.

In Kombination mit der Proportionalität erhält man einen PD-Regler, welcher auf grosse Steigungen schnell reagieren kann. Abbildung 14 zeigt das Verhalten des PD-Reglers.

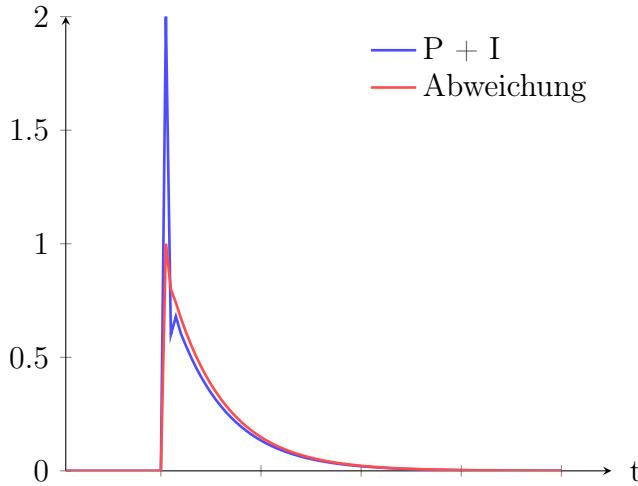


Abbildung 14: PD-Regler mit Rückkopplung

4.3.5 PID

Werden alle Funktionen zusammengeführt, erhält man einen sehr schnellen und genauen PID-Regler. Durch seine Eigenschaften kommt der PID-Regler in den meisten Anwendungen zum Einsatz. Das Zusammenführen basiert auf einer Addition (Siehe Formel 6). Die Wirbelstrombremse würde daher auch einen PID-Regler für die Geschwindigkeitsgrenze verwenden, da bei Überschreitung die Bremse möglichst schnell die Geschwindigkeit abbremsen müsste.

$$out = K_d \cdot \frac{e_t - e_{t-1}}{\Delta t} + K_i \cdot \int_0^{\infty} e(t) \cdot \Delta t + e \cdot K_P \quad (6)$$

Abbildung 15 zeigt einen PID-Regler bei konstanter Abweichung. Der Regler reagiert auf Veränderung und auf Abweichung in einer schnellen Zeit.

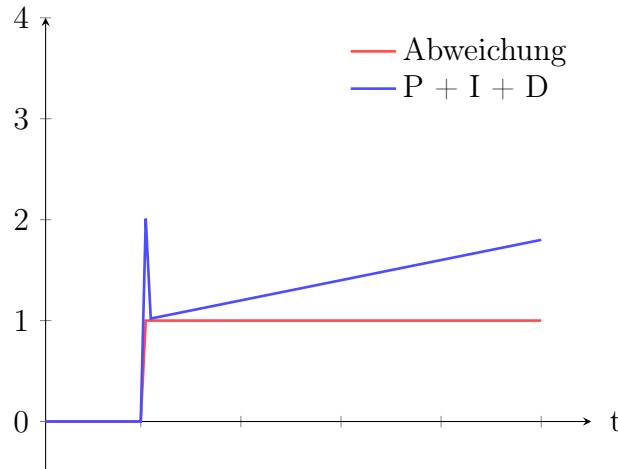


Abbildung 15: PID-Regler mit konstanter Abweichung

Abbildung 16 zeigt einen gut dimensionierten PID-Regler. Dieser Regler reagiert auf grosse Änderungen der Abweichung und auf Abweichungen selbst.

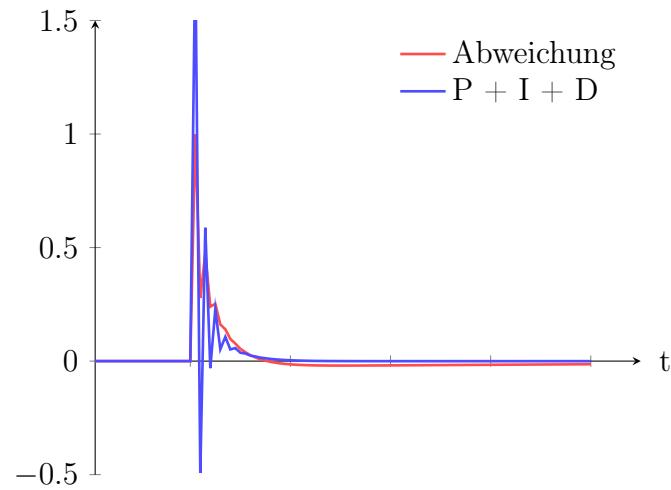


Abbildung 16: PID-Regler mit Rückkopplung

Abbildung 17 zeigt einen schwingenden Regler, welche falsch dimensioniert wurde.

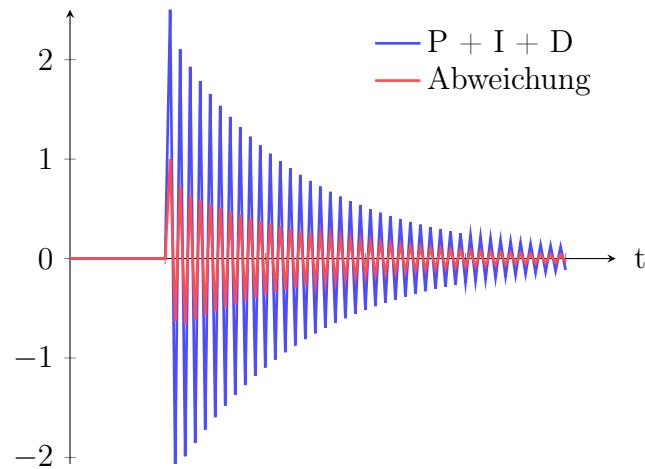


Abbildung 17: PID-Regler mit Schwingungen

5 Material

5.1 Mechanik

Die Hauptbedingung an das mechanische Gestell war, dass es ein drehbares Rad aufweisen soll, welches leicht in Bewegung gebracht werden kann. Ausserdem muss sich das Rad auch über eine längere Zeit selbst drehen können. Diese Bedingungen führten dazu, ein Spinning Wheel zu beziehen. Solch ein Spinning Wheel wird als Fitnessgerät verwendet.

Bei der Bremsscheibe wurde eine Aluminium-Scheibe verbaut. Dieses Metall wurde verwendet, da dies einen guten elektrischen Leitwert aufweist und somit auch gute Bremseigenschaften mit sich bringt. Ausserdem besitzt Aluminium als Leichtmetall ein relativ geringes spezifisches Gewicht.

Hinter der Aluminium Scheibe befindet sich eine zweite, dickere Scheibe aus Automatenstahl. Hier wurde ETG 100 Automatenstahl verbaut, weil sich dieser leicht magnetisieren lässt und das Magnetfeld vergleichsweise gut leiten kann.

Als Haltegestell für den Elektromagneten wurden zwei parallel geführte C-Schienen verwendet, damit der Abstand zwischen dem Elektromagneten und der Bremsscheibe variiert werden kann. Ein ausserdem positiver Aspekt der C-Schienen ist, dass diese aus Aluminium bestehen und somit den Elektromagneten, ferromagnetisch von dem Eisengestell trennen. Somit kann eine höhere Wirkungskraft aus dem Magneten erzielt werden. Damit der Elektromagnet an seiner rechten Stelle bleibt, wurde dieser mit Schnellverlegern auf die Schiene geschraubt. Diese Schnellverleger ermöglichen ein rasches bewegen – und fixieren von dem Magnet.

Damit diese zwei C-Schienen sich in einer stabilen und korrekten Lage befinden, wurde ein Gestell gefertigt und die Schienen montiert. Dieses wurde aus dicken Blechplatten konstruiert. Aufgrund einer starken mechanischen Festigkeit wurde jenes Material verbaut. Dieses Eisengestell wurde mit Nieten an das Spinning Wheel gefügt.

5.2 Magnet

Wichtiger Bestandteil eines Magneten ist das Metall. Das Metall muss ferromagnetisch sein, damit es etwas anziehen kann. Die Magnetisierbarkeit ist abhängig vom Eiseninhalt des Metalls. Je mehr Eisen das Metall hat, desto stärker wird das Magnetfeld bei gleichem Volumen sein (Eberli, 2017). Also war das Ziel der Metall-Wahl, ein Metall herauszusuchen, welches sich für das magnetische Bremsen eignet.

Für diese Arbeit wurde das Metall **ETG-100** verwendet. Die Wahl wurde mit Hilfe einer externen Person ausgewählt, weil diese Person sich für das Thema interessierte und bereits selbst Wirbelstrombremsen entworfen hatte.

Die Permeabilitätszahl, welche für den Magneten benötigt wird, konnte nur anhand einer Annahme gesetzt werden. Anhand eines Physikbuchs wurde der Bereich für ferromagnetische Stoffe 300 bis 10'000 vorgenommen (Kuchling, 2014, S.661). Als Annahme wurde daraus die Permeabilitätszahl 5'000 gesetzt.

5.3 Elektronik

Für die richtige Wahl der Komponenten mussten zuerst Voraussetzungen gesetzt werden. Die Voraussetzungen der Elektronik ist das Messen der Geschwindigkeit des Rades, die Regelung der Bremse und eine Möglichkeit die gemessenen Daten auslesen zu können.

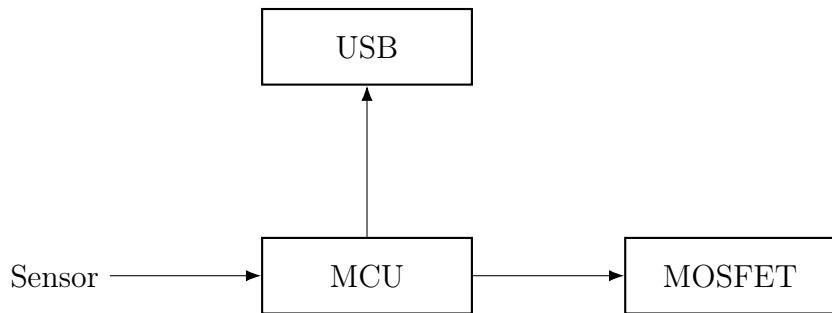


Abbildung 18: Schaltung Blockdiagramm

Der Regler konnte daraus in drei Blöcken aufgeteilt werden: USB, Mikrocontroller und MOSFET. Mit dem USB war das Ziel, Daten auslesen zu können und den Sollwert zu setzen. Der Mikrocontroller würde als Sensor und Gehirn der Elektronik dienen und wäre für das Messen der Geschwindigkeit, die Ansteuerung des Magneten und das Berechnen der Regelung würde der Mikrocontroller zuständig. Der MOSFET dient als Schalter um den Magneten anzusteuern.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Auswahl und die Begründung der ausgewählten Komponenten aufgeführt.

5.3.1 Mikrocontroller

Die wichtigste Komponente ist der Mikrocontroller, welcher einen grossen Anteil an Arbeit übernehmen muss, welche das Messen und das Regeln beinhalten. Zum Messen der Geschwindigkeit und für die Regelung des Magneten werden Timer benötigt. Timer sind in der Elektronik Peripherien, welche mit Events verknüpft werden können. Es ist also möglich einen Event mit einem Timer zu verknüpfen, damit Prozesse, welche einen gleichmässigen Takt benötigen, zuverlässig ausgeführt werden. Der Regler verwendet einen Timer, damit das Integral und das Differenzial mit einer konstanten Abtastrate berechnet werden können. Dies hat den Vorteil, dass die Berechnungen einfacher und genauer berechnet werden können.

