



TNF

Technisch-Naturwissenschaftliche
Fakultät

Aufbau eines Mendocino-Motors

PROJEKTSEMINAR

in der Studienrichtung

MECHATRONIK

Angefertigt am Institut für elektrische Antriebe und Leistungselektronik

Beurteilung:

o.Univ.-Prof. DI Dr.sc. Wolfgang Amrhein

Mitwirkung:

DI Hubert Mitterhofer

DI Edmund Marth

DI Gerd Bramerdorfer

Eingereicht von:

Andreas Pröll

Gerhard Holzinger

4040 Linz, Altenbergerstraße 69

Linz, Jänner 2010.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit ist die Auslegung sowie der Aufbau zweier solarbetriebener, passiv magnetisch gelagerter Elektromotoren beschrieben.

Das Theorem von Earnshaw besagt, dass eine vollständige passive magnetische Lagerung mit Permanentmagneten nicht möglich ist. W. Braunbeck konnte 1939 zeigen, dass dies für diamagnetische Materialien sehr wohl möglich ist [7]. Eine magnetische Lagerung mit Permanentmagneten führt zur Instabilität mindestens eines Freiheitsgrades. Dieser muss durch eine aktive magnetische Lagerung mit entsprechendem Regelaufwand kompensiert werden. Dadurch sind Magnetlager relativ aufwändig und in alltäglichen Anwendungen eher nicht zu finden.

Die Vorteile der magnetischen Lagerung liegen in der Berührungslosigkeit. Dadurch besitzen Magnetlager eine sehr geringe Reibung und es ist sogar möglich, einen vollständig magnetisch gelagerten Rotor vom Stator hermetisch zu trennen.

Der Mendocino-Motor ist durch die passive magnetische Lagerung, wobei jedoch ein Freiheitsgrad mechanisch gelagert ist, ein sehr anschauliches Beispiel für die Wirkungsweise von Magnetlagern. Ohne direkte technische Anwendbarkeit liegt der Hauptzweck dieses Motors in der Verdeutlichung des Prinzips der magnetischen Lagerung. Des weiteren veranschaulicht der Mendocino-Motor die Grundprinzipien der elektrischen Gleichstrommaschine: Drehmomentenbildung durch Lorentzkräfte und die Kommutierung des Ankerstromes.

In diesem Sinne ist auch die Drehzahlmessung entstanden. Durch die Energieversorgung mittels Solarzellen bleibt das Gesamtsystem praktisch autonom, die einzige zugeführte Energie ist einfallendes natürliches oder künstliches Licht. Das Drehzahlsignal wird über eine Reflexions-Lichtschranke berührungsfrei generiert, so bleibt der Rotor bis auf den Kontakt der Spitze frei schwebend. Die Ausführung der Auswerteschaltung macht die notwendigen Komponenten für die Messung der Drehzahl sichtbar.

Alle Komponenten sind dem Betrachter zugänglich und verdeutlichen ihre Funktion. So stellt der Mendocino-Motor keine *black box* dar, die auf rätselhafte Art funktioniert. Vielmehr ist dieser ein Beispiel für ein Anschauungsobjekt, welches verschiedene physikalische und technische Prinzipien auf gelungene Weise verdeutlicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Funktionsbeschreibung	1
1.2	Stand der Technik	4
2	Theoretischer Hintergrund	7
2.1	Radiallager	7
2.2	Axiallager	11
2.3	Mechanische Grundlagen	13
2.4	Antrieb	14
2.5	Die Solarzelle	16
2.6	Beleuchtung	19
3	Erster Prototyp	22
3.1	Designmerkmale	22
3.2	Auslegung	24
3.3	Erkenntnisse	26
4	Reed-Kontaktierung	27
4.1	Wirkungsweise	27
4.2	Performance	29
5	Zweiter Prototyp	30
5.1	Designmerkmale	30
5.2	Auslegung	31
5.3	Demonstrator	34
6	Messungen	36
6.1	Induzierte Spannung	36
6.2	Leistungsabgabe der Solarzellen	38
6.3	Auslaufversuch	44
6.4	Feldmagnetanordnungen	47
7	Drehzahlmessung	51
7.1	Messprinzipien	51
7.2	Lichtschranke	52
7.3	Mikrocontroller	53
8	Auswerteschaltung	55
8.1	Auslegung	55
8.2	Realisierung	55
9	Fertigung	61

9.1 Rotor	61
9.2 Stator	61
9.3 Widerlager	62
9.4 Auswerteschaltung	62
10 Ausblick	65
10.1 Solarzellen	65
10.2 Magnetanordnung	66
10.3 Rotorform	66
10.4 Lagerung	67
A Drehzahlmessung	69
A.1 Auswerteprogramm	69
A.2 LCD-Display Ansteuerung	72
B MATLAB Auswertungen	83
B.1 Auslaufversuch	83
B.2 Lagerkraftsimulation	86
C Schaltung	89

1 Einleitung

1.1 Funktionsbeschreibung

Der Mendocino-Motor ist ein solar-betriebener, magnetisch gelagerter Elektromotor. Der Motor besteht aus einem quaderförmigen Rotorkörper. Dieser trägt die Solarzellen und die Wicklungen. Zu jeder Wicklung sind zwei Solarzellen parallel geschaltet. Die horizontal angeordnete Rotorwelle trägt den Rotorkörper und an den Enden jeweils einen Magnet. An einem Ende der Welle befindet sich eine Spitze. An der Grundplatte ist eine Glasplatte befestigt an welcher die Spitze der Welle anliegt. Dies verhindert eine Bewegung des Rotors in axialer Richtung. Ein zusätzlicher Magnet befindet sich unter dem Rotorkörper und erzeugt ein magnetisches Feld für den Motor.

Den Lagermagneten des Rotors liegen Magnete auf dem Stator (Grundplatte) gegenüber. Da diese die gleiche Magnetisierungsrichtung haben, wirken die Magnete abstoßend aufeinander. Der Rotor wird dadurch in der Schwebe gehalten.

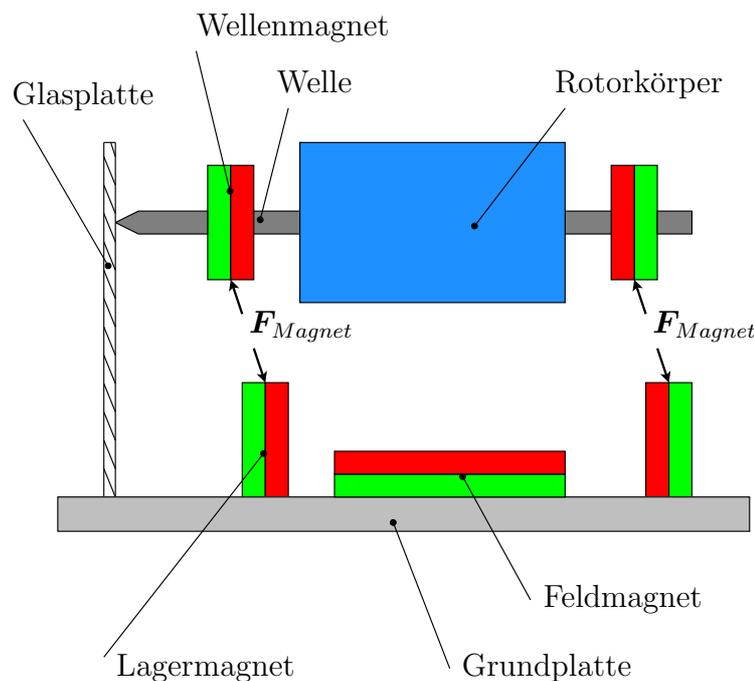
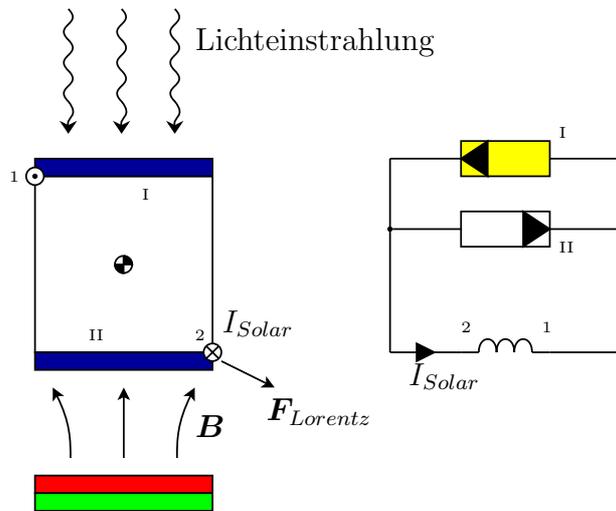


Abbildung 1: Skizze der Lagerung

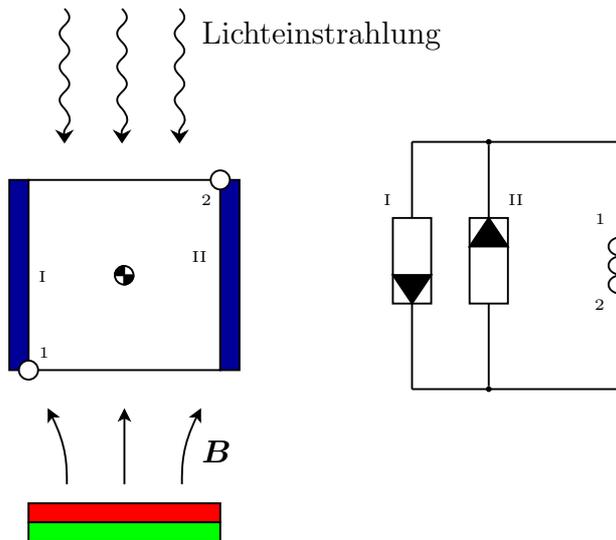
Die magnetische Lagerung ist für die Funktion des Mendocino-Motors notwendig, da das erzeugbare Antriebsmoment sehr gering ist. Der Motor muss mit dem Antriebsmoment den Rotor beschleunigen, die statische Unwucht und vorhandene Reibung überwinden. Die statische Unwucht lässt sich mit einfachen Mitteln nicht völlig beseitigen. Die Reibung wird durch die magnetische Lagerung stark reduziert.

Wenn Licht auf eine Solarzelle fällt beginnt diese Strom durch die Wicklung zu treiben. Dieser Strom bewirkt mit dem magnetischen Feld eine Drehung des Rotors. Durch die Drehung wird nun die nächste Solarzelle beleuchtet und diese treibt Strom durch die zweite Wicklung. Dieser Vorgang wiederholt sich bei weiterer Drehung des Rotors. Durch die Verschaltung der Solarzellen ist eine Kommutierung des Stromes in den Wicklungen garantiert. Dieses Verhalten wird auch selbstkommutierend genannt.

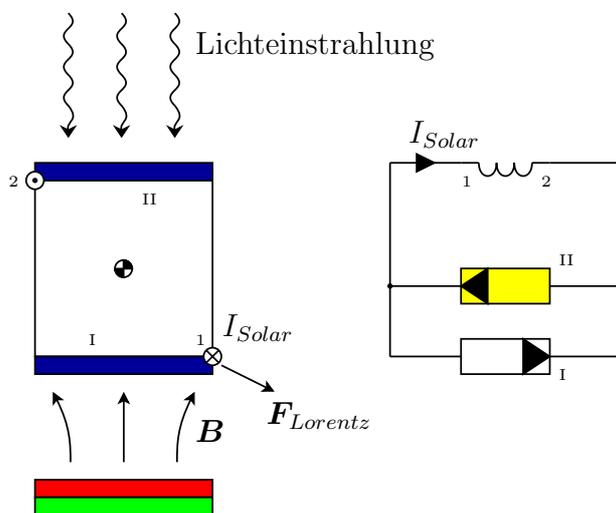
In Abbildung 2 wird die Selbstkommutierung anhand dem Verhalten einer Wicklung während einer halben Umdrehung des Rotors noch einmal beschrieben. Die Skizzen stellen schematisch die Verhältnisse am Rotor und die dazugehörigen elektrischen Verhältnisse dar. Zur Verbesserung der Anschaulichkeit wird das Ersatzschaltbild mitverdrehet.



Die Solarzelle I wird beleuchtet, diese treibt den Strom durch die Wicklung. Mit 1 und 2 sind die beiden Enden der Wicklung gekennzeichnet.



Der Rotor ist um 90° gedreht. Es wird keine Solarzelle beleuchtet. Es fließt kein Strom.



Der Rotor ist um weitere 90° gedreht. Die Solarzelle II wird beleuchtet, diese treibt den Strom durch die Wicklung. Die Stromrichtung in 1 und 2 wurde umgedreht.

Abbildung 2: Funktion der Selbstkommutierung

1.2 Stand der Technik

Die Suche in Internetportalen wie Google oder YouTube nach dem Begriff “Mendocino Motor” liefert viele Ergebnisse. Das Spektrum an Treffern reicht von einfachen Basteleien bis hin zu optisch sehr ansprechenden Modellen. Es finden sich Webseiten auf denen Bauanleitungen, Bausätze oder auch komplette Motoren erworben werden können. Der Großteil der mit der Google-Bildersuche gefundenen Mendocino-Motoren hat einen ähnlichen Aufbau wie er oben beschrieben wurde. Weiters gibt es z.B. noch Modelle mit vertikaler Rotorwelle.

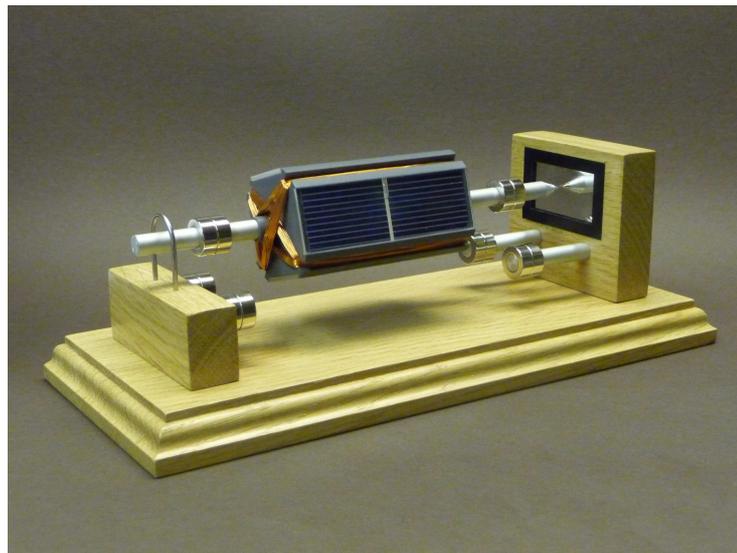


Abbildung 3: Mendocino Motor [RS]

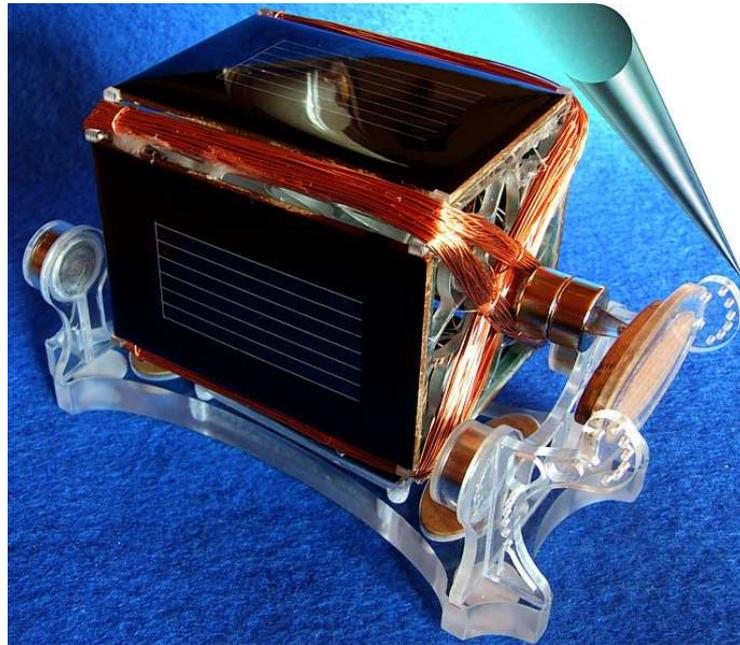


Abbildung 4: Mendocino Motor [RZ]

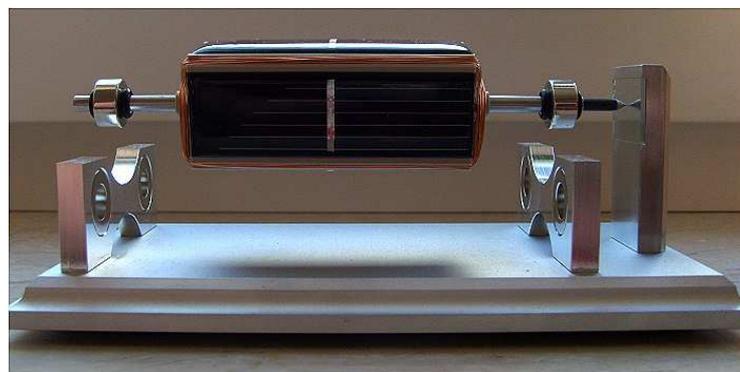


Abbildung 5: Mendocino Motor [AT]



Abbildung 6: Mendocino Motor [MK]

2 Theoretischer Hintergrund

2.1 Radiallager

2.1.1 Anordnung

Der Mendocino Motor ist radial permanentmagnetisch gelagert. Abbildung 7 zeigt mögliche Magnetanordnungen um ein Radiallager zu realisieren. Die Lagerung der im Zuge dieser Arbeit gebauten Mendocino-Motoren wird durch sich abstoßende, axial magnetisierte Magnetscheiben realisiert.

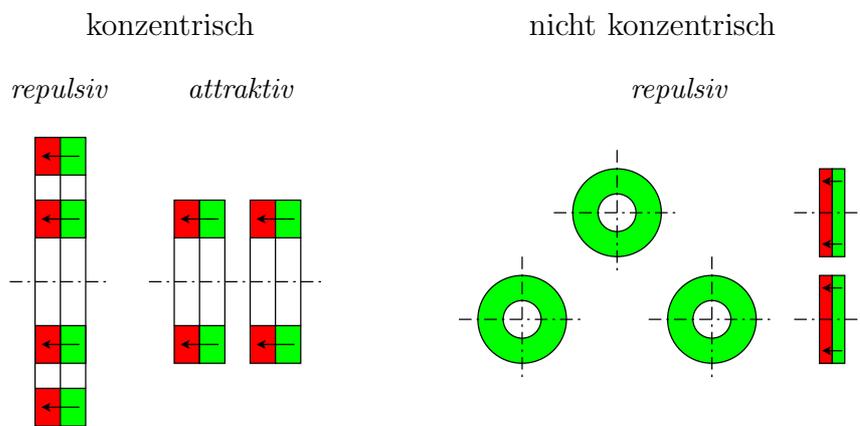


Abbildung 7: Anordnungen für Radiallager

Die Charakteristik der radialen Lagerung ist die einer nichtlinearen Feder. Die magnetische Kraft nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab. In axialer Richtung kann der Rotor gemäß dem Earnshaw Theorem nicht durch Permanentmagnete stabilisiert werden.

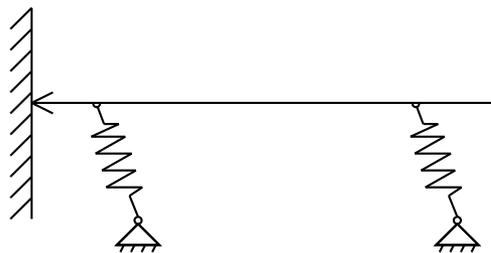


Abbildung 8: Prinzipschema der Lagerung

Als Magnetwerkstoff wurde wegen der hohen Leistungsdichte Neodym-Eisen-Bor gewählt. Diese Magnete besitzen eine hohe Remanenzflussdichte und minimieren so das Bauvolumen für die gegebenen Anforderungen.

Die Lagermagnete sind gemäß einer weit verbreiteten Anordnung platziert. Der Großteil der, während der Recherche im Internet gefundenen (siehe Kapitel 1.2) Bilder von Mendocino-Motoren zeigt diese Anordnung. Es werden zwei mal drei Magnetscheiben verwendet um den Rotor zu lagern. Es handelt sich hierbei um gelochte Magnetscheiben, da bei diesen die Montage besonders einfach ist.

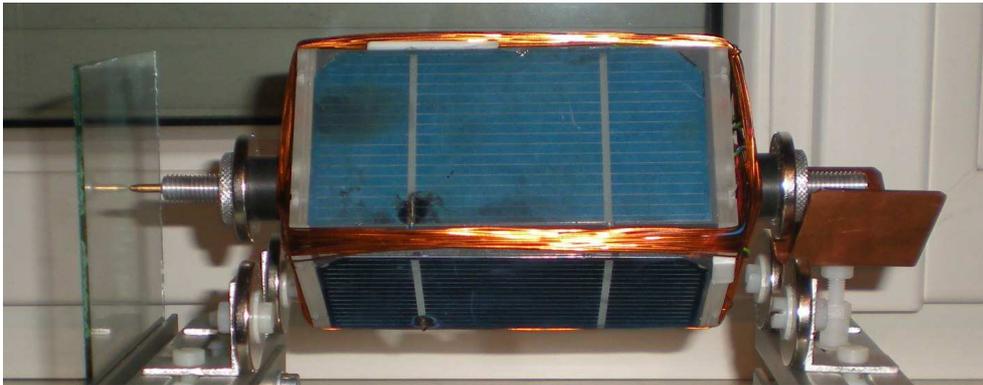


Abbildung 9: Aufbau des Mendocino Motor

2.1.2 Kraftwirkung

Mit dem numerischen Feldberechnungsprogramm Maxwell wurde versucht, die Lagerkraft-Kennlinie zu ermitteln. Hierzu wurde ein einzelnes Radiallager bestehend aus drei Magneten modelliert. Die Höhe des Wellenmagneten (h in Abbildung 10) über den beiden anderen wurde in einer Parameter-Studie variiert und die resultierende Kraft auf den Wellenmagnet berechnet.

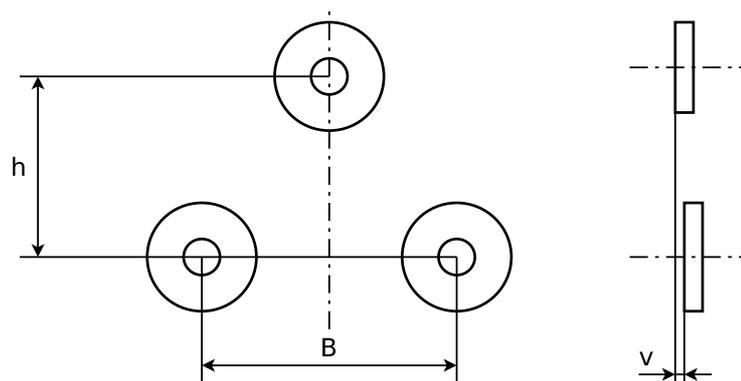


Abbildung 10: Einzellager

Die aus der Simulation gewonnenen Daten wurden mittels MATLAB ausgewertet, das dazugehörige Skript ist in Anhang B.2 angeführt. In Abbildung 11 ist der Verlauf der Kraft

über den Abstand dargestellt.

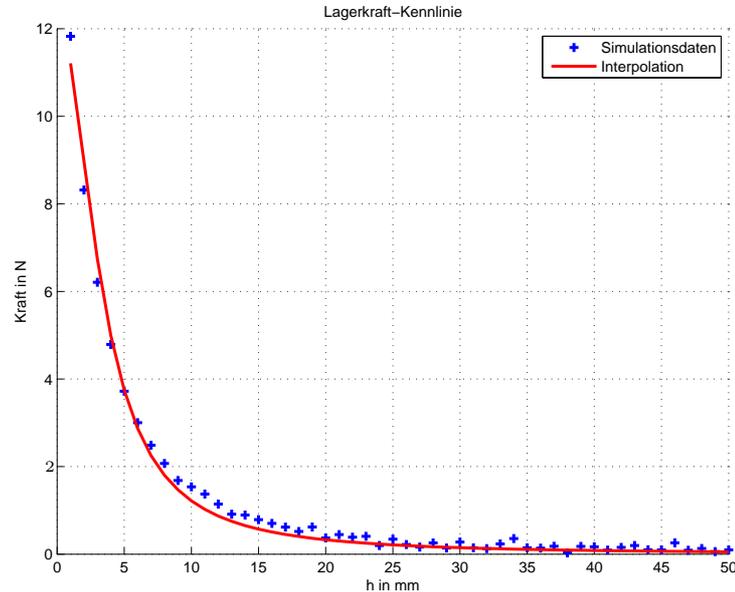


Abbildung 11: Lagerkraft Kennlinie

Die Interpolationsfunktion, welche die Simulationsdaten gut annähert, lautet

$$f(h) = \frac{p_1}{h^2 + p_2}.$$

Die Simulation liefert somit ebenfalls den durch die Theorie vorhergesagten umgekehrt quadratisch proportionalen Verlauf.

2.1.3 Earnshaw Theorem

Das Earnshaw Theorem, 1842 von Samuel Earnshaw aufgestellt, liefert die Grundlage für die spätere Aussage von Braunbeck, dass mit einem statischen elektrischen oder magnetischen Feld ein Objekt nicht in einem stabilen Gleichgewicht gehalten werden kann. Earnshaw wies in einer Arbeit über Molekularkräfte im Äther [?] nach, dass es für Partikel, die sich mit einer Kraft proportional $\frac{1}{r^2}$ abstoßen, keine stabile Anordnung gibt. Damit der Äther in sich stabil sei, schloss Earnshaw daraus, dass die Partikel die den Äther formten, sich mit einer Kraft proportional $\frac{1}{r^n}$ mit $n > 2$ abstoßen müssten. Diese Aussage Earnshaws beseitigte die Notwendigkeit einer hypothetischen Hülle die den Äther einschließen würde.

I think it therefore not improbable, that *each particle of the luminiferous ether exerts two forces, one attractive and varying reciprocally as the square*

of the distance; and the other repulsive and varying inversely in a higher ratio than the square; at any rate this supposition does away the necessity of the envelope mentioned at the beginning of this article.

- aus [?]

Da, gemäß dem Coulombschen Gesetz, die Kraft auf elektrische Ladungen im elektrostatischen Feld umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes ist, folgt nach Earnshaw, dass es für elektrisch geladene Partikel keine Anordnung gibt, in der sie sich in einem stabilen Gleichgewicht befinden.

Das gleiche gilt auch für die Magnetostatik, denn auch die magnetostatische Kraft, z.B. die Kraft zweier Permanentmagnete aufeinander, ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes. Somit gibt es auch für Permanentmagnete keine Anordnung, die ein stabiles Gleichgewicht ermöglicht.

Für Permanentmagnetlager gilt

$$k_x + k_y + k_z \leq 0.$$

Für permanentmagnetische Radiallager gilt $k_x = k_y = k_{radial}$ und damit

$$2k_{radial} + k_z = 0$$

Da das Radiallager notwendigerweise eine positive Radial-Steifigkeit hat, ergibt sich zwangsläufig eine negative Steifigkeit in die z -Richtung.

$$k_{destabilisierend} = -2 k_{stabilisierend}.$$

Die destabilisierende Wirkung eines radialen Permanentmagnetlagers ist demnach doppelt so groß wie die stabilisierende. Bei Anwesenheit von ferromagnetischen Materialien gilt folgender Zusammenhang

$$k_{destabilisierend} < -2 k_{stabilisierend}.$$

Daraus folgt, dass mit permanentmagnetischen Radiallagern ein Rotor mit zwei Lagerstellen nur in maximal vier Freiheitsgraden stabilisiert werden kann.

Nicht berücksichtigt wurde von Earnshaw die Anwesenheit diamagnetischer Stoffe im Magnetfeld, wodurch eine vollständige passive Stabilisierung ermöglicht wird. Dies gilt z.B. für Graphit oder Bismut und Supraleiter, welche ideale Diamagnete sind. Der Grund hierfür ist, dass $\mu_r < 1$.

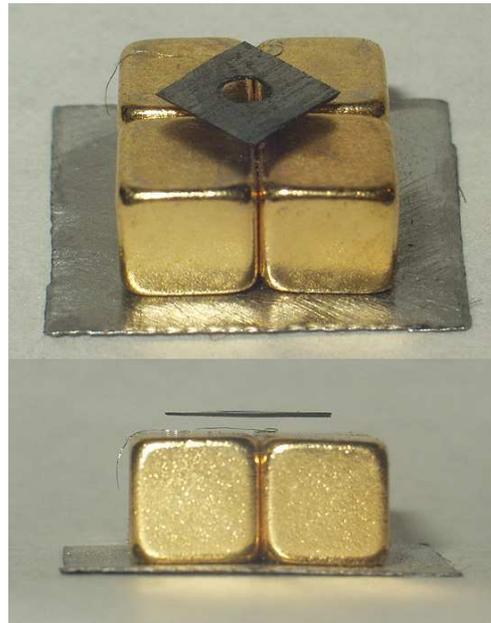


Abbildung 12: Diamagnetisch levitierender Graphit [US]

2.2 Axiallager

2.2.1 Ausführung

Die radiale permanentmagnetische Lagerung bewirkt eine negative Steifigkeit in axialer Richtung und wirkt damit destabilisierend [4]. Die axiale Lagerung muss entweder aktiv magnetisch oder mechanisch erfolgen. In diesem Fall wird eine einfache mechanische Lagerung verwendet um das Gesamtsystem passiv zu halten.