Ein Interrupt-System dient zur Verknüpfung von Events mit verschiedenen Peripherien. Bei der Bremse wurde ein solches System eingebaut, damit die Geschwindigkeitsmessung genauer berechnet werden kann. Ein Interrupt selbst ist ein Unterbruch im Prozess, welcher von

Peripherien ausgelöst werden kann. Bei einem Interrupt wird der aktuelle Prozess gestoppt und ein anderer Prozess wird ausgeführt. Am Ende dieses Prozesses wird wieder mit dem normalen Prozess weitergemacht.

Die wichtigsten Kriterien für den Mikrocontroller, aus dem oberen Ausschnitt hergeleitet, sind die Geschwindigkeit des Controllers, Timer Peripherie und ein Interrupt-System. Der Speicherplatz ist ebenfalls wichtig, da das Programm gross werden kann. Zusätzlich hätte ein FPU noch einberechnet werden können, aber dies würde den Controller teurer machen und wird bereits mit der Controllergeschwindigkeit kompensiert.

Aus Familiarität wurde ein Mikrocontroller der Firma Microchip ausgewählt. Neben der Familiarität existiert bereits eine grosse Community, welche Mikrocontroller verwenden und daher auch Dokumentationen von vielen Funktionen existieren. Aus Recherche und eigener Erfahrung konnten zwei Mikrocontroller ausgewählt werden: Atmega328P und Atmega328PB. Beide sind im Aufbau sehr ähnlich, außer dass der Atmega328PB einige Verbesserungen besitzt.

Für das Projekt wurde der **Atmega328PB** ausgewählt, weil er bessere Timer besitzt, welche länger laufen können, was zu weniger Belastung des Mikrocontrollers führt.

5.3.2 USB

Die Aufgabe eines USB-Chips ist es, eine Verbindung zwischen einem Computer und einer Elektronik zu erstellen, damit ein Datenaustausch ausgeführt werden kann. In unserem Fall ist es der Datenaustausch von Geschwindigkeitsmessung.

Als USB-Schnittstellen-Chip wurde der **FT232RL** von FTDI ausgewählt. Dieser wurde ausgewählt, da bereits gute Erfahrungen mit diesem Chip gemacht wurden. Wenn ein anderer Chip ausgewählt würde, müsste man zuerst sich über die elektronischen Verbindungen informieren (wo muss mit was verbunden werden).

5.3.3 MOSFET

Ein MOSFET ist ein elektronischer Schalter. Im Vergleich zum normalen mechanischen Schalter, welche von Hand betätigt werden kann, wird der MOSFET via einem elektronischen Signal betätigt.

Bei der Auswahl des MOSFETs muss auf die Belastbarkeit und Grösse geachtet werden. Unter Belastbarkeit ist die maximale Zufuhr von elektronischer Energie gemeint. Bei zu grosser Energie kann es sein, dass der MOSFET explodiert und grossen Schaden an der Elektronik anrichtet. Als Grenzwerte wurde die minimale Belastbarkeit für den Magneten auf 2A begrenzt und die Grösse auf Maximum 2 x 2cm begrenzt. Zur Auswahl standen die folgende MOSFETs:

- CSD18511 von Texas Instruments
- Si4436DY von Vishay
- CPH6442 von ON-Semiconductor

Für das Projekt wurde der **CPH6442** ausgewählt. Die Begründung ist die Grösse des Bausteins. In einem 2.8mm x 2.9mm Gehäuse kann dieser Chip eine Belastung von maximal 6A aushalten, was genügend für das Magnet ist. Die maximale Spannung beträgt 60V und ist auch für den Magneten geeignet, da der Widerstand der Wicklung klein ist und daher bei 2A eine kleine Spannung erzeugt. Die anderen Bausteine besassen ähnlichen Attributen, scheiterten aber bei der Grösse.

6 Methoden

6.1 Planung

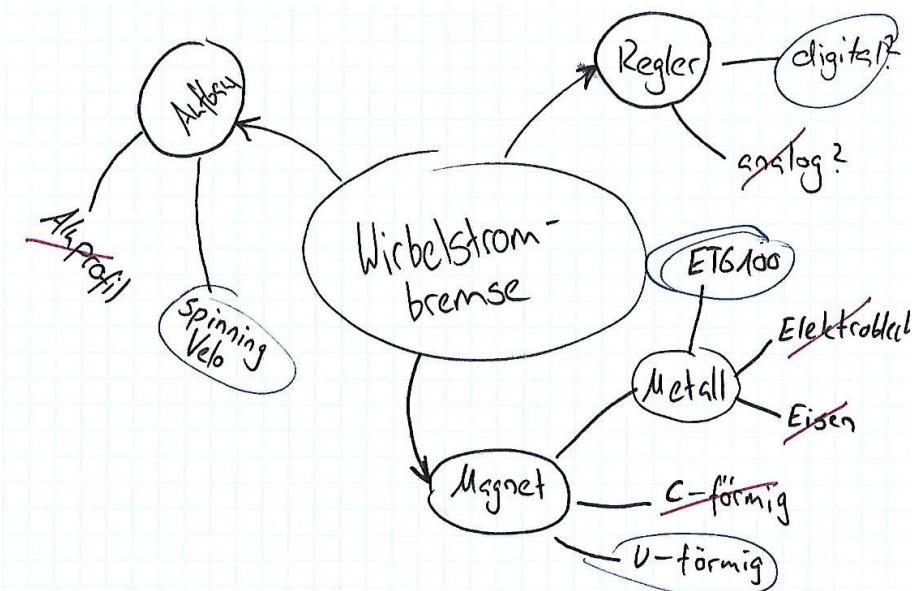


Abbildung 19: Mindmap

Der erste Schritt zum Erreichen der Hypothese war die Ausarbeitung der Vorgehens-Struktur. Bevor mit dem Aufbau der Struktur begonnen werden konnte, kam es zu Unklarheiten. Insbesondere wie genau die Hypothese erreicht werden konnte, da noch kein Plan existierte, weder wie der Aufbau der Wirbelstrombremse noch wie die Regelung erstellt werden sollte. Diese Unklarheiten konnten durch eine Ideenfindung geklärt werden. Wurden genügend Ideen gesammelt, konnten diese in eine Vorgehens-Struktur eingesetzt werden, wobei das Ziel die Erreichung der Hypothese darstellte.

Nachdem eine Ideenfindungen stattgefunden hatte, konnte ein Vorgehen aufgebaut werden. Jeder Vorschlag wurde bearbeitet und anhand der Priorität des Vorschlags eine Zeit zugeteilt,

welche für die Verarbeitung benötigt wird. Diese Planung ähnelt dem *Scrum*, nur dass keine Sprints und deren zugehörigen Sprint-Reviews geplant wurde.

Scrum ist ein Projektmanagementsystem, welches ein Team erlaubt in Sprints Aufträge zu bearbeiten. Diese Aufträge werden in einem Sprint-Review anhand der gesetzten Ziele überprüft und je nach Ergebnis werden nicht erreichte Aufträge im nächsten Sprint weiterverarbeitet ([Scrum.org](#), unbekanntes Jahr).

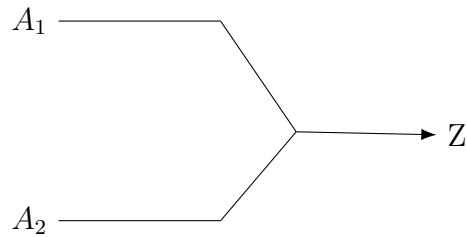


Abbildung 20: Parallele Vorgehensweise

Zu Beginn wurde eine Art paralleles Vorgehen geplant (Siehe Abbildung 20). Ziel dieses Vorgehens war die Aufteilung des Elektronik-Teils und des Mechanik-Teils. Dies erlaubte die Ausführung zweier Schritte gleichzeitig, was zum schnelleren Arbeiten hätte führen sollen. In anderen Worten wurde mit Schritt A_1 und A_2 , welche den Elektronik-Teil und den Mechanik-Teil repräsentieren, begonnen und vor dem Abschluss bei Schritt Z werden die beiden Schritte verschmolzen.



Abbildung 21: Einfache Vorgehensweise

Später musste aber dieses Vorgehen verworfen werden, da die Planung des Magneten einige Schwierigkeiten brachte, welche im Kapitel 6.2 erläutert werden. Die neue Struktur basierte auf einer einfachen Vorgehensweise (Siehe Abbildung 21). Es wurde mit Schritt A begonnen und endete schlussendlich mit Schritt Z, welche die Erreichung der Hypothese darstellte.

6.2 Magnet Design

Die Form des Magneten war abhängig von mehreren Faktoren. Einerseits musste der Magnet anhand der elektronischen Vorgaben angepasst werden, andererseits limitierte das Rad des Fitnesstrainers den Platz für den Magnet.

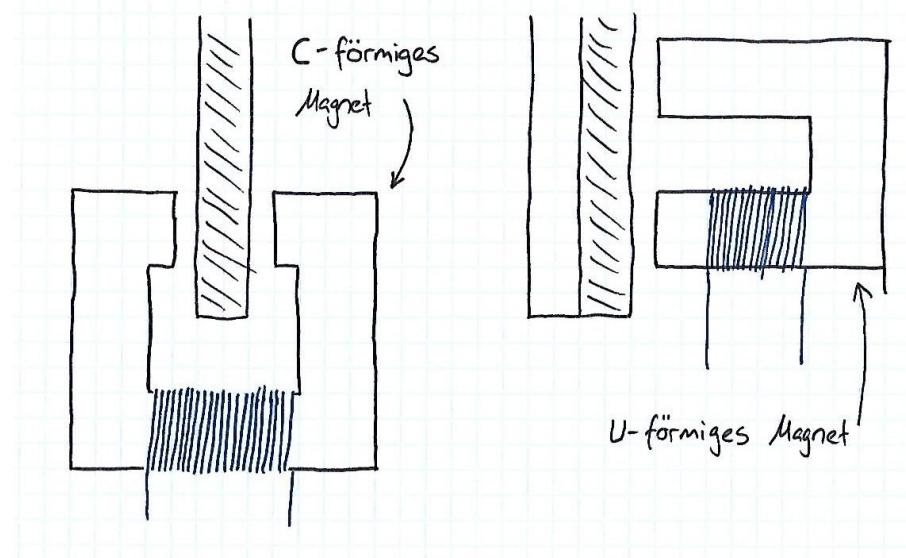


Abbildung 22: U-förmiges und C-Förmiges Magnet

Im Normalfall besteht eine Magnetbremse aus einer Metall-Scheibe, welche eine gute Leitfähigkeit besitzt, und einem C-förmiger Magnet, welcher in der Öffnung die Scheibe platziert wird. Wenn der Platz ungenügend ist, kann eine zusätzliche eisenhaltige Scheibe hinzugefügt werden und der C-förmige Magnet durch einen U-förmigen Magnet ersetzt werden, wobei dieser nicht unten platziert wird, sondern seitlich der Scheibe (Siehe Abbildung 22). Dieser Aufbau erlaubt es, die zu bremsende Scheibe von der Seite an zu bremsen, anstatt von unten. Der Nachteil ist der Energieverlust zwischen den Luftspalten, welcher sich fast verdoppelt.

Da das Rad des Fitnesstrainers zu breit ist und daher den Platz für ein C-förmiger Magnet zu eng ist, wurde für ein U-förmiges Magnet entschieden. Im Anhang können die Pläne für die Eisen- und Aluminium-Platte und für das Magnet gefunden werden. Diese Pläne wurden in der CAD-Software *Fusion 360* von Autodesk erstellt.

Der Magnet wurde anhand der von W.R. Smythe geschriebenen Arbeit *Eddy Current on a Rotating Disk* (Smythe, 1942) erstellt. Diese Formel wurde von Empfehlung einer externen Person verwendet, da diese Person mit dieser Formel gearbeitet hatte. Von Smythes Arbeit wurde die Formel 22 für die Berechnung des Magneten verwendet (Siehe Formel 7).

$$M = \frac{\omega_{MAX} \cdot b \cdot \gamma \cdot \Phi^2 \cdot c^2}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \left(1 - \frac{A^2 \cdot a^2}{(A^2 - c^2)^2}\right) \quad (7)$$

Begriffe:

ω_{MAX}	maximale Kreisfrequenz
Φ	Magnetischer Fluss
γ	Elektronische Leitfähigkeit der Spule am Magnet
a	Radius der Magnetpoolfläche welche auf die Scheibe gerichtet ist
c	Radius der Magnetposition von dem Mittelpunkt der Scheibe ausgerichtet
b	Dicke der Scheibe
A	Radius der Scheibe (nur für diese Formel)
M	Drehmoment

Die maximale Kreisfrequenz wurde anhand einer Drehzahlmessung mit dem Messgerät *Braun gmbh MOVIPORT C118* und mit einem menschlichen Versuchstier ermittelt. Durch starkes Anreten der Pedale mit dem Messgerät konnte die maximale Drehzahl ermittelt werden. Wird die Formel der Kreisfrequenz (Siehe Formel 8) in die Formel (Formel 7) eingesetzt, kann die Kreisfrequenz durch die Drehzahl ersetzt werden (Siehe Formel 9).

$$\omega_{MAX} = 2 \cdot \pi n_{MAX} \quad (8)$$

Begriffe:

n_{MAX}	maximale Drehzahl
-----------	-------------------

(Kuchling, 2014, S.193)

$$M = \frac{2\pi \cdot n_{MAX} \cdot b \cdot \gamma \cdot \Phi^2 \cdot c^2}{2\pi \cdot a^2} \cdot \left(1 - \frac{A^2 \cdot a^2}{(A^2 - c^2)^2}\right) \quad (9)$$

Die gesamte Form des Magneten wird anhand des magnetischen Flusses berechnet, da in der Formel des Flusses (Siehe Formel 10) der magnetische Widerstand, welche abhängig von der Form des Magneten ist, und die magnetische Durchflutung (Siehe Formel 11), welche von der Stromstärke und der Anzahl Wicklungswindungen am Magnet abhängig ist, eingesetzt wird. Der magnetische Widerstand besteht aus mehreren Teilwiderständen, welche allen Teilen des Magneten und der Luftspalte entsprechen (Siehe Formel 12 & 13).

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} \quad (10)$$

Begriffe:

Θ	magnetische Durchflutung
Φ	magnetischer Fluss
R_m	magnetischer Widerstand

(Eberli, 2017)

$$\Theta = N \cdot I \quad (11)$$

Begriffe:

- N Anzahl Windungen der Wicklung
 I elektrische Stromstärke

(Eberli, 2017)

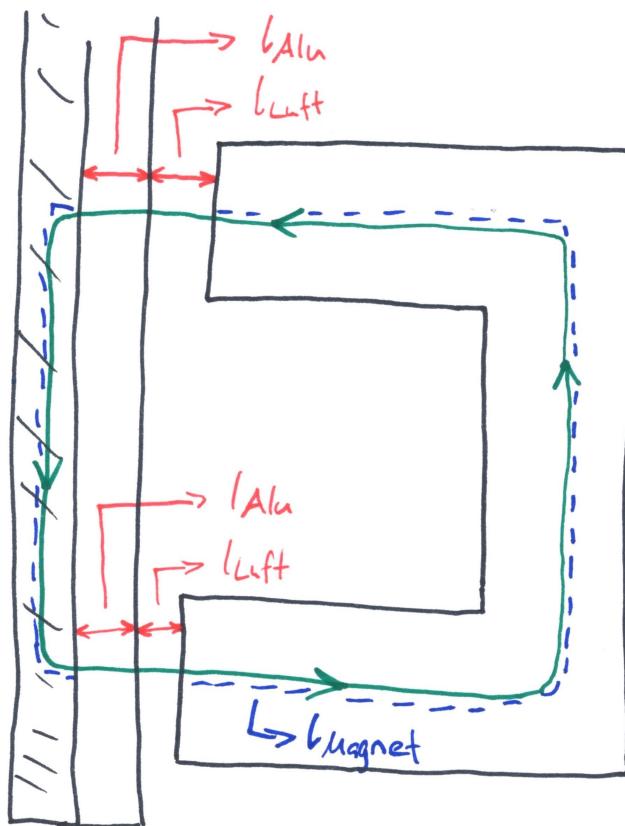


Abbildung 23: Magnetkreis bei Magnet und Scheibe

$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad (12)$$

Begriffe:

- μ_0 magnetische Feldkonstante = 1.257E-06 Vs/Am
- μ_r Permeabilitätszahl (1 $\hat{=}$ Vakuum, $\gg 1 \hat{=}$ ferromagnetisch)
- A Querschnittsfläche des Elements
- R_m Magnetischer Widerstand
- l Länge des magnetischen Kreises (Siehe Abbildung 23)

(Eberli, 2017)

Mit dem magnetischen Widerstand (Siehe Formel 12) wird in Kombination mit der magnetischen Durchflutung die Magnetstärke (magnetischer Fluss) berechnet. Wird ein starkes Magnet benötigt, wird je nach Möglichkeit entweder die Durchflutung angepasst oder der magnetische Widerstand durch Verkleinerung des Luftspaltes.

Der Luftspalt reduziert die magnetische Flussdichte, was den Magneten davon abhält, gesättigt zu werden. Ist ein Magnet gesättigt, wird überflüssige Energie in Wärme umgewandelt. Der Effekt des Luftspalts ist wegen dem magnetischen Widerstand des Vakuums. Die Permeabilitätszahl vom Vakuum ist gleich 1 und entspricht daher der magnetischen Feldkonstante ($\mu_0 \cdot 1 = \mu_0$). Bereits bei einer Querschnittsfläche von $1m^2$ und einem Luftspalt von $1m$ beträgt der magnetische Widerstand $\frac{1m}{1 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \cdot 1m^2} = 795'798 \frac{A}{Vs}$. Bei einem Eisenstück mit einer Permeabilitätszahl von 10'000 würde der magnetische Widerstand $\frac{1m}{10'000 \cdot 1.257 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2} \cdot 1m^2} = 79,58 \frac{A}{Vs}$ entsprechen, 10'000 kleiner als der Widerstand des Luftspalts. Der Nachteil des Luftspalts ist die Schwächung der Magnetstärke, was zu einer schwächeren Bremse führt.

Bei der Wirbelstrombremse ist es wichtig, ein starkes Magnet zu haben. Das bedeutet, dass einen kleinen magnetischen Widerstand benötigt wird.

$$R_{mGES} = R_{mLuft} + R_{mAlu} + R_{mMagnet} \quad (13)$$

Begriffe:

- R_{mGES} magnetische Gesamtwiderstand
- R_{mLuft} mag. Widerstand der Luftspalte
- R_{mAlu} mag. Widerstand der Aluminiumscheibe
- $R_{mMagnet}$ mag. Widerstand des Magneten

(Eberli, 2017)

Der gesamte magnetische Widerstand ist abhängig von der Dicke der Aluminiumscheibe, der Dicke des Luftspalts und die magnetischen Kreislänge des Magneten (Siehe Formel 13).

Abbildung 24 zeigt den Nachteil eines seitlichen Aufbaus im Vergleich eines C-förmigen Magneten (Siehe Abbildung 25 folgende Seite).

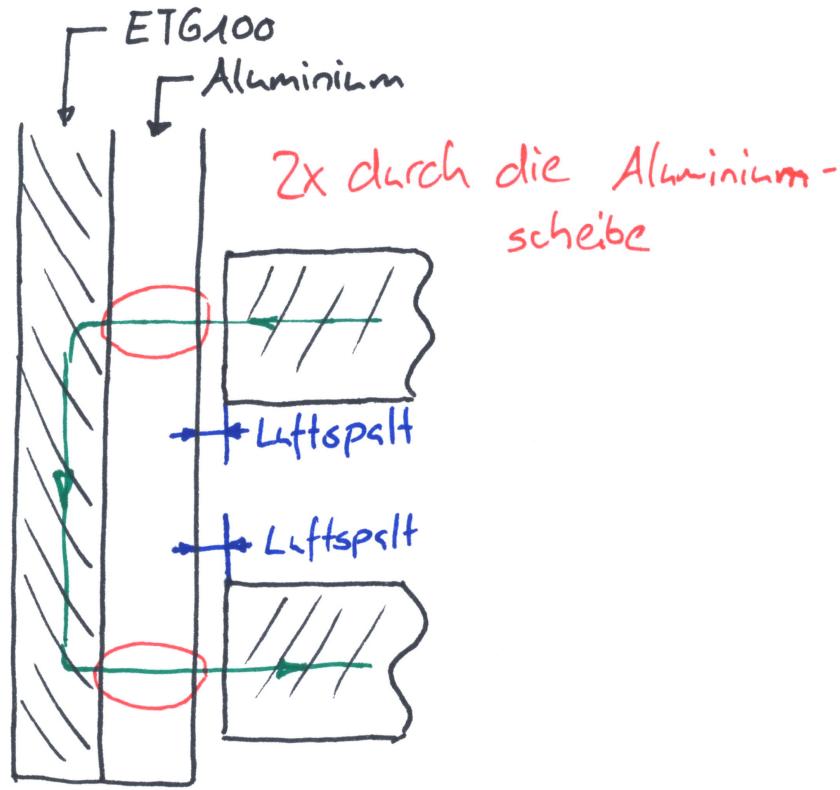


Abbildung 24: Luftspalt eines U-förmigen Magnets

Der Luftspalt kann gleich behalten werden, aber die Kreislänge der Aluminiumscheibe verdoppelt sich, was zu einem doppelten Aluminiumwiderstand führt (Siehe Formel 14). Da Aluminium dem Vakuum sehr nahe kommt, hat dies einen grossen Einfluss auf die Magnetstärke.

$$R_m = R_{mLuft} + 2 \cdot R_{mAlu} + R_{mMagnet} \quad (14)$$

Das Drehmoment M in der Formel 9 wird durch das Trägheitsdrehmoment ersetzt (Siehe Formel 15), da die Bremse abhängig von der zu bremsenden Scheibe ist.

$$M = J \cdot \alpha \quad (15)$$

Begriffe:

- M Drehmoment
- J Trägheitmoment
- α Winkelbeschleunigung

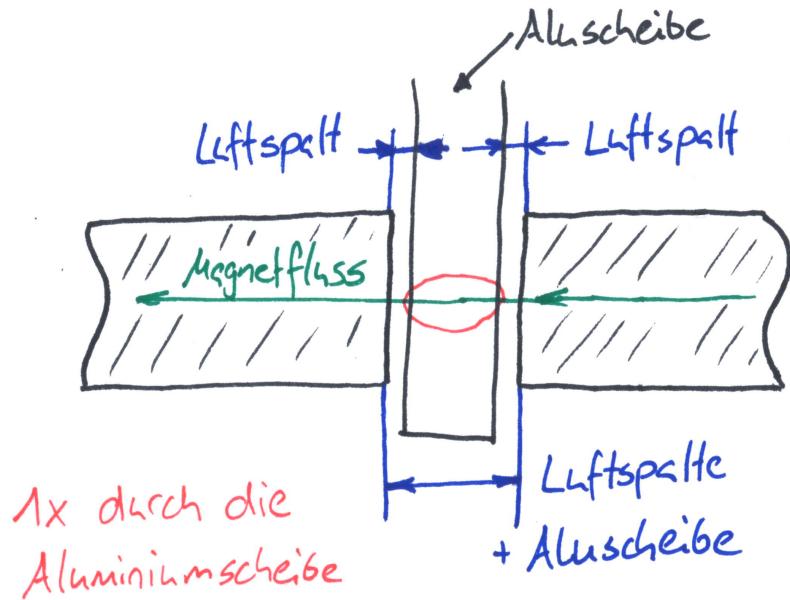


Abbildung 25: Luftspalt eines C-förmigen Magnets

(Kuchling, 2014, S.127)

Das Trägheitsmoment gibt die Beeinflussung der Masse von der Scheibe auf die Bremse an (Siehe Formel 16). Die Winkelgeschwindigkeit gibt die zeitliche Änderung der Winkelgeschwindigkeit innerhalb von zwei Zeitpunkten an (Siehe Formel 17).

$$J = m \cdot r^2 \quad (16)$$

Begriffe:

- J Trägheitsmoment
- m Masse der Scheibe
- r Radius der Scheibe

(Kuchling, 2014, S.131)

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (17)$$

Begriffe:

- $\Delta\omega$ Kreisfrequenzänderung während der Zeit Δt
- Δt Zeit während zwei Zeitpunkten

(Kuchling, 2014, S.88)

Die Kreisfrequenzänderung und die Zeitdifferenz sind bei der Berechnung Annahmen (der Wert wurde von der Gruppe vorgegeben).

Nun wurde die Formel 16 und die Formel 17 in die Formel 15 eingesetzt, was zu einer neuen Formel führt (Formel 18). Die Dimensionierung basiert nun auf dem *Trial-and-Error* Prinzip. Mit unterschiedlichen Dimensionen wird die Formel (Formel 9) verwendet, bis anhand eines nutzbaren Resultats die Dimensionen des Magnets ermittelt werden konnte.

$$M = \frac{m \cdot r^2 \cdot \Delta\omega}{\Delta t} \quad (18)$$

Folgende Angaben wurde für den aktuellen Magneten verwendet:

μ_R	3000	Annahme, da kein definitiver Wert existiert
N	300	
I	2A	
l_{LUFT}	8mm	
l_{Fe}	1.05mm	
a	0.015m	
b	0.003m	
c	0.1m	
A	0.15m	
n_{MAX}	$25s^{-1}$	
$\Delta\omega$	$5s^{-1}$	Gewünschte Abbremsung innerhalb Δt
Δt	5s	Zeit für $\Delta\omega$
α	$1rad \cdot s^{-2}$	Winkelbeschleunigung von Δt und $\Delta\omega$
m_{RAD}	5.747kg	Gewicht des Rades
Φ	$76.43 \cdot 10^{-6}Vs$	
γ	$6.21 \cdot 10^6 Sm^{-1}$	

daraus ergab sich:

$$\begin{aligned} M_{MAG} &= 0.0186Nm && \text{Drehmoment der Bremse} \\ M_{MASS} &= 0.00647Nm && \text{Trägheit des Rades} \end{aligned}$$

Anhand dieser Resultate sollte der Magnet stärker sein als die Massenträgheit der Scheibe. Was sich aber bei den Messungen herausstellte, stimmte dieser Wert nicht überein mit den Resultaten. Die Begründung, warum diese Resultate nicht stimmen, wird im Kapitel 8 erläutert.

Hier geschahen der erste und zweite Fehler: 1) das Trägheitsdrehmoment (Formel 15) wurde nicht mit der Formel von Smythe (Formel 9) kombiniert, sondern die beiden Drehmomente wurden verglichen, was zu einem eher ungenauen Magneten führte.

2) Der zweite Fehler ist die Fehlberechnung der Dimensionen. Anstatt die Formel (Formel 9) korrekt zu verwenden wurde stattdessen mit der folgenden Formel (Formel 19) gerechnet. Die Winkelfrequenz-Formel wurde nicht korrekt eingesetzt und gekürzt, was zu einem falschen Resultat führte.

$$M = \frac{n_{MAX} \cdot b \cdot \gamma \cdot \Phi^2 \cdot c^2}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \left(1 - \frac{A^2 \cdot a^2}{(A^2 - c^2)^2}\right) \quad (19)$$

Im Kapitel 8 wird die vollständige Formel aufgeführt.

6.3 Elektronik

Die Leiterplatte wurde im Open-Source Programm *KiCAD* erstellt. *KiCAD* ist eine Computer-unterstützende Zeichnungssoftware, welches erlaubt Elektronische Geräte zu entwickeln. In der Software wird zuerst das Schema gezeichnet. Ein Schema ist ein Plan, welcher angibt, welche Komponente mit welchem Signal verbunden werden. Wurde dieses Schema gezeichnet, kann das Schema in ein PCB (Printed Circuit Board oder Leiterplatte) umgewandelt werden. Eine Leiterplatte ist eine Platte aus Kupfer und Isolationsmaterial mit kleinen Komponenten bestückt. Auf dieser Platte sind nun die Verbindungen, welche im Schema gezeichnet wurden, realisiert.

Nachdem das Schema gezeichnet und umgewandelt wurde, konnte mit einer Skizze, welche die grobe Position der Komponenten angibt, die ungefähre Grösse der Leiterplatte selbst bestimmt werden (Siehe Abbildung 26).

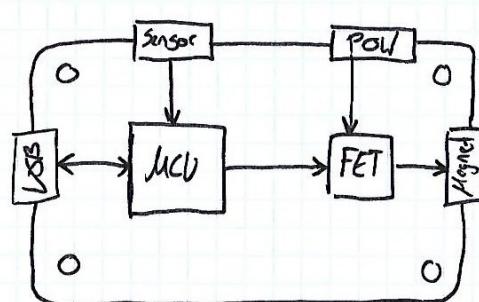


Abbildung 26: Skizze des Leiterplattenlayouts

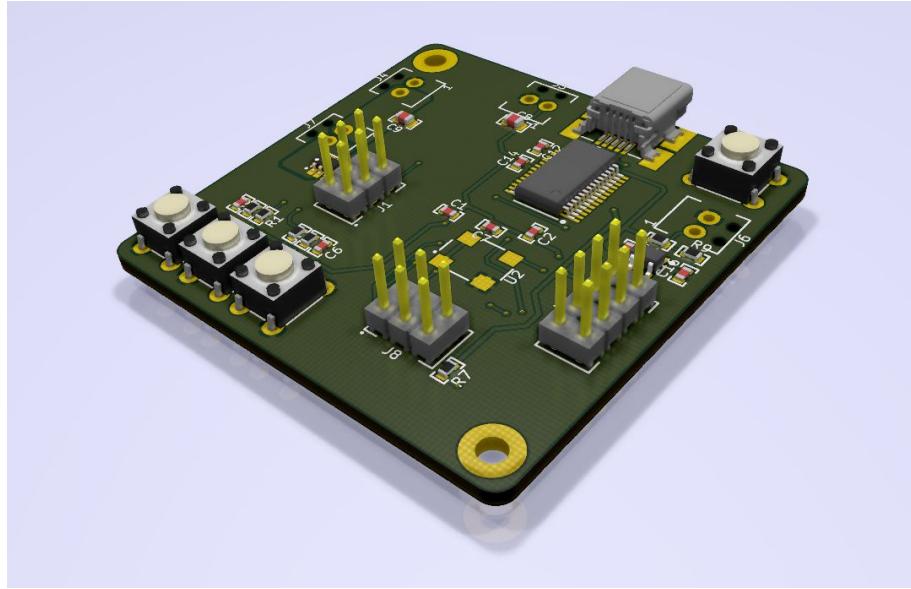


Abbildung 27: 3D Model der fertigen Leiterplatte

Nachdem die Leiterplatte fertig gezeichnet wurde (Siehe Abbildung 27), konnte die Leiterplatte einem Hersteller geschickt werden und die Komponenten bestellt werden.

6.4 Aufbau

Der Aufbau setzt sich aus sich aus folgenden Elementen zusammen:

- Elektromagnet
- C-Schienen
- Aluminiumscheibe
- ETG-100 Scheibe
- Gestell für den Elektromagneten

Die ETG-100 Scheibe wird als erstes an das Schwungrad montiert. Auf die ETG-100 Platte folgt direkt die Aluminiumscheibe. Diese Armatur wurde starr verschraubt. Auf die Stand-Eisenträger des Spinning Wheels wurde das Gestell für den Elektromagneten fixiert. Auf dieses Gestell wurden die zwei C-Schienen angeschraubt. Auf den C-Schienen wurde der Elektromagnet montiert. Dieser U-förmige Magnet schaut anschliessend mit den Pol-Austritten genau auf die Aluminiumscheibe zu. Die Wicklungen wurden über die Zylinder des Elektromagneten angebracht (Abbildung 28).



Abbildung 28: Gesamtaufbau

6.5 Drehzahlmessung

Mit der Drehzahlmessung wurde die Genauigkeit der Elektronik gemessen. Diese Genauigkeit wurde mit dem Drehzahlmessgerät überprüft. Da das Messgerät in der Industrie verwendet wird, ist die Messtoleranz sehr klein, führt also zu einem genauen Resultat.

Die Drehzahl ist der Kehrwert von der Zeit, welche für eine Umdrehung benötigt wird (Siehe Formel 20). Sie gibt an, wie viele Umdrehungen in einer Sekunde gemacht werden können.

$$n = \frac{1}{t} \quad (20)$$

Begriffe:

n Drehzahl

t Zeit für eine Umdrehung

(Kuchling, 2014, S.86)

Die Zeit wird mit einem digitalen Timer gemessen, was aber zu einer Einschränkung führt. Diese Einschränkung ist die Speichergrösse des Timers, da dieser begrenzt ist. Das heisst, dass der Timer nur für eine bestimmte Zeit laufen kann, bis dieser sich wieder zurücksetzt. Wenn aber der Timer als eine Art Metronom rekonfiguriert wird, kann ein Intervall mit einem konstanten Rhythmus produziert werden (Siehe Abbildung 29).