Die axiale Lagerung wird durch eine Kugelschreiberspitze auf einer Glasplatte realisiert. Die Kugel in der Kugelschreiberspitze ist üblicherweise aus Wolframcarbid, Stahl oder Messing gefertigt. Durch die Reibpaarung mit Glas wird versucht, die Reibung möglichst gering zu halten um negative bzw. unerwünschte Auswirkungen der Lagerung auf das System zu vermeiden.

Das realisierte Axiallager schränkt nur die Translation in der axialen Richtung ein. Alle anderen Freiheitsgrade des Rotors werden nicht eingeschränkt.

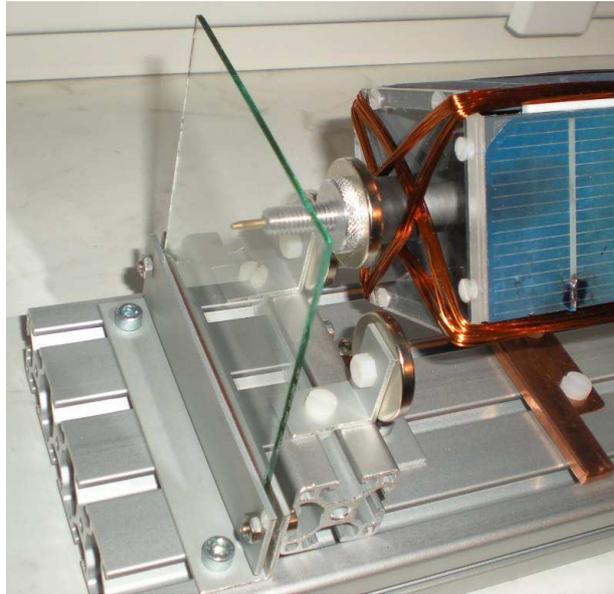


Abbildung 13: Axiallager

2.2.2 Arbeitspunkt

In Abbildung 14 ist die Axiallagerung dargestellt. Der Rotor ist in axialer Richtung versetzt zu den Lagermagneten, durch die Glasplatte ist eine weitere Bewegung in diese Richtung behindert, in Ruhe. Im rechten Teil der Abbildung ist schematisch das Potential über die axiale Richtung aufgetragen. Die Kraft eines Potentialfeldes ist proportional der negativen Ableitung. Bei $x = x_0$ befindet sich ein Maximum. Hier befindet sich die instabile Gleichgewichtslage in der die Magnete genau über einander schweben und keine axiale Kraft auftritt. Bei einer Auslenkung in positiver oder negativer x -Richtung verringert sich das Potential, die Axialkraft wirkt daher forttreibend.

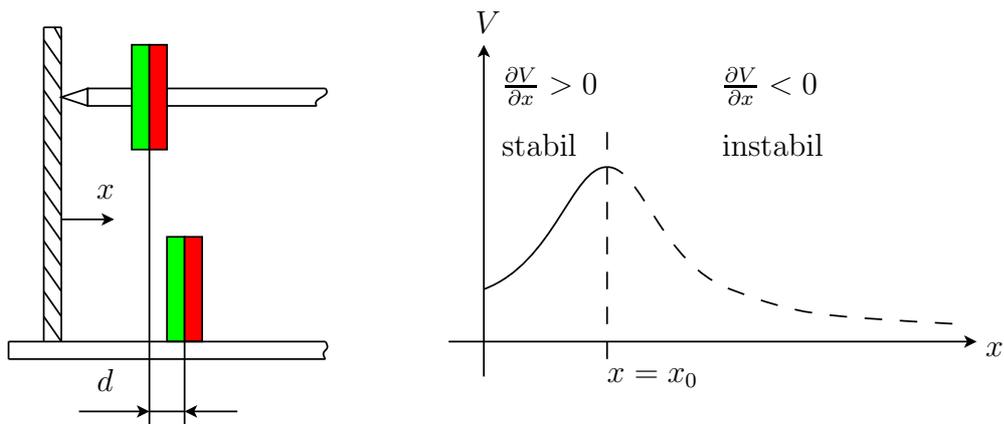


Abbildung 14: Arbeitsbereich des Axiallagers

Im Bereich zwischen $x = 0$ (d.h. die Spitze liegt auf der Glasplatte auf) und $x = x_0$ (d.h. der Wellenmagnet befindet auf Höhe des Lagermagnetes) ist die Ableitung der Lagerkraft nach x und damit die Steifigkeit des Lagers positiv. Gemäß Definition bewirkt die positive Steifigkeit eine rücktreibende Kraft bei Auslenkung. Für $x > x_0$ ist die Steifigkeit negativ. Diese bewirkt eine Kraft in Richtung der Auslenkung und wirkt somit forttreibend.

2.3 Mechanische Grundlagen

2.3.1 Mechanische Grundgleichungen

Der Drallsatz für den Rotor lautet

$$\begin{pmatrix} J_x & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{xy} & J_y & J_{yz} \\ J_{xz} & J_{yz} & J_z \end{pmatrix} \dot{\omega} = \mathbf{M}$$

mit der Summe aller einwirkenden Momente \mathbf{M} .

Die Einträge J_{xy}, J_{xz}, J_{yz} welche die Nebendiagonaleinträge des Massenträgheitstensors sind, werden Deviationsmomente genannt. Diese verschwinden, wenn die Achsen des verwendeten Koordinatensystems mit den Trägheitshauptachsen zusammenfallen. Der Massenträgheitstensor in Hauptachsenform wird dann zu

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{pmatrix}.$$

Durch statisches Auswuchten des Rotors wird erreicht, dass der Schwerpunkt des Rotors auf der Drehachse zu liegen kommt. Wird dies erreicht, so gibt es keine ausgezeichnete Winkellage des Rotors. Wenn bei Vorliegen einer statischen Unwucht me gilt, dass

$$mge > M_{Antrieb}$$

mit der Masse des Rotors m und dem Normalabstand des Schwerpunktes von der Drehachse e , ist dieser nicht mehr in der Lage aus dem Stillstand hochzulaufen.

Durch dynamisches Auswuchten wird versucht zu erreichen, dass die Hauptträgheitsachse mit der Drehachse zusammenfällt. Ist dies nicht der Fall, so bewirkt das Antriebsmoment nicht nur eine Winkelbeschleunigung um die Drehachse, sondern auch um die anderen Achsen. Durch rotordynamische Effekte gerät der Rotor ins Taumeln.

2.3.2 Luftwiderstand

Für einen sich drehenden prismatischen Körper in ruhendem Fluid finden sich in der gängigen Studienliteratur keine Formeln zur überschlagsmäßigen Berechnung des Luftwiderstandes. Messungen, siehe Kapitel 6.3 legen einen quadratischen Zusammenhang von Winkelgeschwindigkeit und Luftwiderstand nahe.

Eine vermutete lineare Abhängigkeit kann durch die Messungen als unwahrscheinlich eingestuft werden. Motiviert wurde diese Vermutung durch [5], jedoch gilt dort der lineare Zusammenhang von Winkelgeschwindigkeit und Widerstandsmoment für sich drehende Zylinder und laminare Strömungsverhältnisse.

2.4 Antrieb

Das Antriebsprinzip des Mendocino-Motors ist, wie bei einer gewöhnlichen Gleichstrommaschine, die Lorentzkraft auf die Leiter der Ankerspulen. Dazu wird das Feld der permanentmagnetischen Lagerung genutzt. Alternativ kann auch ein eigener Magnet für die Felderregung verwendet werden. Die Ankerspulen sind auf den prismenförmigen Rotor gewickelt. Aus Gründen der konstruktiven Einfachheit befinden sich die Wicklungsstränge an den Seitenkanten (siehe Abbildung 16) des Rotors. Der daraus resultierende Abstand zur Rotationsachse ist in diesem Fall maximal und wirkt als Hebelsarm zur Drehmomentbildung. Der Ankerstrom wird von den Solarzellen, die sich an den Mantelflächen des prismenförmigen Rotors befinden, getrieben.

Die Solarzellen zweier sich gegenüberliegender Seitenflächen des Rotorkörpers treiben zusammen Strom durch eine Wicklung. Die antiparallele Verschaltung der Solarzellen bewirkt bei Drehung des Rotors die Kommutierung des Rotorstromes (siehe Abbildung 2). Durch den Lichteinfall wird immer eine Solarzelle stärker bestrahlt und liefert mehr Strom als die andere Zelle. Der Differenzstrom wird durch die Wicklung getrieben. Dies gilt jedoch nur in erster Näherung, da die Solarzellen auch einen Innenwiderstand haben.

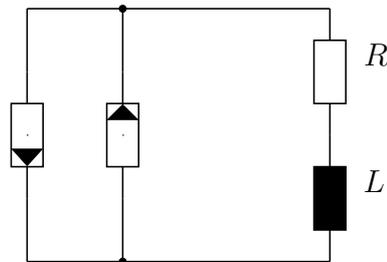


Abbildung 15: Schaltung einer Rotorwicklung

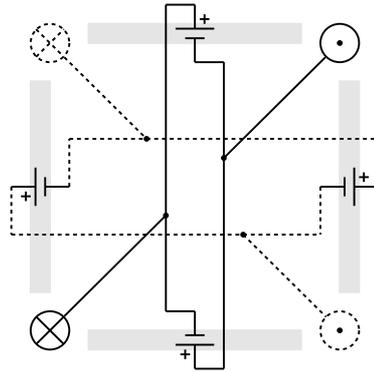


Abbildung 16: Verschaltung der Solarzellen beim Vierkantrotor

Die Kraft auf ein Stück eines Einzelleiters lautet

$$d\mathbf{F}(\varphi) = I(\varphi) (d\mathbf{x} \times \mathbf{B}(\varphi, x)).$$

Summiert man über die Einzelleiter und integriert über die Länge eines Leiters erhält man

$$\mathbf{F}(\varphi) = \sum_i [I_i(\varphi) \int_{L_i} (d\mathbf{x} \times \mathbf{B}_i(\varphi, x))].$$

Das Moment des Motors lautet

$$\mathbf{M}(\varphi) = \sum_i [\mathbf{r}_i \times (I_i(\varphi) \int_{L_i} (d\mathbf{x} \times \mathbf{B}_i(\varphi, x)))].$$

Wird das doppelte Kreuzprodukt aufgelöst, erhält man

$$\mathbf{M}(\varphi) = \sum_i [I_i(\varphi) \int_{L_i} (d\mathbf{x}(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{B}_i(\varphi, x)) - \mathbf{B}_i(\varphi, x)(\mathbf{r}_i \cdot d\mathbf{x}))].$$

Der erste Term im Integral ergibt einen Momentenanteil in Richtung der Drehachse. Der zweite Term ergibt einen Momentenanteil welcher in Richtung des magnetischen Flusses zeigt. Ist der Aufbau um die Mitte (y-Achse) symmetrisch, kann der zweite Term vernachlässigt werden, da das resultierende Antriebsmoment bei der Integration verschwindet.

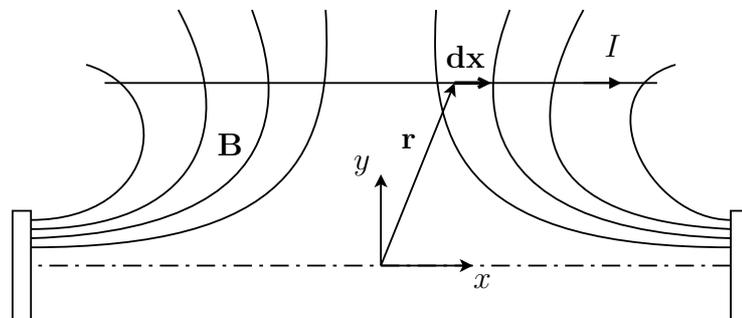


Abbildung 17: Zur Drehmomentenbildung

Es verbleibt für die Momentenbeziehung der Term

$$\mathbf{M}(\varphi) = \sum_i [I_i(\varphi) \int_{L_i} d\mathbf{x}(\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{B}_i(\varphi, x))].$$

Eine weiterführende analytische Berechnung des erzeugten Moments wäre sehr aufwendig und wurde aus folgenden Gründen nicht durchgeführt.

Der Strom in den Wicklungssträngen ist von der Winkelstellung des Rotors sowie der Richtung und Intensität des Lichteinfalles abhängig. Das Magnetfeld ist durch die Abwesenheit von ferromagnetischen Materialien nicht an bestimmte Pfade gebunden und breitet sich frei im Raum aus. Der Flussdichtevektor ist deshalb stark ortsabhängig, darum können Vereinfachungen, wie sie bei elektrischen Maschinen mit Eisenkreis üblich sind, nicht getroffen werden.

2.4.1 Feldsimulation

Es wurde versucht, mit dem Feldberechnungsprogramm Maxwell 3D das magnetische Feld zu simulieren. Geplant war, die Werte des magnetischen Flusses an den Punkten aufzunehmen, an denen sich die Wicklung im Zuge einer Umdrehung befindet.

Da sich das Feld, durch die Abwesenheit von Eisenteilen zur Feldführung, jedoch frei im Raum ausbreiten kann, können übliche Vereinfachungen nicht getroffen werden. Aus diesem Grund würde die Simulation sehr aufwendig werden, da das Rechengebiet groß gewählt und fein vernetzt werden müsste. Somit wurde die Berechnung des magnetischen Feldes im Raum nicht weiter verfolgt.

Für die Ermittlung des zu erwartenden Drehmoments wurde daher nicht der Weg der Berechnung der Lorentzkraft mittels Flussdichte, sondern über das Produkt von induzierter Spannung und Ankerstrom gewählt.

2.5 Die Solarzelle

Die Solarzelle wandelt die Energie des einfallenden Lichtes in elektrische Energie um. In ihrem Aufbau basiert die Solarzelle auf der pn-Diode.

2.5.1 Das Bändermodell

Gemäß dem Bohr'schen Atommodell umkreisen die Elektronen den Atomkern auf Kreisbahnen mit festgelegtem Radius. Der Radius einer Bahn entspricht dem Energiezustand des umkreisenden Elektrons. Da die Energiezustände der Elektronen diskret (quantisiert) sind, sind auch die Radien der Bahnen diskret. Diese Bahnen bilden die Elektronenschalen. Die Elektronenschalen werden von innen nach außen besetzt, so dass zu meist die einzige nicht

vollständig besetzte Schale die Äußerste ist. Die äußerste besetzte Schale, Valenzschale genannt, bestimmt die chemischen Eigenschaften der Atome.

Das Bändermodell entsteht in der Vorstellung wenn man viele Atome zu einem idealen Kristallgitter vereint. Durch die Annäherung der Atome wird die Anzahl der möglichen Energiezustände der Elektronen durch elektrostatische Wechselwirkung erhöht. Entlang einer beliebigen Richtung x des Kristalls verschmieren die möglichen Energiezustände nun zu Energiebändern. Ein Elektron kann nur einen Zustand haben der innerhalb der Bänder liegt. Die Energiebänder werden durch die Größen Fermi-Niveau W_F , Maximum des Valenzbandes W_V und Minimum des Leitungsbandes W_L charakterisiert.

Durch Energieeinwirkung werden im Halbleiter Elektronen auf ein höheres Energieniveau gehoben, vom Valenzband ins Leitungsband. Wenn ein Elektron in das Leitungsband gehoben wird, verbleibt im Valenzband eine Lücke, das so genannte Defektelektron bzw. Loch. Dieser Vorgang wird auch Erzeugung eines Elektron-Loch Paares genannt, denn das Elektron im Leitungsband stellt nun einen freien Ladungsträger dar und das Loch im Valenzband verhält sich auch wie ein freier positiver Ladungsträger.

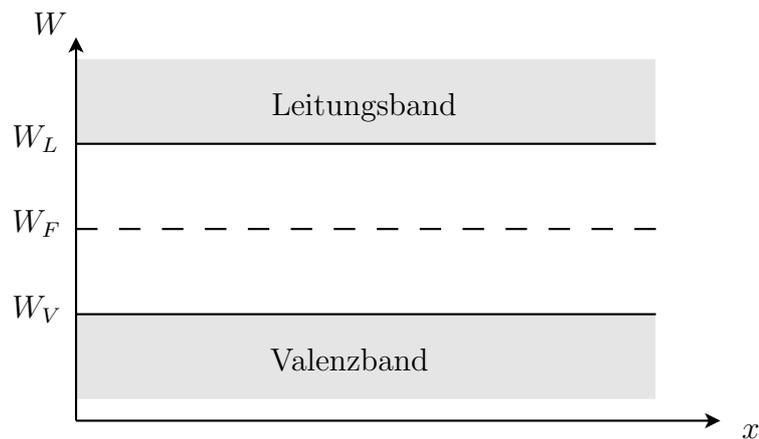


Abbildung 18: Das Bändermodell

2.5.2 Der pn-Übergang

Werden ein p-dotierter und ein n-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht bzw. werden in einem Halbleiter benachbarte Bereiche p- bzw. n-dotiert entsteht ein pn-Übergang.

Bei einem Halbleiter bedeutet n-dotiert, dass in den reinen Halbleiter Fremdatome eingebracht werden, welche ein zusätzliches Elektron besitzen. Wird in Silizium, welches vierwertig ist - d.h. es werden vier Elektronen zur Herstellung der Gitterbindung benötigt - ein Atom mit fünf freien Elektronen eingebracht, bleibt ein freies Elektron über. Dieses lässt sich leicht durch Energiezufuhr vom Atomgitter lösen und zur Stromleitung verwenden.

Analog dazu werden in p-dotierte Halbleiter dreiwertige Atome eingebracht. Das fehlende vierte, für die Gitterbindung notwendige, Elektron wird von benachbarten Atomen angezogen. Das nun entstandene Elektronenloch oder Defektelektron verhält sich wie ein freier positiver Ladungsträger.

An der Kontaktstelle des p- und n-Halbleiters kommen freie positive und negative Ladungsträger, genauer freie Elektronen und Defektelektronen, in Kontakt und rekombinieren. Rekombination bedeutet, dass ein freies Elektron ein Elektronenloch ausfüllt und sich damit die beiden freien Ladungsträger auslöschen. Es verbleiben die an das Gitter gebundenen Atomrümpfe als ortsfeste Ladungsträger. Es entsteht eine Raumladungszone. Das von den ortsfesten Ladungen ausgehende elektrische Feld verhindert, dass weitere freie Ladungsträger in die Raumladungszone eintreten. Auf diesem Effekt beruht die Sperrwirkung von Dioden.

Wird nun eine Spannung von außen angelegt, kann das elektrische Feld der Raumladungszone verstärkt oder geschwächt werden. Aus diesem Grund kommt es zur so genannten Ventilwirkung von Dioden, leitend in einer Richtung und sperrend in der entgegengesetzten.

2.5.3 Energieerzeugung

Wenn nun durch Energieeinwirkung (z.B. Lichteinstrahlung) im Halbleiter im Bereich der Raumladungszone ein Elektron-Loch Paar entsteht, werden die beiden Ladungsträger, das Elektron und das Loch (bzw. Defektelektron), durch das in der Raumladungszone vorliegende elektrische Feld getrennt. Die Stärke des elektrischen Feldes in der Raumladungszone bestimmt die an den Kontakten der Solarzelle abgreifbare Spannung. Die Stromstärke die die Solarzelle liefern kann, wird durch die Intensität des Lichtes und der Fläche der Solarzelle bestimmt.

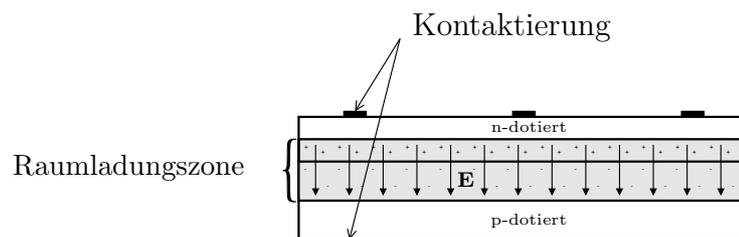


Abbildung 19: Die Solarzelle

An der Oberseite der Solarzelle ist die Kontaktierung kammförmig (siehe Abbildung 9) ausgeführt um möglichst wenig Fläche durch die Metallbahnen zu beschatten. Die Rückseite kann durchgehend metallisiert werden.

2.5.4 Ersatzschaltbild

Das Ersatzschaltbild der Solarzelle besteht aus einer Stromquelle die den Photostrom liefert und einer parallelen Diode. Dazu ist noch ein Parallelwiderstand geschaltet. In Serie dazu gibt es noch einen Serienwiderstand. Der Parallelwiderstand modelliert Verlustströme die den pn-Übergang überbrücken. Der Serienwiderstand modelliert den Widerstand des Halbleitermaterials sowie der Kontaktierung.

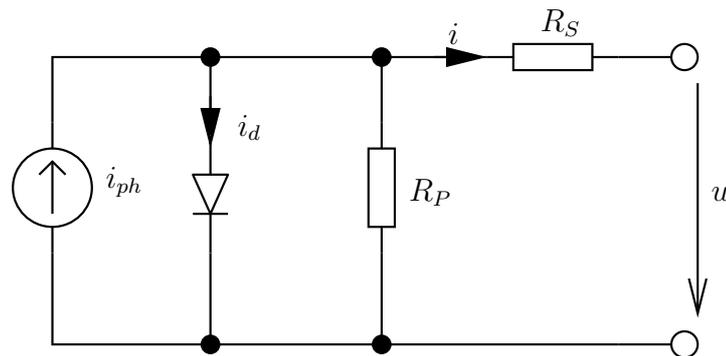


Abbildung 20: Ersatzschaltbild

2.6 Beleuchtung

Zur Entwicklung des Mendocino-Motors war es notwendig eine künstliche Beleuchtung zu installieren, um unabhängig vom Sonnenlicht zu sein und um einen konstanten Energieeintrag des Systems zu gewährleisten.

Silizium-Solarzellen sind für Sonnenbestrahlung konzipiert und eignen sich daher gut für diese Anwendung, weil der nutzbare Spektralanteil des Sonnenlichtes relativ hoch ist.

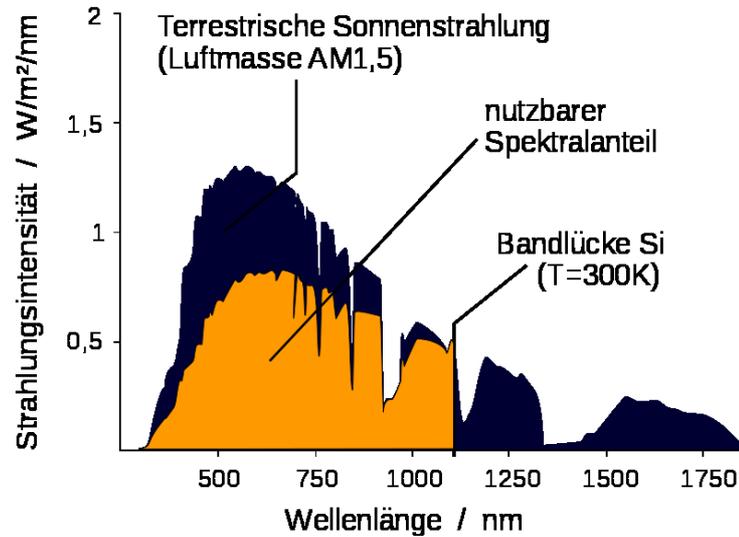


Abbildung 21: nutzbares Spektrum einer Si-Solarzelle aus [HO]

In Abbildung 21 erkennt man deutlich, dass Si-PV-Zellen auch Strahlung nützen, die außerhalb des sichtbaren Bereiches des Lichtes (420 bis 790 nm) liegt. Glühlampen haben über den relevanten Wellenlängenbereich, insbesondere im infraroten Bereich, eine sonnenähnliche Strahlungsflussdichte und weisen somit gute Eigenschaften zur Erzeugung von Solarstrom auf. Leuchtstoff-Lampen haben hingegen durch ihr Linienspektrum eine geringere gesamte Strahlungsleistung und zeigen sich für den effizienten Betrieb von PV-Zellen als ungeeignet. Für den Aufbau der Prototypen bzw. für sämtliche Messungen wurden daher Halogenspiegellampen als Beleuchtung verwendet. Im Folgenden wurden nun verschiedene Halogenspiegellampen hinsichtlich Beleuchtungsstärke und Lichtausbeute näher untersucht. Die Tabelle 2 zeigt vier Standard-Halogenlampentypen der Fa. Osram mit unterschiedlichen Kenndaten. Um die rechteckförmigen PV-Zellen (100x50mm), die für den ersten Mendocino-Motor Aufbau verwendet wurden, ausreichend zu beleuchten, wird die Fläche des Lichtkegels A mit 123cm^2 gewählt. Über den Raumwinkel Ω kann mit dem Abstrahlwinkel α der Lampe der Abstand r zur beleuchteten Fläche berechnet werden.

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos(\frac{\alpha}{2}))$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\Omega}}$$

Lampenleistung P	in W	20	50	50	50
Spannung U	in V	12	12	12	240
Abstrahlwinkel α	in °	36	36	10	36
Lichtstärke I_v	in cd	510	1500	10000	900
Farbtemperatur T	in K	3000	3000	3000	2900
Abstand r	in cm	20	20	72	20
beleuchtete Fläche A	in cm ²	123	123	124	123
Beleuchtungsstärke E_v	in lx	12750	37500	19290	22500
Lichtausbeute η	in lm/W	7,84	9,23	4,78	5,23

Tabelle 2: Halogenlampenvergleich

Die Lichtstärke I_v wurde aus dem Datenblatt des Lampenherstellers entnommen und die Beleuchtungsstärke ergibt sich aus

$$E_v = \frac{I_v}{r^2}.$$

Die Lichtausbeute ist das Verhältnis zwischen dem Lichtstrom Φ_v und der aufgenommenen Lampenleistung, wobei

$$\Phi_v = \int I_v d\Omega = \int E_v dA$$

den gesamten Strahlungsfluss beinhaltet und somit ein Maß für die Strahlungsleistung ist. Im Vergleich der aufgelisteten Halogenspiegellampen in der Tabelle hat das Leuchtmittel mit 50W/12V und einem Abstrahlwinkel von 36° den besten Wirkungsgrad. Ein kleiner Abstrahlwinkel weist offenbar durch die stärkere Lichtbündelung höhere Verluste auf. 240V Halogenlampen in dieser Leistungsklasse haben konstruktionsbedingt generell einen kleineren Wirkungsgrad.

3 Beschreibung des ersten Prototyps

Der erste Prototyp dient zur Vertiefung des Verständnisses und zur grundsätzlichen Demonstration der verwendeten Prinzipien. Des weiteren wurden mit dem ersten Prototypen Messungen sowie Versuche durchgeführt, die entscheidend zur Verfeinerung der Modellierung beitrugen. Daneben wurden neuartige Designmerkmale erprobt, wie z.B. die Wirbelstromdämpfung.

3.1 Designmerkmale

3.1.1 Rotor

Der Rotor besitzt eine quadratische Grundfläche, demnach können zwei Wicklungen am Rotor angebracht werden. Der Rotor besitzt eine gestreckte Form und die Rotation erfolgt um die kleinste Trägheitshauptachse. Die Rotation um die kleinste Trägheitshauptachse ist bei Anwesenheit von Dämpfung prinzipiell stabil [1]. Die Rotationsbewegung wird durch die Reibung mit der umgebenden Luft sowie der Reibung der Kugelschreiber-Kugel auf dem Glas (Bohrreibung) gedämpft.

3.1.2 Wirbelstromdämpfung

Die magnetische Lagerung bringt vernachlässigbar wenig Dämpfung ins System ein. Deswegen sind Lagerschwingungen nur sehr schwach gedämpft.

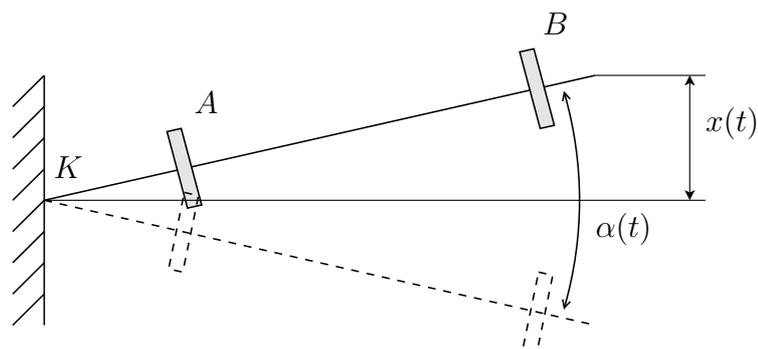


Abbildung 22: Skizze der Rotorschwingung

In Abbildung 22 ist die Form der Rotorschwingung dargestellt. Am Kontaktpunkt K wird die Kugelschreiberspitze mit großer Kraft gegen die Glasscheibe gedrückt. Große Schwingungen bewirken auch eine Translation des Auflagepunktes. Für kleinere Störungen wirkt dieser Kontaktpunkt wie ein Gelenk. Die Schwingung des Rotors entspricht dann der eines

dreidimensionalen Pendels. Durch Störungen wie z.B. eine Unwucht des Rotors können solche Schwingungen angeregt werden. Somit bewegen sich die Wellenmagneten in einem Orbit um die theoretische Rotationsachse. Die nichtlineare Charakteristik der Lagerung verleiht der Schwingung zusätzlich noch die Neigung zu ausgezeichneten Richtungen.