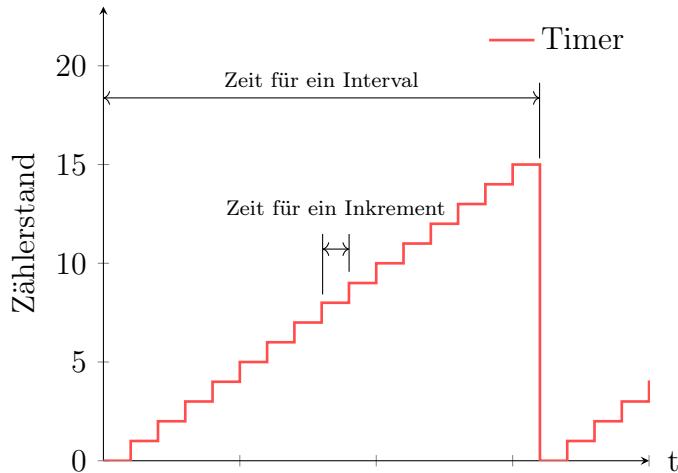


Abbildung 29: Intervall Durchgang des Timers

Nun werden die Intervalle bei einer Umdrehung des Rades gezählt. Man weiss nun anhand der Anzahl Intervallen und des Zählerstandes des Timers, wie lange eine Umdrehung dauert (Siehe Abbildung 21).

$$t = x_{\text{Zähler}} \cdot t_{\text{Timer}} + x_{\text{Intervalle}} \cdot t_{\text{Intervalle}} \quad (21)$$

Begriffe:

$x_{\text{Zähler}}$	Zählerstand des Timers (dient für ein genaueres Resultat)
$x_{\text{Intervalle}}$	Anzahl Intervalle pro Umdrehung
t_{Timer}	Dauer zwischen zwei Inkrementen $\rightarrow 16\text{us}$
$t_{\text{Intervalle}}$	Dauer eines Intervalls $\rightarrow \approx 25\text{ms}$

Das folgende Diagramm (Siehe Abbildung 30) zeigt das Verhalten des Timers. Die untere Linie ist der Timer und die obere Linie der Magnetschalter des Rades. Im Verlaufe der Zeit werden mehrere Intervalle gezählt, bis der Magnetschalter einen Impuls erzeugt. Der Timer wird in seinem aktuellen Zustand wieder zurückgesetzt und fängt erneut an zu zählen, bis wieder ein Impuls passiert. Gleichzeitig wird der Zählstand kopiert und abgespeichert, damit dieser vom Mikrocontroller verarbeitet werden konnte.

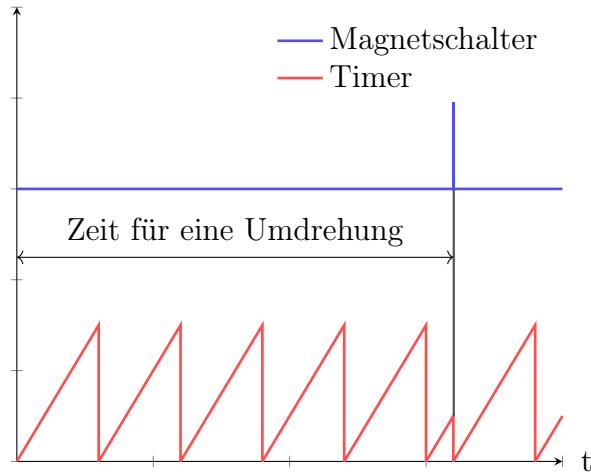


Abbildung 30: Eine Radumdrehung

6.5.1 Messungsaufbau

Damit bewiesen werden kann, dass die Messung übereinstimmt, muss die Zeit anhand einem Messungsaufbau gemessen und verglichen werden. Dazu wurde das bereits erwähnte Drehzahlmessungsgerät, eine Kamera und ein Laptop verwendet. Mit der Kamera wurde das Display des Drehzahlmessungsgerät aufgenommen, da das Messgerät kein Logger besitzt. Mit dem Laptop wurden die Resultate der Elektronik, welche über USB gesendet wurden, aufgezeichnet.

Im Kapitel 6.8 wird erklärt, wie die Aufnahmen verarbeitet und ausgewertet werden. Wichtig bei dieser Messung ist das Verhältnis des Messgerätes und der Elektronik. Anhand des Verhältnisses ist es möglich, herauszufinden, wie genau die Elektronik im Vergleich zum Messgerät ist. Das Verhältnis wird mit folgender Formel berechnet (Siehe Formel 22).

$$Verhältnis = \frac{n_{Elek}}{n_{Mess}} \quad (22)$$

Begriffe:

- n_{Elek} Drehzahl der Elektronik
 n_{Mess} Drehzahl des Messgerätes

6.6 Magnetbremsung

Der Aufbau ist derselbe wie bei Kapitel 6.5. Anstatt die Genauigkeit der Drehzahl zu messen, wird die Abbremsung des Rades gemessen. Dabei wird das Rad unterschiedlich beeinflusst, mit eingeschaltetem Magnet und mit ausgeschaltetem Magnet (Leerlauf, ohne Beeinflussung). Werden zwei Messungen gemacht mit ein- und ausgeschaltetem Magnet, kann die Kurve verglichen werden und dadurch kann erkannt werden, ob der Magnet einen Einfluss hat.

Die Erwartungen dieser Messung ist das Verhalten der Bremse anhand des Vergleichs (im oberen Paragraphen erwähnt) messen zu können. Im Kapitel 6.2 wird mit der Formel 17 die Winkelbeschleunigung berechnet, welche in dieser Messung zur Auswertung verwendet wird. Wiederum im Kapitel 6.2 wurde erwähnt, dass die gewünschte Winkelbeschleunigung/-abbremsung 1 rad·s⁻² entspricht. Die Messresultate der Elektronik müssen daher zuerst in die Winkelbeschleunigung umgewandelt werden. Die Winkelbeschleunigung entspricht der Kreisfrequenzänderung während einer bestimmten Zeit (Siehe Formel 23).

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\Delta t} \quad (23)$$

Begriffe:

- α Winkelbeschleunigung
 $\Delta\omega$ Kreisfrequenzänderung während der Zeit Δt
 Δt Zeit während zwei Zeitpunkten (diese Zeit wird in Kapitel (Datenauswertung) berechnet)
 ω_1 Anfangskreisfrequenz
 ω_2 Endkreisfrequenz

(Kuchling, 2014, S.88)

Wird diese Formel mit der Formel der Winkelfrequenz ($\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$) erweitert, kann die Winkelbeschleunigung mit der Drehzahl berechnet werden (Siehe Formel 24).

$$\alpha = \frac{(2 \cdot \pi \cdot n_2) - (\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_1)}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (n_2 - n_1)}{\Delta t} \quad (24)$$

Begriffe:

n_1 Anfangsdrehzahl

n_2 Enddrehzahl

6.7 Radanpassung



Abbildung 31: Radanpassung durch Bohrungen

Nach ersten Bremsversuchen wurde klar, welche hohe kinetische Energie in einem schweren Rad stecken kann. Das massive Rad verzögerte nicht erwartungsgemäss, aufgrund der nicht beachteten Trägheit.

Da der maximale Wert des Stromflusses innerhalb der Spulen bereits erreicht wurde, musste eine andere Lösung her. Um eine stärkere Verzögerung zu erzielen, wurde das Gewicht, des zu Beginn vorhandene Schwungrad reduziert.

Der Radius des grösseren Schwungrades wurde auf den Durchmesser der anderen zwei Scheiben angepasst. Dieser Vorgang erfolgte durch Bohrungen entlang dem Umkreis der Brems scheibe (Siehe Abbildung 31). Somit verlor das gesamte Rad ungefähr 60% an Masse.

Durch diesen Gewichtsverlust wird eine deutlich stärkere Verzögerung erwartet.

6.8 Datenauswertung

Anhand eines lauten Geräusches (z.B. Schlag auf den Tisch) können die Aufnahmen von den Kapiteln 6.5 & 6.6 in einem Filmbearbeitungsprogramm synchronisiert werden und die Daten herausgelesen werden. Dies ist natürlich kein professioneller Weg, diese Zeit zu überprüfen, aber sie funktionierte einwandfrei, mit den Geräten, welche zur Verfügung standen.

Der Vorteil daran ist, dass anhand der Bildrate des Films die Zeiten zwischen zwei Bildern konstant und berechenbar sind. Jede Messungsaufnahme besitzt eine Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde. Wird nun eine Sekunde durch 30 geteilt, erhält man die Zeit $0.0\bar{3}s$ (Siehe Formel 25).

$$t = \frac{t}{Anzahl\,Bildern} = \frac{1s}{30} = 0.0\bar{3}s \quad (25)$$

Begriffe:

n_1 Anfangsdrehzahl

n_2 Enddrehzahl

Als Filmbearbeitungsprogramm wurde Davinci Resolve von Blackmagic-Design verwendet. Wichtig war es, ein Programm zu verwenden, welches ein Projekt als einzelne Bilder exportieren kann. Ein Projekt wird erstellt und die Kamera- und Laptopsaufnahme wird in die Medien-Bibliothek aufgenommen. Diese werden nun in die Timeline hineingezogen und aufeinandergelegt. Eine Aufnahme wird solange verschoben, bis alle Geräusche synchron klingen (kein Echo).

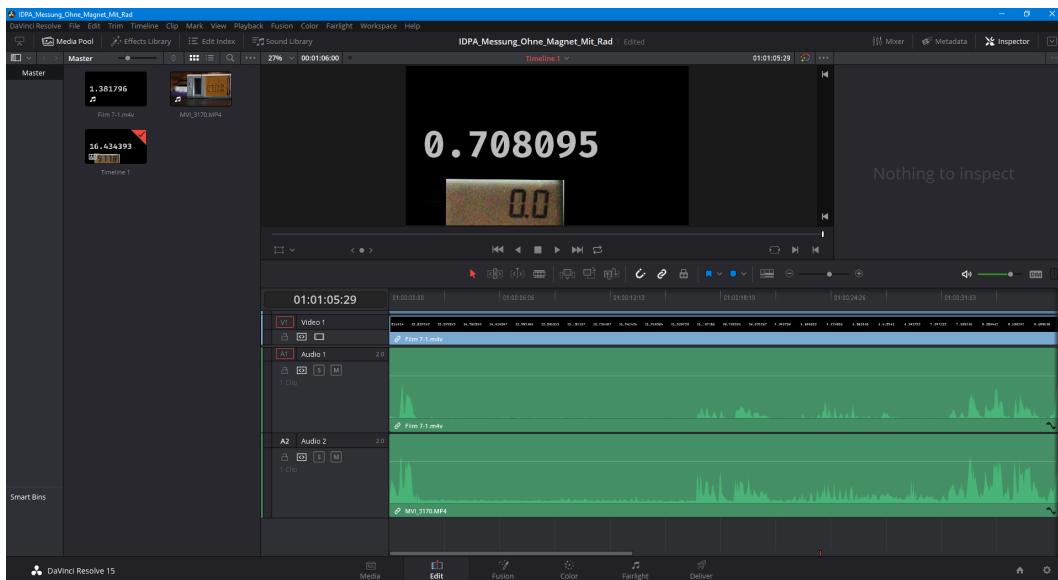


Abbildung 32: Ausschnitt aus Davinci Resolve

Als Filmbearbeitungsprogramm wurde *Davinci Resolve* von *Blackmagic-Design* verwendet. Wichtig war es, ein Programm zu verwenden, welches ein Projekt als einzelne Bilder exportieren kann. Ein Projekt wird erstellt und die Kamera- und Laptopsaufnahme wird in die

Medien-Bibliothek aufgenommen. Diese werden nun in die *Timeline* hineingezogen und aufeinandergelegt. Eine Aufnahme wird solange verschoben, bis alle Geräusche synchron klingen (kein Echo) (siehe Abbildung 32).