Der Magnet B in Abbildung 22 erfährt die größere Verschiebung der beiden Magnete da dieser weiter vom Kontaktpunkt entfernt ist. Die Idee der Wirbelstromdämpfung ist es, eine elektrisch leitfähige und nichtmagnetisierbare Metallplatte in die nähere Umgebung des Magneten B zu bringen.

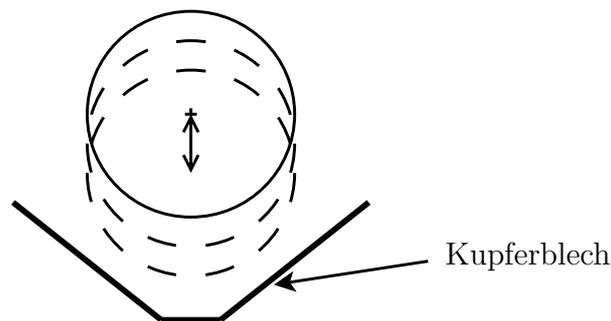


Abbildung 23: Prinzipskizze Wirbelstromdämpfung

Schwingt nun der Magnet quer zur Rotationsachse verändert sich der Abstand zur Metallplatte periodisch. Die Metallplatte wird nun von einem zeitlich änderlichen Magnetfeld durchsetzt, da die magnetische Feldstärke des Magneten mit zunehmender Entfernung kleiner wird. Die zeitliche Änderung des Magnetfeldes in der Metallplatte ruft nun im Metall Wirbelströme hervor die ihrer Ursache gemäß der Lenzschen Regel entgegen wirken.

Wenn keine Lagerschwingung auftritt und der Rotor rotiert, tritt auf Grund des rotations-symmetrischen Feldes der Magnetscheiben keine Änderung des Magnetfeldes in der Metallplatte auf. Die Drehbewegung des Mendocino Motors wird von der Wirbelstromdämpfung nicht beeinflusst.

3.1.3 Zwangskommutierung

Die Kommutierung beim Mendocino Motor wird durch die antiparallele Verschaltung der Solarzellen sichergestellt. Es wurde versucht, die Kommutierung durch eine zusätzliche Einrichtung zu erreichen, um die beiden Solarzellen parallel schalten zu können um damit den Summenstrom der beiden nutzen zu können. Die Kommutierung sollte durch Schalten von Reed-Kontakten ermöglicht werden. Diese Art der Kommutierung ist in Kapitel 4 näher beschrieben.

Eine Kommutierung mittels schaltender Elektronik wurde nicht getestet, da das geringe verfügbare Spannungsniveau (ca. 0.45 V pro Solarzelle) den Betrieb bzw. die Auslegung elektronischer Schaltungen sehr anspruchsvoll macht.

3.2 Auslegung

3.2.1 Geometrie

Ausgehend von den Maßen der Solarzelle wurden die Abmessungen des Rotors bestimmt. Da der Strom einer Solarzelle von deren Fläche abhängt, wurde aus dem Lieferprogramm des Herstellers die größte rechteckige Solarzelle mit den Abmessungen $50 \times 100 \text{ mm}$ gewählt. Flächenmäßig wären quadratische oder kreisförmige Zellen noch größer gewesen, um aber einen gestreckten Rotor realisieren zu können, kamen diese nicht in Frage.

3.2.2 Lagermagnet

Mittels der in Kapitel 2.1.2 ermittelten Kennlinie des permanentmagnetischen Lagers und einer Schätzung für das zu erwartende Rotorgewicht wurde die gewählte Magnetgröße überprüft.

3.2.3 Wicklungsauslegung

Für den ersten Prototyp ist Einfachheit halber die Wicklung ohne Einfluss der induzierten Spannung und der Induktivität grob dimensioniert worden. Diese Betrachtung gilt jedoch für den Stillstand bzw. für das Anfahren des Rotors. Um eine möglichst gute Ausnutzung der PV-Zelle zu erreichen, wird diese am Besten im MPP (Maximum Power Point) der Leistungskennlinie betrieben und als Wicklungswiderstand ergibt sich schlichtweg der Anpassungswiderstand der Solarzelle. Der MPP der PV-Zelle "Type 1", die mit einer 50 W Niedervolt-Halogen spiegellampe mit einem Abstrahlwinkel von 36° und einem Abstand von ca. 300 mm beleuchtet wurde, beträgt ca. 200 mW bei einer Spannung von 310 mV und einem Strom von 655 mA. Für einen definierten gesamten Kupferquerschnitt von 6 mm^2 pro Strang und der mittleren Wicklungslänge von 240 mm pro Windung ergibt sich für maximale Durchflutung die Wicklungszahl und der Drahtdurchmesser:

$$R_W = N \frac{l_m}{\kappa_{Cu} A_{Draht}} = N^2 \frac{l_m}{\kappa_{Cu} A_{Cu}} \stackrel{!}{=} \frac{U_{PV}}{I_{PV}}$$

$$\Rightarrow N = \sqrt{\frac{U_{PV} \kappa_{Cu} A_{Cu}}{I_{Cu} l_m}} = 27 \text{ Windungen}$$

$$d_{Draht} = 0.5 \text{ mm}$$

3.2.4 Feldmagnet

Beim ersten Prototyp wurde unter dem Rotor eine Stahlplatte montiert, auf der man verschiedene Magnete anordnen und somit unzählige Magnetfeld-Verläufe realisieren kann. Es

ist auch möglich statt der gewöhnlichen 1-poligen Ausführung mit einem Blockmagnet oder Magnetenpaket eine 2-polige Felderregung mit zwei Magnetblöcken zu verwirklichen, wobei die Montage-Stahlplatte hier als Eisenrückschluss fungiert. Im letzteren Fall konzentriert sich das B-Feld im unteren Bereich des Rotors und wirkt sich positiv auf die Drehmomentenbildung aus. Der ideale Kommutierungspunkt respektive der Beleuchtungswinkel ist stark von der Magnetanordnung abhängig.

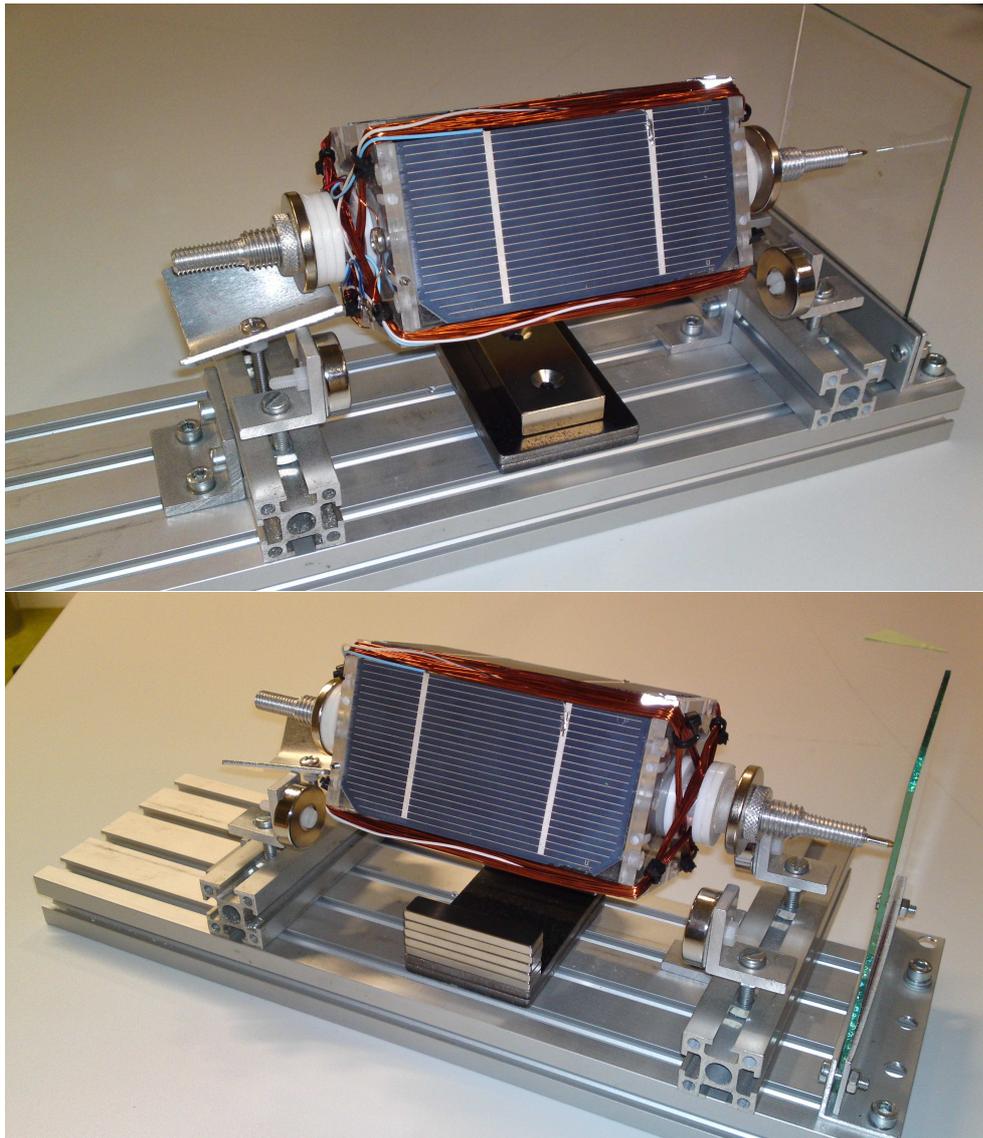


Abbildung 24: Erster Prototyp mit auswechselbaren Feldmagneten

3.3 Erkenntnisse

3.3.1 Wirbelstromdämpfung

Die Wirbelstromdämpfung bringt eine schwache Dämpfung in das System ein und ist für gut gewuchtete Rotoren in einem begrenzten Drehzahlbereich durchaus ausreichend. Im Testlauf ist die Dämpfung allerdings zu schwach um Schwingungen, die in der Nähe einer kritischen Drehzahl angeregt werden, wirkungsvoll zu dämpfen.

3.3.2 Zwangskommutierung

Das ferromagnetische Material der Reed-Kontakte verursacht ein Rastmoment. Dieses Rastmoment ist so groß, dass der Mendocino Motor dieses aus dem Stillstand nicht überwinden konnte. Eine Anwendung der Zwangskommutierung mit Reed-Kontakten wurde daher nicht weiterverfolgt. Die Zwangskommutierung ist in Kapitel 4 näher beschrieben.

4 Rotor mit Reed-Kontakt-Kommutierung

4.1 Wirkungsweise

Um die Ausnutzung der PV-Zellen bei gleichmäßiger Beleuchtung zu Erhöhen, wurden alle 4 Zellen parallel geschaltet und die Wicklungen mit Reed-Kontakten nach Schaltung Abbildung 25 angeschlossen. Reed-Kontakte oder auch Reed-Schalter genannt, sind in einem Glaskolben eingeschmolzene Kontaktzungen aus ferromagnetischem Material, die bei Anwesenheit einer bestimmten magnetischen Feldstärke schließen. Diese magneto-sensitiven Sensoren arbeiten rein passiv und benötigen somit keinen Ruhestrom. Für den Versuchsaufbau wurden spezielle Reed-Schalter mit Wechselkontakten ausgewählt. Dadurch können mit nur 4 Reeds zwei Wicklungen getrennt polumschaltbar gemacht werden. Die Lage der Beleuchtung, die beim konventionellen Mendocino-Aufbau entscheidend war, spielt somit keine Rolle mehr. Der große Vorteil dieses Konzepts liegt nun darin, dass sämtliches Licht in der Umgebung zur Drehmomentenbildung beiträgt und auch unter Umständen mit Spiegeln an der Unterseite des Rotors wirken kann.

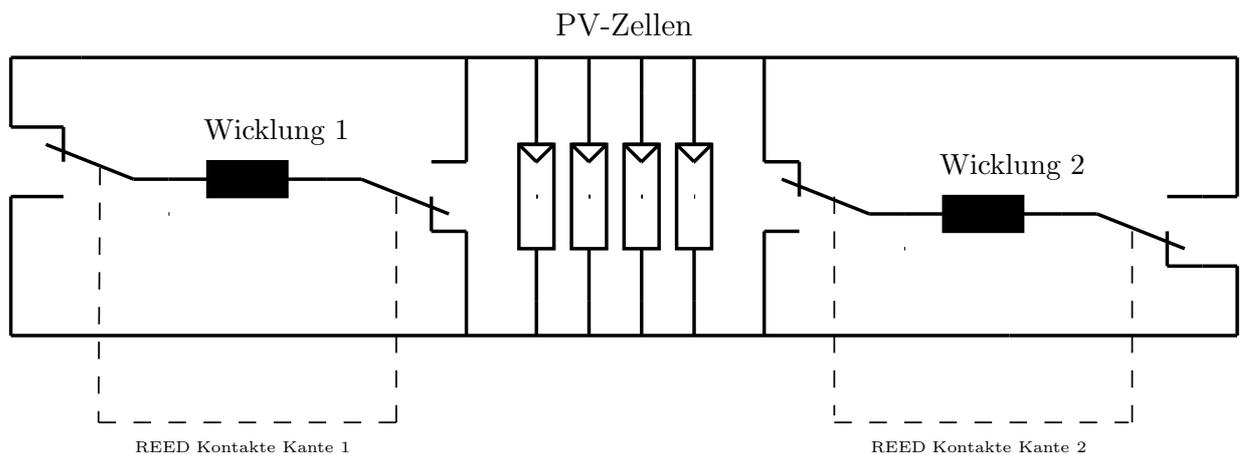


Abbildung 25: Schaltung mit REED-Kontakten

Die Reed-Kontakte sind an den Kanten des Rotors montiert und sind so ausgerichtet, dass sie jeweils dann aktiv werden, wenn sie in die Nähe des Feldmagneten kommen. Optimal justierte Reeds schalten abwechselnd für je eine halbe Periode und übernehmen somit die Kommutierung der Rotorwicklungen.

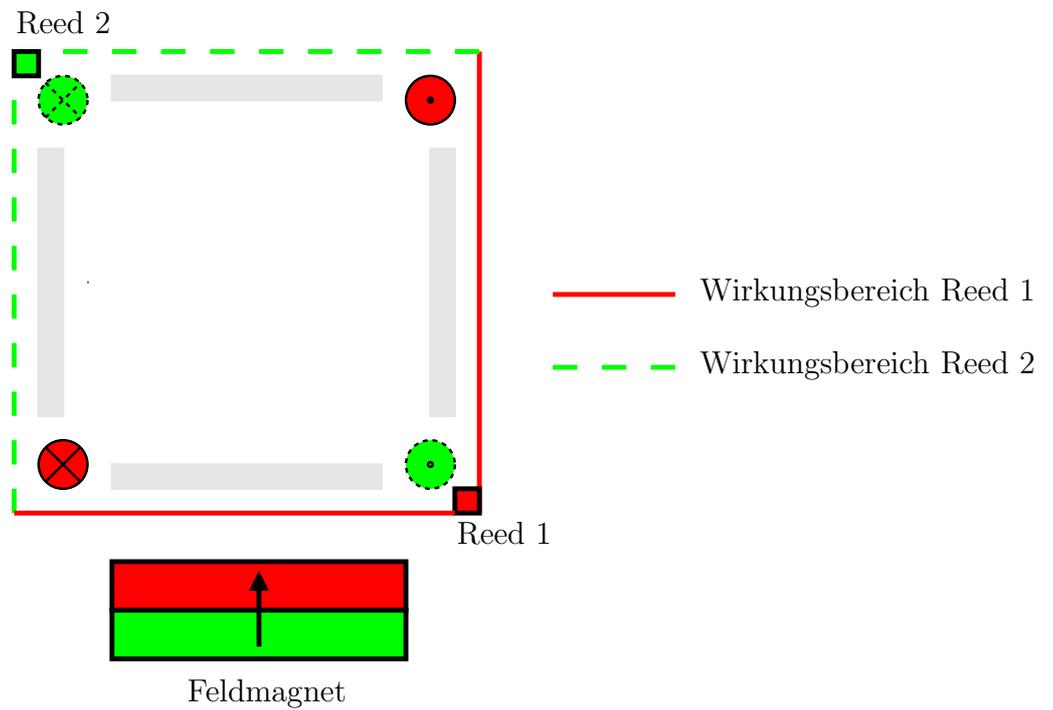


Abbildung 26: Wirkungsweise REED

Dieses Konzept wurde am bestehenden Aufbau adaptiert (Abbildung 27)

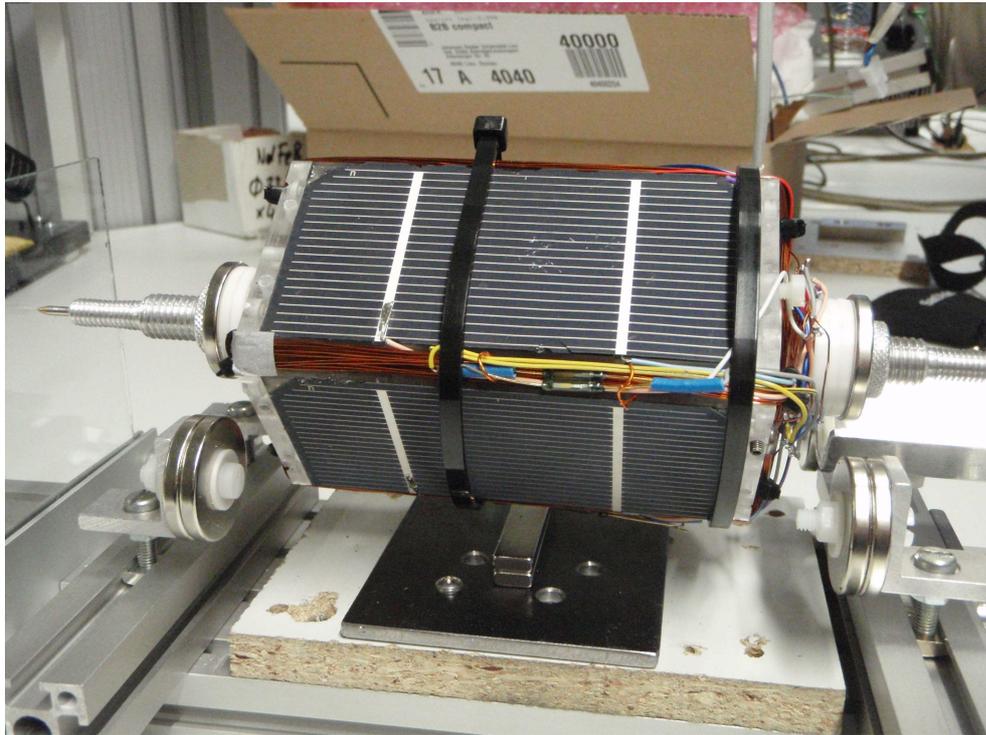


Abbildung 27: Aufbau mit Reed-Kontakten

4.2 Performance

Die ferromagnetischen Materialien der Reed-Kontakte erzeugen mit den Statormagneten Reluktanzkräfte, die sich als Rastmomente bemerkbar machen. Diese bedeutende Einschränkung lässt den Rotor nicht selbstständig wegdrehen, weil das Antriebsmoment auch mit starker Beleuchtung die attrahierenden Kräfte der Reed-Kontakte nicht überwinden kann. Treibt man jedoch den Rotor manuell kurz an, so beschleunigt dieser wie erwartet. Die zuvor genannten Maxwellkräfte erzeugen im Betrieb zusätzliche Rotorschwingungen, die durch die Stabilitätsgrenze der Rotorlage die maximal erreichbare Drehzahl herabsetzen. Somit konnten kaum höhere Drehzahlen als beim konventionellen Mendocino-Aufbau unter Berücksichtigung geringer Rotorschwingungen erzielt werden. Dieses Konzept wurde aus gegebenen Gründen nicht mehr weiter verfolgt.

5 Beschreibung des zweiten Prototyps

Mit dem zweite Prototyp wurden weitere Messungen durchgeführt. Zum Abschluss der Arbeiten am Projektseminar wurde daraus der Demonstrator aufgebaut.

5.1 Designmerkmale

5.1.1 Rotor

Der zweite Prototyp besitzt einen Rotor mit sechseckiger Grundfläche. Darüberhinaus ist der Rotor kürzer. Der Grund für die Wahl eines eher gedrunenen Rotors liegt in der Rotordynamik. Nach [1] ist die Rotation um die Trägheitshauptachse mit der größten Massenträgheit inhärent stabil. Dies erschien im Hinblick auf die äußerst geringe Dämpfung der Magnetlager wichtig. Daneben konnte mit der sechseckigen Form des Rotors Platz für einen dritten Strang geschaffen werden. Im Hinblick auf die geringen erreichbaren Drehmomente erscheint es sinnvoll die Zahl der Stränge des Motors zu erhöhen. Dadurch soll erreicht werden, dass der Motor auf jeder beliebigen Rotorstellung anläuft und es keine Totpunkte gibt.

5.1.2 Magnetanordnung

Für diesen Prototyp wurden keine eigenen Feldmagnete verwendet. Das Magnetfeld der Lagermagnete reicht für die Drehmomentbildung vollkommen aus.

5.1.3 Wirbelstromdämpfung

Durch die geringe Länge des Rotors wirkt die ohnehin schwache Wirbelstromdämpfung weniger stark als beim vierkantigen Rotor. Der zurückgelegte Weg des hinteren Lagermagneten und damit die Änderung des Magnetfeldes sind wegen des kürzeren Rotors kleiner. Die Wirbelstromdämpfung wurde daher bei diesem Prototyp nicht realisiert.

5.1.4 Drehzahlmessung

Bei diesem Prototyp wurde eine Drehzahlmessung implementiert. Diese ist im Kapitel 7 näher beschrieben.

5.2 Auslegung

5.2.1 Wicklungsauslegung

Nachfolgende Überlegungen und Berechnungen beziehen sich auf den zweiten Prototyp mit sechseckigem Querschnitt und 3 Wicklungssträngen.

Ziel dieser Wicklungsauslegung ist es, eine möglichst hohe Drehzahl zu erreichen und das selbständige Anfahren zu garantieren. Ist das Anfahrmoment zu gering, so hat der Motor bei ungünstigen Winkelstellungen des Rotors gegebenenfalls Probleme eine verbleibende statische Unwucht zu überwinden. Das Abtriebsmoment, das im Wesentlichen das Luftwiderstandsmoment des Rotors darstellt, ist unter dem Kapitel 6.3 ermittelt und steigt mit der Drehzahl. Die maximale Drehzahl ist erreicht, wenn das Antriebsmoment gleich dem Luftwiderstandsmoment ist. Die Wicklungsauslegung erfolgt daher über die Drehmomentbetrachtung des Mendocino-Motors.

Von der Gleichstrommaschine sind folgende Grundformeln aus [6] bekannt:

$$M = k \Phi I_A$$

$$U_i = k \Phi \omega$$

wobei k die Motorkonstante ist. Die Momentenformel lässt sich durch Elimination von k und Φ unter Kenntnis von U_i vereinfachen:

$$M = \frac{U_i}{\omega} I_A$$

Der Ankerstrom I_A ist in der vereinfachten Maschengleichung, bestehend aus der nicht-linearen Spannungsquelle der PV-Zelle, dem Wicklungswiderstand und der induzierten Spannung in Abhängigkeit von der Drehzahl n und der Windungszahl N , implizit definiert:

$$U_{PV}(I_A) = R_W(N) I_A + U_i(n, N).$$

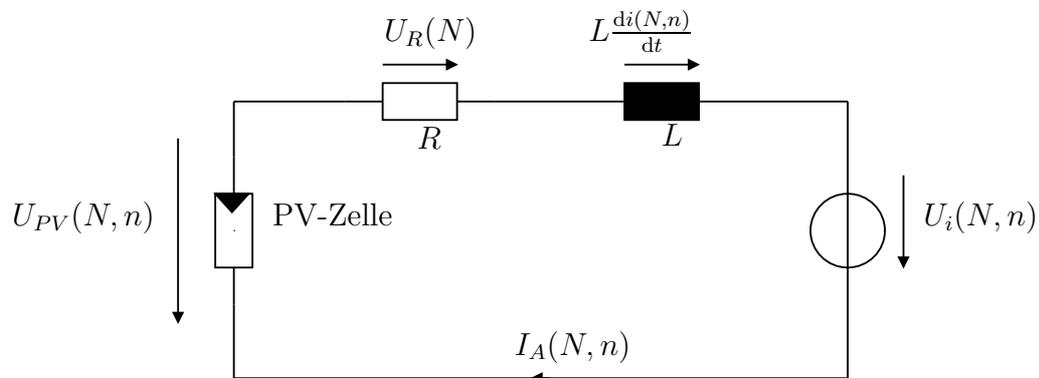


Abbildung 28: ESB-Wicklungsauslegung

Der induktive Spannungsabfall

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

ist wegen des eisenlosen Aufbaues und der relativ langsamen Stromänderungen in der Maschine vernachlässigbar klein. Der ohmsche Wicklungswiderstand $R_W(N)$ ist wegen der Definition der maximalen Kupferquerschnittsfläche nur mehr von der Windungszahl abhängig.

$$R_W(N) = \frac{\rho l_m}{A_{Cu} k_{Cu}} N^2$$

Aus den Messreihen der PV-Zelle mit definierter Beleuchtung und der induzierten Spannung kann $I_A(n, N)$ über die gewählten Drehzahl- und Windungszahlbereiche durch ein iteratives Annäherungsverfahren ermittelt werden. Somit ergibt sich das Drehmomentenkennlinienfeld zu

$$M(n, N) = \frac{30}{\pi n} U_i(n, N) I_A(n, N)$$

für eine Wicklung.

Es wurde hier stillschweigend auf die Drehwinkelabhängigkeit der verschiedenen Größen verzichtet und stets Scheitelwerte verwendet. Diese einfache Betrachtung ist sinnvoll, da bei genauerer Untersuchung lediglich ein Skalierungsfaktor den Wert des über eine Periode gemittelten Momentes \bar{M} beeinflusst. Aus den winkelabhängigen Messungen der PV-Zelle und der Wicklung wurden folgende Näherungsformeln ermittelt:

$$i_A(\varphi) = I_A \sin^2(\varphi)$$

$$u_i(\varphi) = U_i \left| \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin(4(\varphi - \delta)) \right) \right|.$$

δ stellt hier die Phase zwischen $u_{PV}(\varphi)$ und $u_i(\varphi)$ dar und ist abhängig von der Lage der Beleuchtung bzw. dem Erregermagnetfeld. Für die gewählten Näherungen ist das effektive Drehmoment gerade

$$\bar{M}(n, N, \delta = \frac{\pi}{8}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M(n, N, \varphi, \delta) d\varphi = \frac{1}{4} M(n, N)$$

und für $\delta = \frac{\pi}{8}$ maximal.

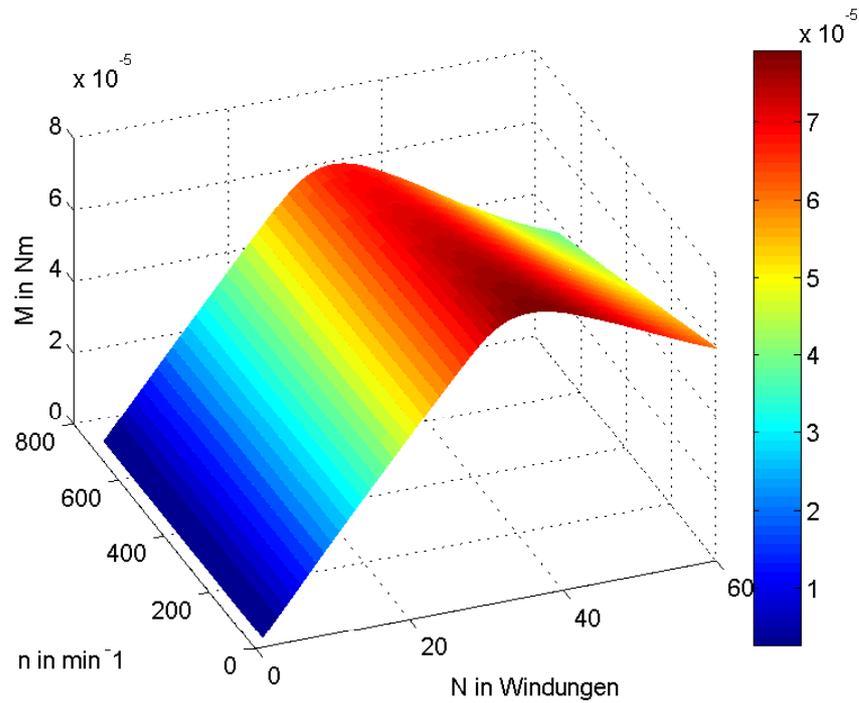


Abbildung 29: Drehmomentkennlinienfeld für einen Wicklungsstrang gemittelt über φ

In Abbildung 29 zeigt sich deutlich ein Bereich mit optimalen Windungszahlen von 30 bis 40 Windungen pro Wicklungsstrang. Stellt man das maximal erreichbare Moment von 3 Wicklungssträngen mit dem Luftwiderstandsmoment, siehe Kapitel 6.3, über die Drehzahl dar, siehe Abbildung 30, so zeigt der Schnittpunkt beider Kennlinien den Arbeitspunkt bei einer maximalen Drehzahl von $n = 392 \text{min}^{-1}$. Das Ergebnis bezieht sich auf eine Beleuchtung mit einer Halogenspiegellampe $20\text{W} / 36^\circ$ bei einem Abstand von 20cm zur Rotoroberfläche.