Wurde dieser Schritt gemacht, wird das Video als TIFF bei der kleinsten Auflösung (720 x 480 Pixel) exportiert. Als Endprodukt erhält man einzelne Bilder, die je nach Länge des Videos variieren (siehe Formel 26).

$$AnzahlBilder = t_{Video} \cdot f_{fps} \quad (26)$$

Begriffe:

t_{Video}	Länge des Videos
f_{fps}	Bildrate des Videos

Das längste Video beträgt eine Länge von ca. 3 Minuten, was ca. 5400 Bildern entspricht. Zur Auswertung sind dies zu viele Bildern, da die Werte von Hand in eine Excel Tabelle eingetragen werden müssen. Für dieses Projekt wird es keine gravierendem Folgen haben, wenn die Anzahl Bilder gekürzt wird. Es wird daher eine maximale Menge von 250 Bildern pro Messung gesetzt. Bei 250 Bildern können grosse Änderungen immer noch erkannt werden, dafür aber keine Feinänderungen.

Werden die exportierten Bilder auf 250 Stück gekürzt, wird sich auch die Zeit zwischen zwei Bildern ändern (Siehe Formel 27 & 28). Wird als Beispiel ein Faktor von 32 berechnet und das Video besitzt eine Bildrate von 30 Bildern pro Sekunde, würde eine Zeit von $1.0^{-6}s$ berechnet.

$$x = \frac{x_{BilderTotal}}{x_{BilderSoll}} \quad (27)$$

$$t_{fps} = \frac{x}{f_{fps}} \quad (28)$$

Begriffe:

x	Bilder-Verkleinerungs-Faktor
x_{Total}	Totale Anzahl Bilder des exportierten Videos
x_{Soll}	Gewünschte Anzahl Bilder
t_{fps}	Zeit zwischen zwei Bildern
f_{fps}	Bildrate

Sind alle Bilderserien vorbereitet, können die Daten auf den Bildern in ein Excel eingetragen werden und verarbeitet werden.

6.9 Magnetansteuerung - Konzept

Dieses Kapitel gilt als Konzept, da anhand Fehlberechnungen, Zeitdruck und Vergleichung gemessener Werte die Umsetzung dieser Methode nicht möglich war.

Das Magnet würde mit einem PWM-Signal angesteuert werden, was uns erlaubt, das Magnet unterschiedlich stark anzusteuern. PWM, Pulse-Width-Modulation, ist in der Elektronikwelt weit verbreitet, z.B. in LED-Lampen mit verstellbarer Helligkeit. Bei einem PWM-Signal wird ein Element eine bestimmte Zeit lang ein- und ausgeschaltet, wobei das Verhältnis zwischen diesen beiden Zeiten als Tastgrad angegeben wird. Der Tastgrad gibt in Prozent an, wie lange das Element während einer Periode eingeschaltet bleibt. In anderen Worten, der Tastgrad gibt an, wie viel von der maximalen Energie der Magnet erhält (Siehe Abbildung 33).

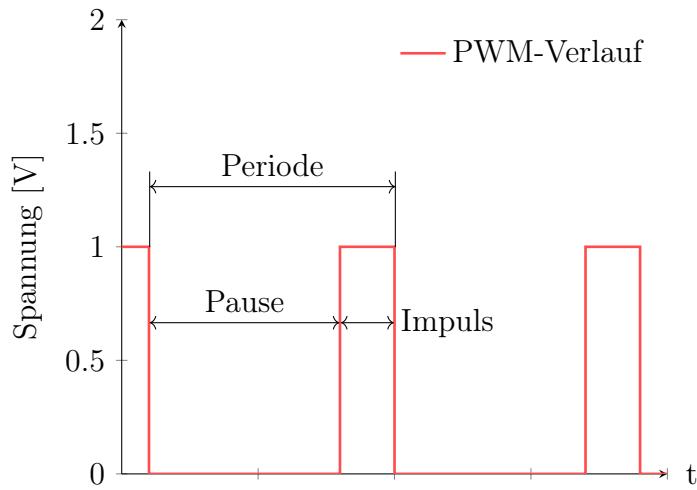


Abbildung 33: PWM Darstellung

In Kombination mit dem Regler wäre es dann möglich, je nach Abweichung und Regler-Werten, den Magneten unterschiedlich stark anzusteuern.

7 Ergebnisse

7.1 Drehzahlmessung

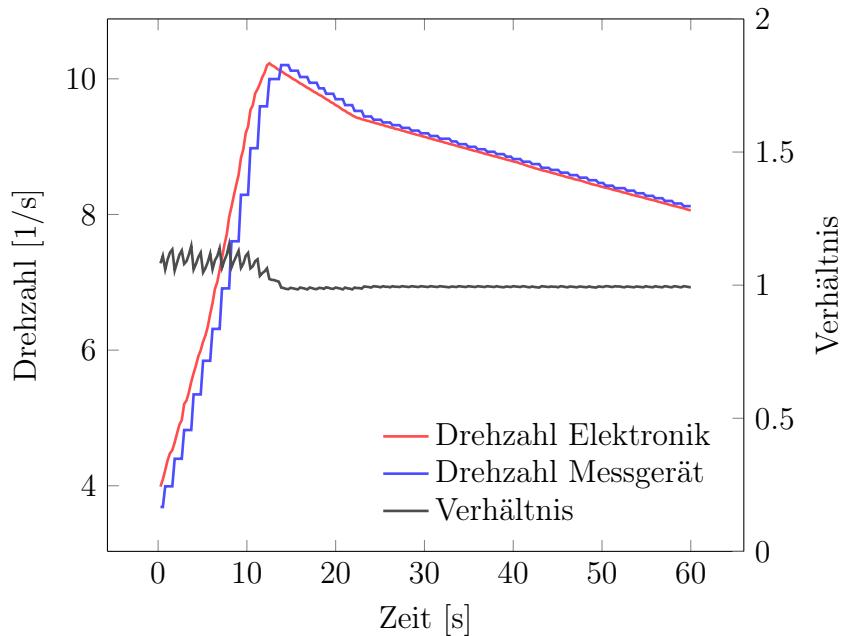


Abbildung 34: Resultat der Messung

Als Vorgabe wurde eine Toleranz von $\pm 5\%$ der Drehzahl geplant. Diese Vorgabe scheint die Elektronik einzuhalten. Im rechten Bereich (ab Sekunde 15) ist das Verhältnis der beiden Messresultaten sehr nahe, wobei im linken Bereich (ab Sekunde 0 bis 15) die Eigenschaft des Messgerätes das Verhältnis stark verfälscht. Das Messgerät misst die Anzahl Pulse während einer Sekunde und berechnet daraus die Drehzahl. Die Elektronik misst die Zeit zwischen zwei Pulsen und berechnet daraus die Drehzahl.

7.2 Magnetbremsung

7.2.1 Vor Radanpassung

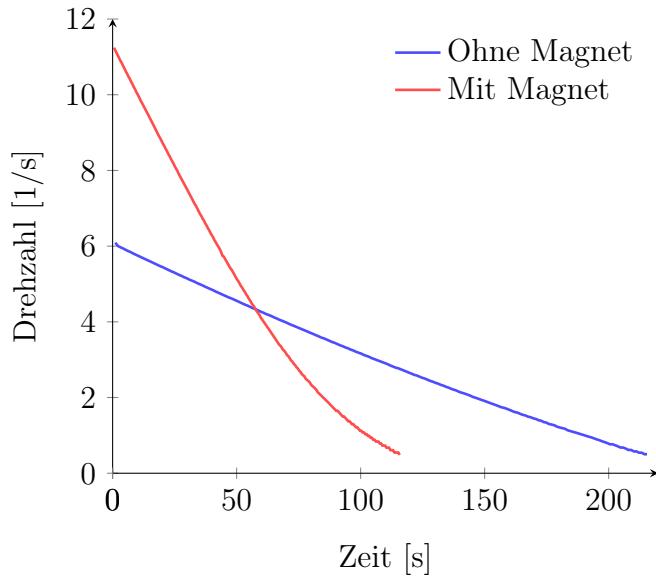


Abbildung 35: Resultat Ohne & Mit Magnet, Vor Anpassung bei 4A

Die Messung wurde mit 4A anstatt 2A gemacht, da bei 4A die Änderungen besser erkannt werden kann.

Als Vorgabe war die im Kapitel 6.2 erwähnten Winkelbeschleunigung einzuhalten ($1 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-2}$). Diese scheint anhand dieser Messung (Siehe Abbildung 35) diese Vorgabe nicht einzuhalten. Der Grund dafür sind die Trägheit des Rades und daher auch eine Fehlberechnung des Magneten. Nach Überprüfung der Berechnungen wurde herausgefunden, dass nicht nur das Gewicht der Bremsscheibe einzuberechnen war, sondern auch allen Elementen, die an dieser Scheibe befestigt waren. Anhand dieser Erkenntnis wurde die im Kapitel 6.7 erwähnten Anpassung ausgeführt.

Zu erkennen ist der Effekt des Wirbelstroms im Magnetbetrieb. Ab Sekunde 60 fängt das System schwächer zu Bremsen.

7.2.2 Nach Radanpassung

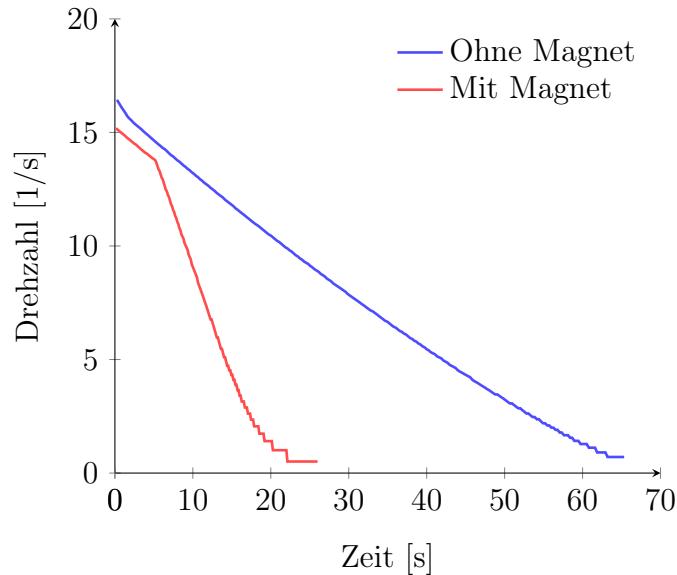


Abbildung 36: Resultat Ohne & Mit Magnet, Nach Anpassung bei 4A

Die Messung wurde mit 4A anstatt 2A gemacht, da bei 4A die Änderungen besser erkannt werden kann.

Die allgemeine Abbremsung konnte um ein dreifaches gekürzt werden (ca. 12kg Metall konnte entfernt werden). Die Winkelbeschleunigung dieser Messung ist sehr nahe der erwartenden Abbremsung. Der Knick in der Magnetbremsung ab Sekunde 7 repräsentiert den Zeitpunkt, wo der Magnet eingeschaltet wurde. Wiederum kann die schwächere Bremsung gegen Ende der Magnetbremsung erkannt werden.

8 Diskussionen

8.1 Drehzahlmessung

Die Ergebnisse der Messung sind zufriedenstellend. Es war möglich, die Drehzahl genau messen zu können. Die Grundstruktur des Drehzahlmessers ist in einem guten Zustand und kann als Grundbaustein für ein zukünftiges Modell der Wirbelstrombremse dienen. Die Messung übertrafen die Erwartungen und konnte in den anderen Messungen erfolgreich eingesetzt werden.