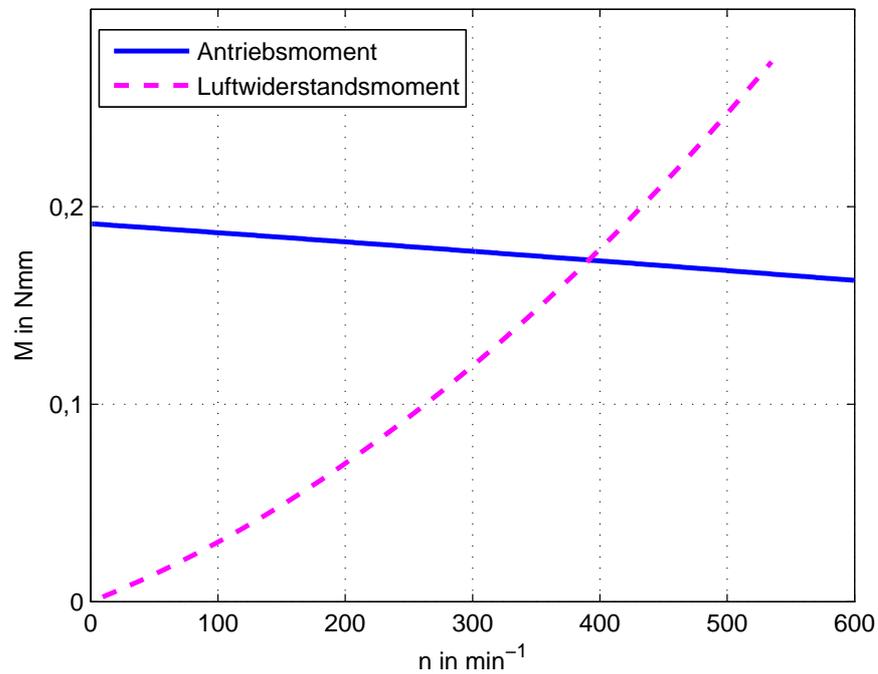


Abbildung 30: Bestimmung des Arbeitspunktes

Für diesen AP gelten folgende Designparameter:

$$N = 32 \text{ Windungen}$$

$$d_{\text{Draht}} = 0.5 \text{ mm.}$$

5.3 Demonstrator

Der Demonstrator wurde mit dem Sechskant-Rotor aufgebaut. Dieser nutzt das Magnetfeld der Lagermagnete zur Drehmomentbildung. Weiters wurde eine Drehzahlmessung realisiert. Die Auswertelektronik für die Drehzahlmessung wird ebenfalls über Solarzellen versorgt. Dadurch kommt der Demonstrator ohne externe elektrische Energieversorgung aus.

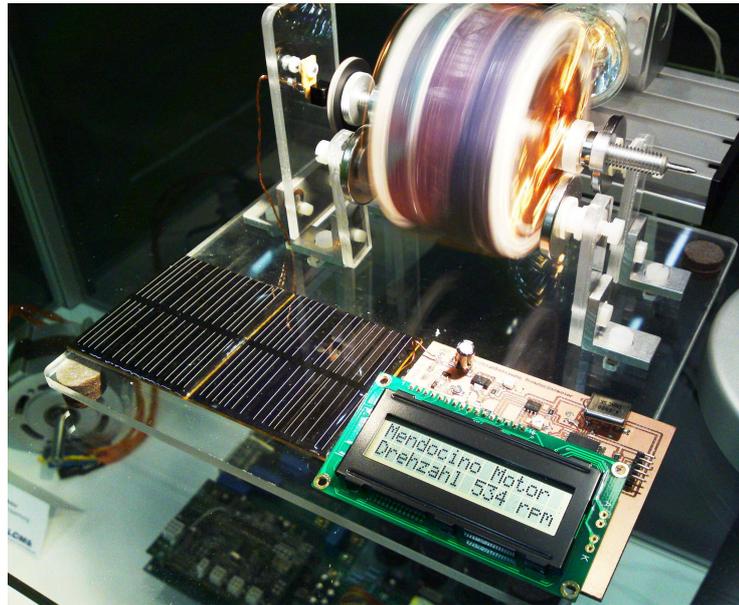


Abbildung 31: Demonstrator

In Abbildung 31 sind deutlich die Komponenten des Demonstrators zu sehen. Dieser beinhaltet den Rotor mit Inkrementalscheibe, die Lagerung mit der Lichtschranke, die Auswerteelektronik samt LCD-Modul und die dazu gehörigen Solarzellen. Dieser Aufbau hat zusätzlich eine zweite Beleuchtung, die sich nach voreingestellten Zeitintervallen zu- und wegschaltet. Diese Lampe ist viel leistungsstärker als die Grundbeleuchtung und bewirkt durch die um 180° (elektrischer Winkel) versetzte Anordnung eine Drehrichtungsumkehr. Infolge der sehr starken Bestrahlung kann in einer Drehrichtung die berechnete Drehzahl im Arbeitspunkt überschritten werden und maximal ca. 600min^{-1} erreichen.

6 Messungen

Hier werden alle mit den Prototypen durchgeführten Messungen beschrieben. Die Drehzahlmessung, welche für den Demonstrator realisiert wurde ist in Kapitel 7 beschrieben.

6.1 Induzierte Spannung

Der Versuch dient zur Ermittlung von Höhe und Form der induzierten Spannung bei unterschiedlichen Feldmagnet-Konfigurationen. Diese Messung wurde nur beim Mendocinomotor-6-Kant mit Lagermagneten als alleinige Felderzeugung durchgeführt.

6.1.1 Messaufbau

Für die Messung der induzierten Spannung sind Schleifkontakte notwendig. Als ersten Pol wurde ein eigenst konstruierter Schleifring angebracht, als zweiter Pol dient die Aluminiumwelle des Rotors. Die Strangwicklung mit $N = 10$ Windungen wurde von den Solarzellen getrennt und mit dem Schleifring bzw. der Welle verbunden. Somit kann die induzierte Spannung vom drehenden Rotor aufgenommen werden. Um eine gute Auswertbarkeit der gemessenen Spannung zu erhalten wurde der Rotor mit einem Riemen auf eine Drehzahl von ca. 1000min^{-1} gebracht.

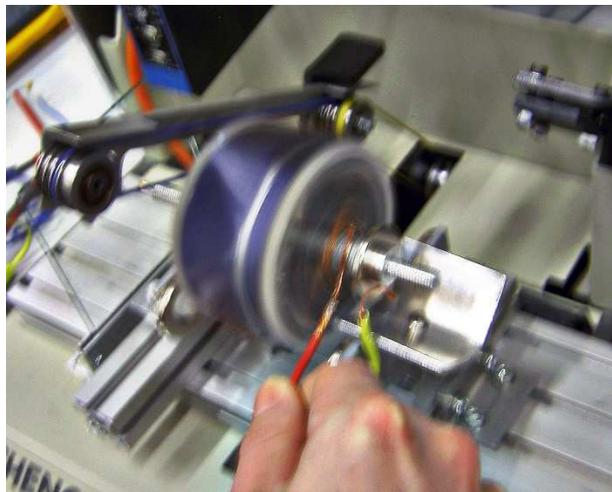


Abbildung 32: Messen der induzierten Spannung

Einfachheitshalber wurden die Schleifkontakte mit feinen Litzendrähte kontaktiert, siehe Abbildung 32.

6.1.2 Messergebnisse

Diese unkomplizierte Messung ist leider mit starken Oberschwingungen und sonstigen Störungen, die durch Kontaktunebenheiten des Schleifringes hervortreten, überlagert. Die Grundschwingungen der einzelnen Messungen sind jedoch gut erkennbar.

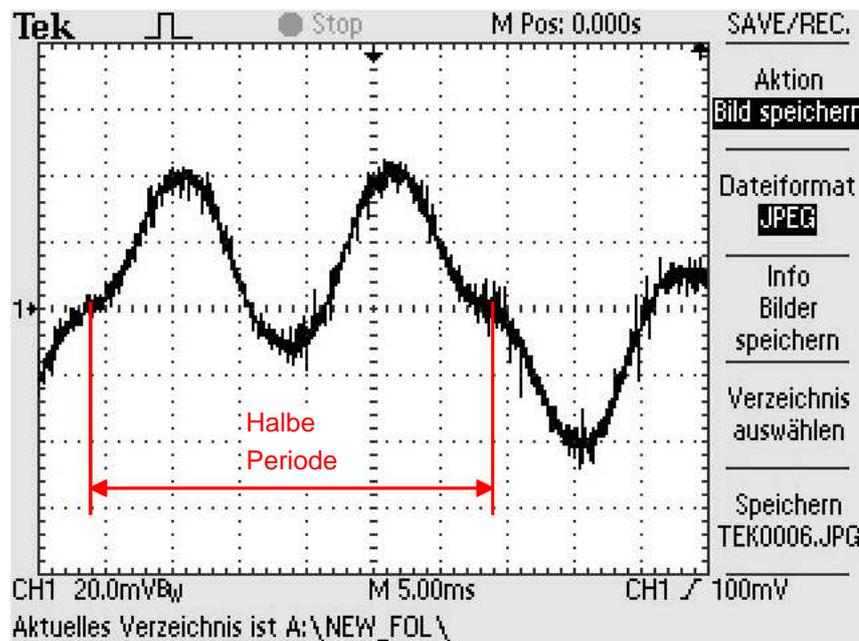


Abbildung 33: Induzierte Spannung mit zusätzlichen Nulldurchgängen

Die Signalform bzw. die Anzahl der Nulldurchgänge einer Periode sind von der Anordnung der Lagermagneten abhängig. Ist der Abstand der Lagermagneten in der Lagerebene relativ groß, so erkennt man in der Abbildung 33 zwei zusätzliche Nulldurchgänge der induzierten Spannung, die auf ein wechselndes Magnetfeld hinweisen. Werden jedoch die Lagermagneten in einem kleinen Abstand angeordnet, so bleibt das Vorzeichen des Feldes innerhalb einer halben Periode gleich (Abbildung 34). Dies wirkt sich günstig auf die Drehmomentbildung des Mendocino Motors aus, ist aber mit dem Nachteil behaftet, dass die Stabilität des Rotors bezogen auf Rotorschwingungen stark sinkt, weil die radiale Lagersteifigkeit in horizontaler Richtung gering ist. Darum wurde im weiteren ein Kompromiss für die Anordnung der Lagermagneten gefunden, wo gerade keine zusätzlichen Nulldurchgänge auftreten und dadurch Vorzeichenwechsel des Antriebsmomentes vermieden werden. Der Abstand der verwendeten Lagermagneten, NdFeB-Ringmagneten $32 \times 12 \times 4$ mm, ist in diesem Fall 45 mm.

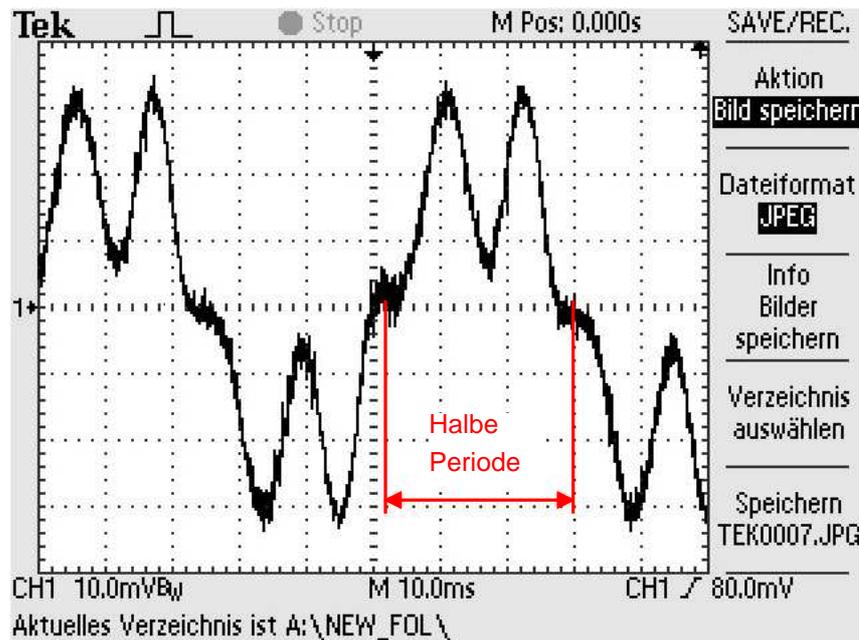


Abbildung 34: Induzierte Spannung ohne zusätzliche Nulldurchgänge

Eine mathematische Beschreibung der induzierten Spannung, die näherungsweise der gemessenen Signalform entspricht, wurde für den Drehwinkel $\varphi = 0.. \pi$ gefunden:

$$u_{ind}(\varphi) = \hat{U}_{ind} \frac{1 + \sin(2\varphi)}{2}$$

Die Amplitude der induzierten Spannung in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Windung ergibt sich nach mehreren Messungen zu:

$$\hat{U}_{ind} = 4 \cdot 10^{-6} V / (n \cdot N)$$

6.2 Leistungsabgabe der Solarzellen

6.2.1 Statisch

Die untersuchten Photovoltaikzellen wurden von der Fa. Hupra GmbH, 12555 Berlin bezogen und sind aus monokristallinem Silizium gefertigt. Diese Zellen stellen im Wesentlichen das ca. 0.3mm dicke Rohmaterial dar.

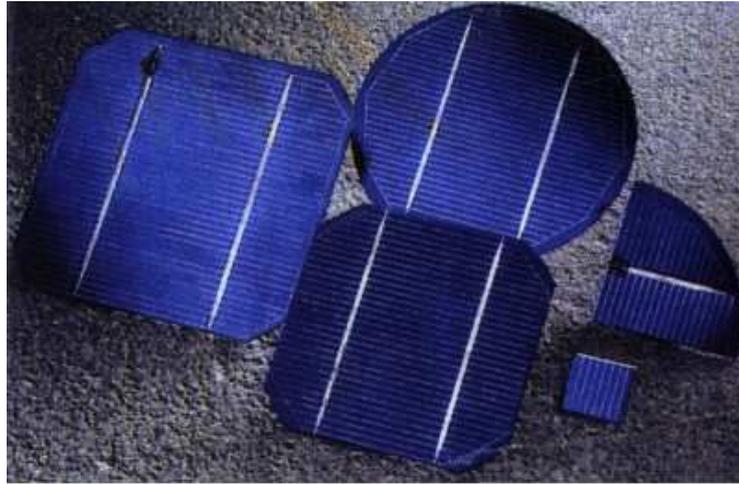


Abbildung 35: Solarzellen Rohmaterial

Die Kontaktierung erfolgt direkt an der Metallisierung der Zellen. Zur Leistungsuntersuchung mit künstlicher Beleuchtung wird die jeweilige PV-Zelle in einem bestimmten Abstand mit einer Niedervolt-Halogen-Reflektorlampe beleuchtet. Die Abbildung 36 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsschaltung.