Der einzige Nachteil, welcher nicht in den Resultaten erkannt wurde, waren schwankende Messwerte. Während der Programmierung hatte der Drehzahlmesser Probleme mit den Reaktionen. Der gemessene Wert schwankte oft im Bereich von $\pm 2.5\text{ms}$ von der realen Drehzahl. Dies konnte während der Entwicklung auf ca. $\pm 0.2\text{ms}$ reduziert werden.

Als Version 1 der Bremse reicht die Messung, aber für Version 2 oder 3 wird sich die Genauigkeit verbessern müssen und die Schwankungen müssten auch möglichst gelöst werden.

8.2 Magnetbremsung

Zu Beginn waren die Resultate nicht zufriedenstellend. Es drehte zu langsam, nicht nach den Projektvorgaben. Die Resultate galten daher als unbrauchbar. Nachdem erkannt wurde, dass die langsame Geschwindigkeit des Rades durch die Trägheit der Bremsscheibe und des Fitnessrades, an welchem die Bremsscheibe befestigt wurde, beeinflussten, wurde das Rad angepasst.

Nach der Anpassung waren die Messungen zufriedenstellender, aber nicht dennoch gemäß Erwartungen. Nach den Vorstellungen hätte die Bremse einer in praktischen Bereichen eingesetzten Wirbelstrombremse ähneln müssen. Die Vorgaben waren zu unterdimensioniert und die Wirbelstrombremse reagierte daher zu langsam. Die Resultate galten wiederum als unzufriedenstellend.

Ein gutes Zeichen aber war, dass der Magnet funktionierte. Nur durch Entfernen von ca. 12kg Metall konnte eine Verdreifachung der Abbremsung erkannt werden. Daraus konnten einige Erkenntnisse gezogen werden. Der Magnet ist abhängig von der Last, die der Magnet bremsen muss, und durch Verkleinerung dieser Last verbessert sich die Bremskraft. Dies ist ein Meilenstein des Projekts. Man kann anhand dieser Erkenntnisse den Magnet neu dimensionieren und den Aufbau der Wirbelstrombremse neu aufbauen.

8.3 Nichterreichung

Die Erreichung der Hypothese konnte aus folgenden Gründen nicht erreicht werden:

- Fehlberechnungen
- Kenntnis über Regler
- Zeitdruck

8.3.1 Fehlberechnungen

Bereits im Kapitel 6.2 erwähnt, wurden die Formeln falsch angewendet. Dies hat den Grund, dass mit dem *Trail-&-Error*-Prinzip der Magnet dimensioniert wurde. Das Trägheitsdrehmoment und das Drehmoment von W.R. Smythes Formel 9 wurden nur miteinander verglichen, anstatt zusammenzuführen. Dies hat den Nachteil, dass der Magnet zu ungenau dimensioniert wird. Folgend wird die korrekte Zusammenstellung der Formel aufgeführt.

Wird anhand den aufgelisteten Formeln im Kapitel 6.2 eine einzige Formel erstellt, würde die Berechnung des Magneten stark vereinfacht. Die Formel (9) wird mit den Formeln 10, 11, 12, 13 und 18 erweitert, damit kann eine einzige Formel erstellt werden. Die daraus folgende Formel beinhaltet alle benötigten Parameter, welche für die Dimensionierung verwendet wird (Siehe Formel).

$$\frac{m \cdot r^2 \cdot \Delta\omega}{\Delta t} = \frac{n_{MAX} \cdot b \cdot \gamma \cdot (\frac{N \cdot I}{R_M})^2 \cdot c^2}{a^2} \cdot (1 - \frac{A^2 \cdot a^2}{(A^2 - c^2)^2}) \quad (29)$$

Wird nach R_M aufgelöst, erhält man (Formel 30)

$$R_M = \frac{c \cdot I \cdot N}{a \cdot r} \cdot \frac{\sqrt{\Delta t \cdot n_{MAX} \cdot b \cdot \gamma \cdot (1 - \frac{A^2 \cdot a^2}{(A^2 - c^2)^2})}}{\sqrt{m \cdot \Delta\omega}} \quad (30)$$

R_M beinhaltet Informationen über die Grösse des Magneten, der Aluminiumscheibe und des Luftspalts. Formel 13 wird mit der Formel des magnetischen Widerstands 12 für den Luftspalt, für die Aluminiumscheibe und für den Magneten erweitert (Siehe Formel 31).

$$R_M = \frac{l_{Luft}}{\mu_0 \cdot A} + \frac{l_{Alu}}{\mu_0 \cdot \mu_{rAlu} \cdot A} + \frac{l_{Magnet}}{\mu_0 \cdot \mu_{rMagnet} \cdot A} \quad (31)$$

Wird die Formel nach l_{Magnet} aufgelöst, erhält man:

$$l_{Magnet} = \frac{(R_M \cdot \mu_0 \cdot \mu_{rAlu} \cdot A - l_{Luft} \cdot \mu_{rAlu} - l_{Alu}) \cdot \mu_{rMagnet}}{\mu_{rAlu}} \quad (32)$$

Diese Formel ermöglicht nun, durch eine gemeinsame Querschnittsfläche, die Dicke der Scheibe und die Dicke des Luftspalts, die Magnetkreislänge zu berechnen. Anhand Magnetkreislänge und der Querschnittsfläche kann der Magnet dimensioniert werden.

8.3.2 Kenntnis über Regler

Das zweite Problem geschah beim Austesten des Reglers. Beim Austesten wurden die berechneten Werte des Reglers aufgefangen und am Laptop angezeigt. Nur war nicht bekannt, was funktionsweise richtig war. Die im Anhang hinterlegten Tabelle mit dem Name *results_regler_messung* zeigt Regelwerte im Bereich von 700 bis 800 an, was als zu hoch gilt. Diese Werte wurden anhand einem kleinen Test ermittelt, worin das Ziel war, den PID-Regler der Elektronik auszuprobieren (Siehe Abbildung 37).

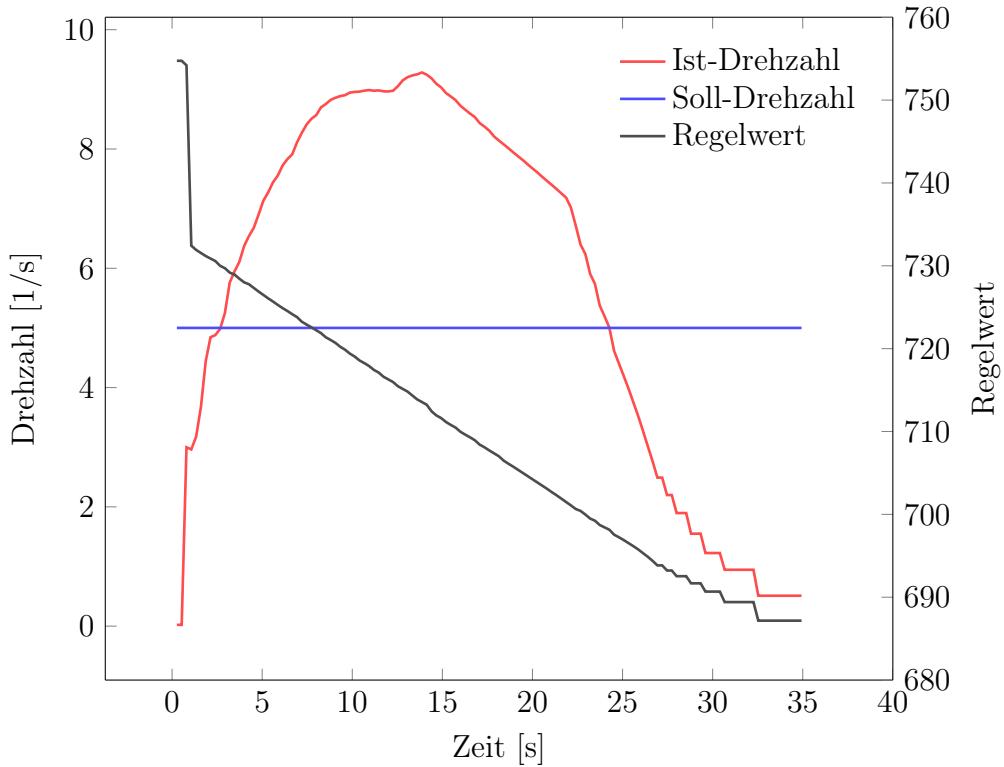


Abbildung 37: PID-Regelwerte mit Sollwert

Es kann in der Abbildung 37 erkannt werden, dass der Regelwert abnimmt, obwohl die Drehzahl zunimmt (bei einer Zunahme müsste der Regelwert zunehmen).

Vermutlich sind die Größen der Faktoren falsch gesetzt. Diese Werte konnten wegen zu wenig Zeit nicht geändert werden. Es gibt Rechenmethoden, welche für die Dimensionierung der Faktoren verwendet werden könnten, aber schlussendlich wird es mit dem Trial-&-Error Prinzip enden. Es wird solange ausprobiert, bis geeignete Werte ermittelt werden können.

Eine andere Vermutung ist, dass der Regler falsch implementiert wurde oder der verwendete Mikrocontroller die Werte nicht korrekt berechnet.

Der PID-Regler könnte in Zukunft anhand einer berechenbaren Situation überprüft werden. Dies wäre der Plan gewesen für diese Arbeit, aber da die Zeit nicht mehr reichte, wurde dies für die Zukunft geplant.

8.3.3 Zeitdruck

Der Hauptgrund, dass die Hypothese nicht erreicht werden konnte, war der Zeitdruck.

Der Zeitplan, welcher für die Arbeit erstellt wurde, hat jeden einzelnen Schritt aufgelistet, welcher für die Arbeit ausgeführt werden muss, ausser die Radanpassung, welche während der Arbeit dazwischen kam. Lieferzeiten und Fehlerbehebungen wurden ebenfalls nicht einberechnet, obwohl diese Schritte eigentlich wichtig sind.

In anderen Worten, es kam zum Zeitdruck wegen einer Fehlplanung. Man hätte jeden Schritt detaillierter beschrieben sollen, worin der Ausführende direkt weiß, was gemacht werden muss. Dazu müsste die Planung für die Arbeit länger dauern und bis ins Detail geplant werden. Da dies bei der Arbeit nicht immer der Fall war, wurde zu viel Zeit verloren gegangen und als Folge kam es zum Stress.

In Zukunft sollte genügend Zeit für die Planung investiert werden. Jeder Schritt müsste eine Beschreibung, Ziel und geschätzte Verarbeitungszeit besitzen, dass in der gesamten Zeitplanung die Schritte richtig verteilt werden können.

8.4 Schlussfolgerung

Der aktuelle Stand der Wirbelstrombremse kann die Geschwindigkeit des Rades messen und die Bremsung selbst ausführen. Es wurde erkannt, dass die Masse, welche an der Bremsscheibe befestigt ist, die Bremsung stark beeinflusst. Die Dimensionierung des Magneten kann anhand W.R. Smythes Formel (Formel 7) und dem Trägheitsdrehmoment berechnet werden.

Anhand diesen Erkenntnissen können mit folgenden Schritten weiter gearbeitet werden:

- **Neue Hardware** - Die Elektronik muss neu designet werden, da die aktuelle Elektronik das Magnet nicht richtig ansteuern kann, weil der Regler nicht richtig funktioniert. Annahme ist, dass der Mikrocontroller zu langsam oder die Berechnungen nicht richtig ausführen kann. Ebenfalls muss der MOSFET ersetzt werden, da nach Austesten der Scheibe mit einer Stromstärke von 4A die Strombegrenzung des MOSFETs überschreitet.
- **Neuer Aufbau** - Insbesondere muss das Rad des Fitnesstrainers durch eine Aluminiumscheibe ersetzt werden. Das Gewicht des Rades hat die Brems zu stark belastet (das Gewicht wurde nicht einberechnet).
- **Besserer Messungsaufbau** - Der Messungsaufbau muss durch bessere Messgeräte ersetzt werden, welche ein Logging-System besitzen. Ein Logging-System ist ein System, welches Daten in bestimmten Intervallen abspeichert, welche man danach digital ablesen kann.

9 Schlusswort

9.1 Joel von Rotz

« Durch diese Arbeit konnten wir neue Erfahrungen sammeln, welche uns im Berufsleben hilfreich sein können. Wir konnten schlussendlich durch eine umfangreiche Planung eine Wirbelstrombremse entwickeln, welche zwar nicht unseren Erwartungen entsprach, aber dafür neue Kenntnisse, insbesondere über Wirbelstrom und Magnetismus, brachte.

Ich erlernte durch diese Arbeit das Dokumentationprogramm *LATEX*. Mit diesem Programm können professionelle Arbeiten geschrieben werden und ich konnte diese Arbeit damit schreiben. Zusätzlich konnte ich einen Magneten anhand mathematischen Formeln berechnen und neue Erkenntnisse im Projektmanagement erlernen.

Mit den neuen Erkenntnissen bin ich bereit, dieses Projekt weiterzuführen. Ich werde bestehende Funktionen verbessern und neue Funktionen in das Projekt implementieren. Ich glaube daran, dass diese Arbeit mir auch in Zukunft neue Erfahrungen bringen wird, welche in weitere Projekte eingesetzt werden können.

Trotz dieses Erfahrungserfolg, gerieten wir in Zeitdruck. Wir mussten zusammen innert kürzester Zeit eine Dokumentation schreiben. Meine Lehre daraus ist, dass ich in Zukunft eine umfangreichere Planung erstellen werde. Reflektiv war dieses Projekt meiner Meinung nach eine gute Lehre, aus Fehlern zu lernen und auch neue Methoden aufzustellen, welche diese Fehler beheben können.

Meinen Erwartungen nach wollte ich die Arbeit vollständig abschliessen, was aber nicht möglich war. Ich bin daher über den Fortschritt nicht ganz zufrieden. Wir konnten einen Meilenstein setzen und ich will diesen weiterführen. »

9.2 Stefan Ruckli

« Unsere Arbeit wandelte sich von einer Grundidee zu einem Projekt, in dem jeder von uns gefragt war. Wir konstruierten schlussendlich eine funktionsfähige Wirbelstrombremse. Hiermit können wir von uns selbst behaupten, dass wenn ein elektrisch Leitfähiges Medium bei Bewegung, welches unter Einfluss eines äusseren Magnetfeld steht, darauf eine Kraft gegen die Bewegung bildet.

Ich erwartete von unserem Projekt, dass wir durch Messungen effektiv einen Nachweis über diesen Physikalischen Effekt darlegen können. Dies war bei unserem Projekt durchaus der Fall, was mich faszinierte. Somit setzte ich mich auch gerne mit dem Konzept einer Wirbelstrombremse auseinander. Ich habe viele neue Erfahrungen im Bereich der Elektrotechnik. Darüber hinaus habe ich noch neue Kenntnisse in dem Bereich der Werkstück-Bearbeitung gesammelt.

Für mich war die Arbeit, trotz unseres nicht komplett erfüllten Leitsatzes, ein Erfolg. Reflektiv kann ich behaupten, dass unser Projekt jede Erfahrung wert war. »

9.3 Filip Estermann

« Am Anfang unserer IDPA kannten wir uns noch nicht. Das Einzige, was wir voneinander wussten, war das gemeinsame Interesse an der Elektrizität. Aus diesem Interesse entstanden einige Ideen für unsere Arbeit und schliesslich entwickelte sich daraus ein Projekt. Wir waren alle motiviert, eine gute Arbeit zu machen und wir setzten uns hohe Ziele. Diese waren am Anfang etwas zu gross und wir reduzierten sie für unsere IDPA auf zwei Ziele, die zusammen eine überschaubare Arbeit werden sollen.

Meine persönlichen Erwartungen an diese Arbeit waren grösser, als nur unsere Ziele zu erreichen. Ich wollte neue Erfahrungen im Bereich der Elektrotechnik sammeln und mich vor allem bei der Dokumentation weiterentwickeln, da ich bis jetzt noch nie eine solche geschrieben hatte.

Rückblickend kann ich sagen, dass unsere Arbeit ein voller Erfolg war. Wir konnten gut zusammenarbeiten und wir fanden auf auftretende Probleme meistens schnell eine Lösung. Auch wenn wir unser zweites Ziel nicht erreichten, konnten wir daraus trotzdem einiges lernen und es ist eine wertvolle Erfahrung. Meine Erwartungen konnte ich vollständig erfüllen. »

Abbildungsverzeichnis

1	Pole & Feldlinien eines Magnets	6
2	Darstellung von Feldlinien	7
3	Wirbelstrombremse eines Zuges. Heruntergeladen von http://www.lokifahrer.ch/Lukmanier/Rollmaterial/Bremse/Verschleisslos.htm	8
4	Rechte-Hand Regel. Heruntergeladen von https://www.grund-wissen.de/physik/elektrizitaet-und-magnetismus/magnetismus.html	9
5	Magnetfluss bei einer Kupferspule	10
6	Regler Blockdiagramm	11
7	Regler Blockdiagramm	12
8	P-Regler mit konstanter Abweichung	13
9	P-Regler mit Rückkopplung	14
10	I-Regler mit konstanter Abweichung	14
11	PI-Regler mit konstanter Abweichung	15
12	PI-Regler mit Rückkopplung	15
13	PD-Regler mit konstanter Abweichung	16
14	PD-Regler mit Rückkopplung	17
15	PID-Regler mit konstanter Abweichung	17
16	PID-Regler mit Rückkopplung	18
17	PID-Regler mit Schwingungen	18
18	Schaltung Blockdiagramm	20
19	Mindmap	22
20	Parallele Vorgehensweise	23
21	Einfache Vorgehensweise	23
22	U-förmiges und C-Förmiges Magnet	24
23	Magnetkreis bei Magnet und Scheibe	26
24	Luftspalt eines U-förmigen Magnets	28
25	Luftspalt eines C-förmigen Magnets	29
26	Skizze des Leiterplattenlayouts	31
27	3D Model der fertigen Leiterplatte	32
28	Gesamtaufbau	33
29	Intervall Durchgang des Timers	34
30	Eine Radumdrehung	35
31	Radanpassung durch Bohrungen	38
32	Ausschnitt aus Davinci Resolve	39
33	PWM Darstellung	41
34	Resultat der Messung	42
35	Resultat Ohne & Mit Magnet, Vor Anpassung bei 4A	43
36	Resultat Ohne & Mit Magnet, Nach Anpassung bei 4A	44
37	PID-Regelwerte mit Sollwert	47

10 Glossar

C | E | F | I | K | M | W

C

C-Schiene

C-förmiges Metallstück, welches für Befestigungen von Elektronik dient..

E

Elektronen

Negativ geladenes Teilchen n der Atomhülle..

ETG-100

Metall mit Eiseninhalt..

F

Ferromagnetisch

Stoffe, die von Magneten angezogen werden..

FPU

Steht für Floating Point Unit und wird für Berechnungen von Kommazahlen verwendet..

Frequenz

Anzahl der Schwingungen im Verhältnis zu der dafür benötigten Zeit.

I

Induktion

Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses, die durch die Bewegung eines Leiters im Magnetfeld Erzielt wird. Im Leiter entsteht eine elektrische Spannung..

K

Kinetische Energie

Das ist die Energie, welche in einem sich bewegenden Körper gespeichert ist. Wird auch als Energie der Bewegung bezeichnet..

M

Magnetfeld

Raum, in dem ein Magnet Kraft ausübt..

Magnetischer Fluss

Die Gesamtzahl aller Magnetischen Feldlinien in einem Magneten..

Mikrocontroller

Ein Baustein, welcher aus Halbleitern besteht. Können meistens in kleinen simplen Geräten aufgefunden werden, wie zum Beispiel in einer Fernbedienung..

W

Wirbelstrom

Bewegt sich ein elektrisch leitender Körper in einem Magnetfeld, wird in dem Teil, der sich gerade durch das Magnetfeld bewegt eine Spannung induziert. Das führt zu einer Spannungsdifferenz im Körper. Diese wird mit Wirbelströmen ausgeglichen..

11 Literatur

- [Ebe17] Stephan Eberli. "Magnetismus". Deutsch. In: *ET2 - Elektrotechnik* (2017-08), S. 31–78.
- [Ebe18] Stephan Eberli. "Steuern und Regeln, unstetige Regler, stetige Regler, Regler". Deutsch. In: *ET4 - Elektronik* (2018-08), S. 5–30.
- [kfzehr] kfzteile42. *Funktion und Wirkungsweise der Bremse*. unbekanntes Jahr. URL: <https://www.kfzteile24.de/magazin/lexikon/bremse-aufbau-funktion> (besucht am 2019-02-09).
- [Kuc14] H. Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. Hanser Fachbuchverlag, 2014. ISBN: 9783446442184.
- [Scrhr] Scrum.org. *What is Scrum?* unbekanntes Jahr. URL: <https://www.scrum.org/resources/what-is-scrum> (besucht am 2019-02-11).
- [Smy42] W. R. Smythe. "On eddy currents in a rotating disk". Englisch. In: *Electrical Engineering* 61.9 (1942-09), S. 681–684. ISSN: 0095-9197. DOI: 10.1109/EE.1942.6436528.
- [unb15] unbekannt. *Verschleisslose Bremsen*. 2015. URL: <http://www.lokifahrer.ch/Lukmanier/Rollmaterial/Bremse/Verschleisslos.htm> (besucht am 2019-02-13).
- [VVhr] Schubert Volker und Rödig Volker. *Messung von Magnetfeldern - Elektromagnetismus*. unbekanntes Jahr. URL: http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/11/cmt/sensoren/vlus/magnet_mess.vlu.html (besucht am 2019-02-13).
- [Was05] Waste. *Regelungstechnik*. 2005-11-16. URL: <https://rn-wissen.de/wiki/index.php?title=Regelungstechnik> (besucht am 2019-01-30).

12 Anhang

12.1 Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären hiermit, dass wir die vorliegende interdisziplinäre Projektarbeit eigenständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe erstellt haben und dass alle Quellen, Hilfsmittel und Internetseiten wahrheitsgetreu verwendet wurden und belegt sind.

[Ort, Datum, Unterschrift]

12.2 QR-Codes

Im folgenden Link und QR-Code kann auf sämtliche Anhänge zugegriffen werden.



<https://github.com/joelvonrotz/Eddy-Current-Brake-Regulator>