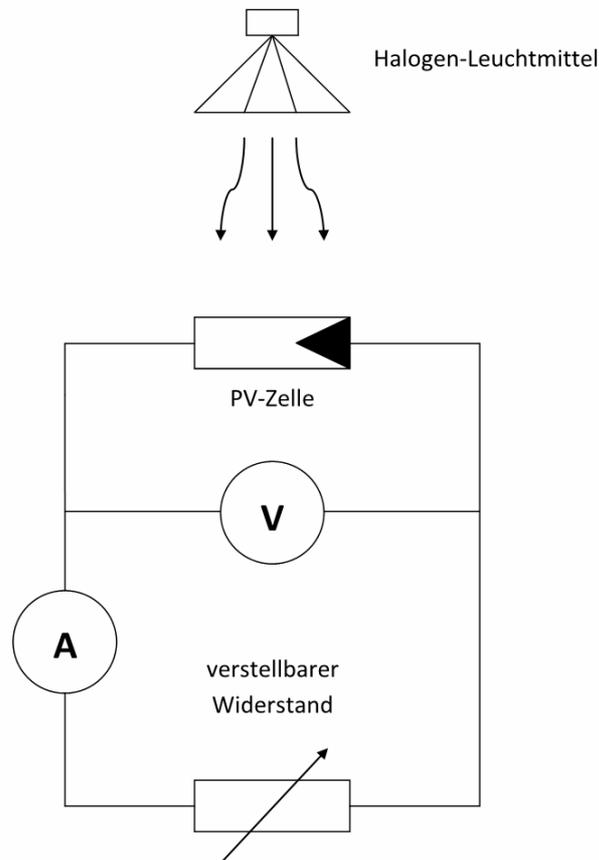


Abbildung 36: Aufbau Leistungsveruch PV-Zellen

Der gemessene Strom ist um den Voltmeterstrom verfälscht. Da der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes gegenüber der Solarzelle sehr hoch ist, wurde dieser Messfehler vernachlässigt. Die Auswertung verschiedener Leistungspunkte zeigt wie erwartet eine stark nichtlineare Spannungs-Stromkennlinie. Zuerst wurden PV-Zellen mit den Maßen 100x50mm mit zwei verschiedenen Halogenlampen, die im Abstand von 20cm zur Oberfläche der Zellen montiert waren, untersucht. Zusätzlich ist in der Abbildung 37 die Leistungskurve über den Belastungsstrom aufgetragen, die den für eine Photovoltaikzelle charakteristischen Punkt der maximalen Leistung (maximum power point, MPP) zeigt. Die Lage des MPPs im Leistungsfeld ist aber, wie im Vergleich mit der Abbildung 38, auch von der Beleuchtungsstärke respektive von der Lampenleistung abhängig.

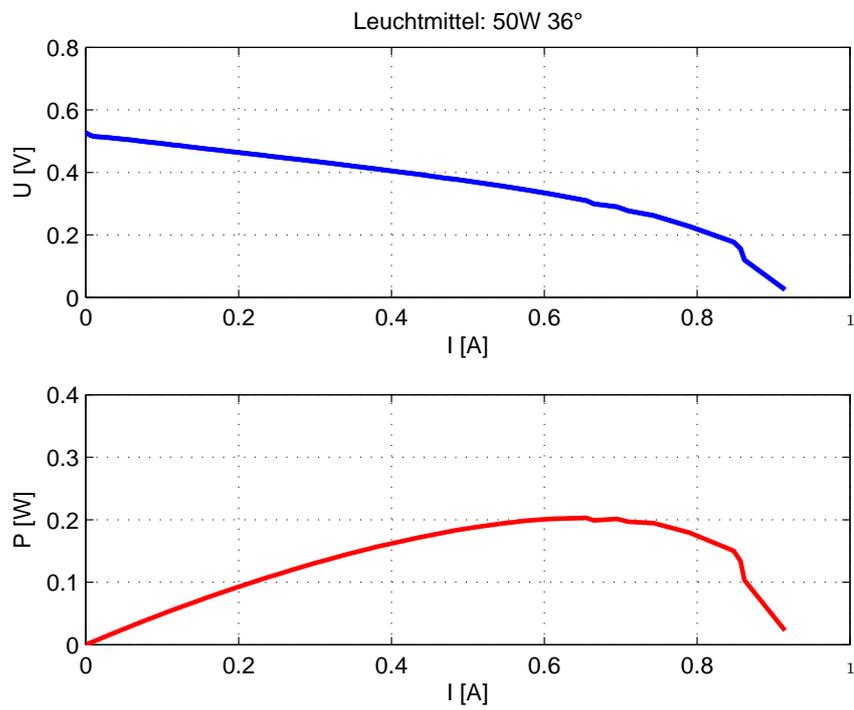


Abbildung 37: Kennlinien PV-Zellen 100x50mm bei 50W Beleuchtung

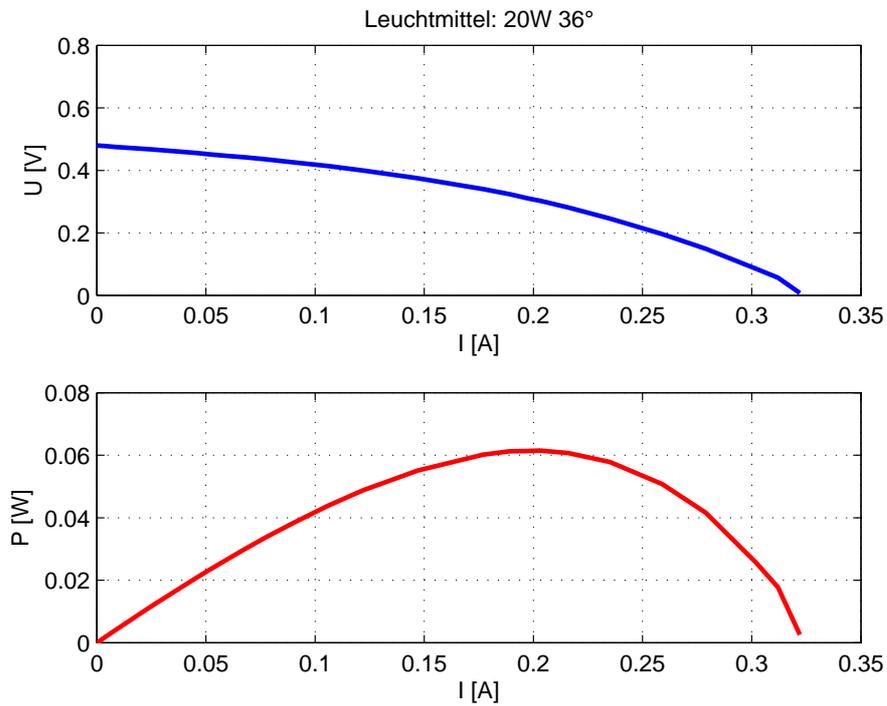


Abbildung 38: Kennlinien PV-Zellen 100x50mm bei 20W Beleuchtung

Im Versuch mit einer PV-Zelle mit den Maßen 40x40mm konnte mit einem Leuchtmittel mit 50W und einem Abstrahlwinkel von 10° in einem Abstand von 30cm eine optimale und durchaus effektive Ausleuchtung der Zelle erreicht werden. Obwohl Halogenspiegelgelleuchten mit einem geringen Abstrahlwinkel für gewöhnlich einen schlechteren Wirkungsgrad bzw. eine geringere Lichtausbeute haben, zeigt diese Kombination einen besseren Nutzungsgrad, als der zuvor getestete Aufbau mit rechteckförmigen PV-Zellen.

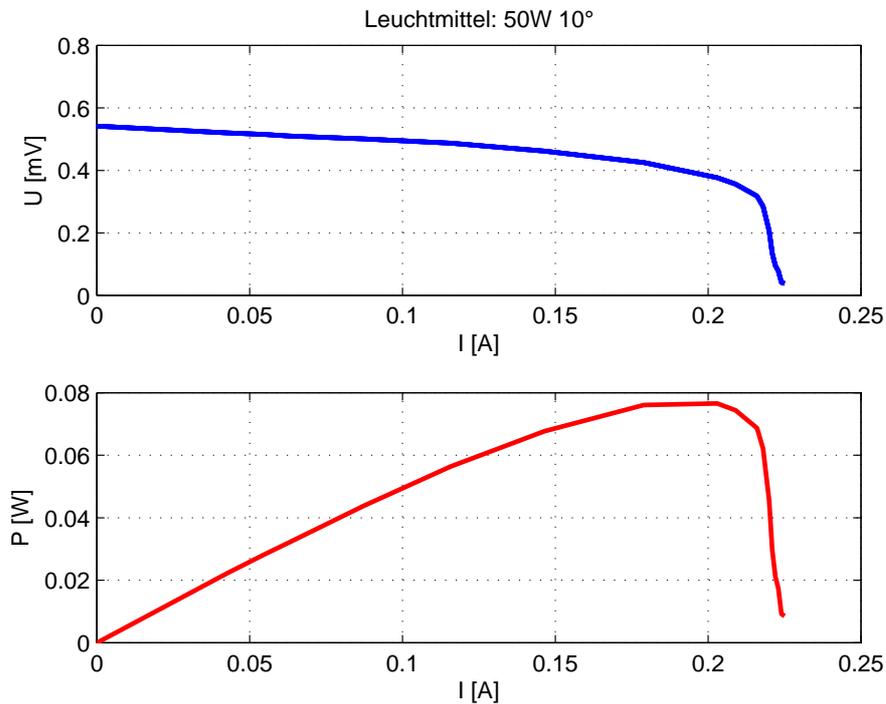


Abbildung 39: Kennlinien PV-Zellen 40x40mm bei 50W Beleuchtung

6.2.2 Drehwinkelabhängigkeit

Die Messung des drehwinkelabhängigen Stromes über einen Belastungswiderstand erfolgte beim angetriebenen Rotor mit ca. 700 rpm über Schleifkontakte. Die Drehzahl wurde wegen der guten Abgrenzbarkeit der Kontaktstörungen so hoch gewählt. Außerdem ist eine genügend hohe Drehzahl notwendig, um eine lokale Erwärmung der Zellen durch die Halogenlampe zu verhindern. Die Abbildung 40 zeigt den qualitativen Verlauf des Laststromes von zwei gegenüberliegenden und antiparallel-geschalteten PV-Zellen (40x40mm), die mit der Halogenlampe 50W im Abstand von 30cm beleuchtet wurden.

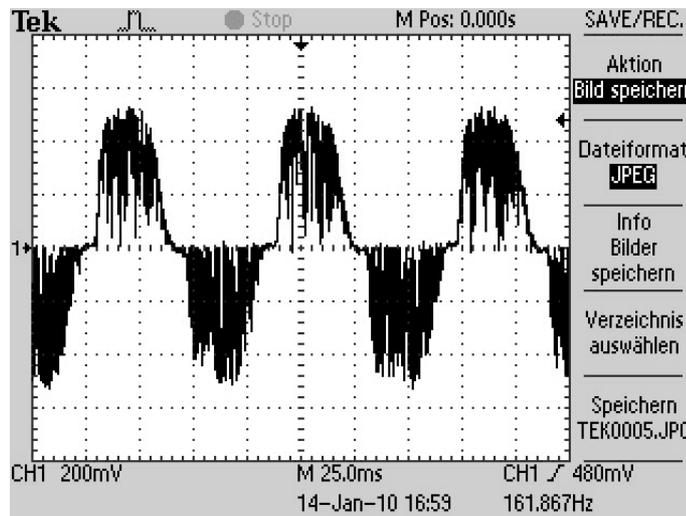


Abbildung 40: Messung des PV-Stromes drehwinkelabhängig

Aus geometrischer Betrachtung sollte der Strom der PV-Zelle über den Drehwinkel einen sinusförmigen Verlauf haben. Durch starke Lichtreflexionen der Zellenoberfläche bei flacher Lichteinstrahlung wird die Steigung beim Nulldurchgang sehr klein und der Stromverlauf kann mit der Funktion $i(\varphi) = I * \sin^2(\varphi)$ für $\varphi = 0 \dots \pi$ besser angenähert werden kann.

6.3 Auslaufversuch

Es wurden beide Rotoren auf dem Motorprüfstand mit dem Antrieb des Prüfstandes beschleunigt um sie anschließend auslaufen zu lassen. Dabei wurde die Drehzahl aufgezeichnet. Aus dem Verlauf der Drehzahl kann mittels Drallsatz das Widerstandsmoment berechnet werden. Der vollständige Drallsatz für den Rotor des Mendocino-Motors lautet

$$J\dot{\omega} = M_{Antrieb} - M_{RLuft} - M_{RSpitze}.$$

Beim durchgeführten Auslaufversuch kann der Motor als antriebslos betrachtet werden, da das Licht der Leuchtstoffröhren im abgedunkelten Labor keinen feststellbaren Einfluss auf das Auslaufverhalten hatte.

Es wird angenommen, dass die Reibung der Spitze auf der Glasplatte für größere Drehzahlen gegenüber der Luftreibung vernachlässigt werden kann. Ebenfalls vernachlässigt werden Wirbelstromverluste. Die am Rotor befindlichen Magnete sind axial magnetisiert und besitzen daher ein rotationssymmetrisches Magnetfeld. Eine Drehung des Rotors bewirkt daher keine Wirbelstromverluste in den elektrisch leitfähigen Teilen des Stators. Der Großteil der metallischen Teile des Rotors, die Welle und die Magnete, sind rotationssymmetrisch und generieren daher auch keine Wirbelstromverluste. Einzig die Wicklung und die Kontakte der Solarzellen verbleiben als mögliche Quelle von Wirbelstromverlusten, diese werden jedoch für die vorliegenden Drehzahlen als vernachlässigbar klein angesehen.

So verbleibt für die Auswertung des Auslaufversuchs die Gleichung

$$J\dot{\omega} = -M_{R_{Luft}}.$$

Aus dieser Gleichung lässt sich nun das Widerstandsmoment ermitteln.

6.3.1 Durchführung

Beim Auslaufversuch wurde die Drehzahl mit einem Laserdrehzahlmesser aufgenommen. Dazu muss am Rotor ein Reflektor angebracht werden. Mit dem Laser wird nun so auf den Rotor geleuchtet, dass bei einer Umdrehung des Rotors der Reflektor den Laserstrahl durchquert. Durch die periodische Reflexion des Laserstrahls kann der Drehzahlmesser aus der Periodendauer die aktuelle Drehzahl ermitteln.

Die ermittelte Drehzahl wird auf einem LCD Display direkt am Drehzahlmesser angezeigt. Zur besseren Auswertung kann jedoch auch über einen Signalausgang die Impulsfolge des Detektors mit einem Speicher-Oszilloskop aufgezeichnet werden. Die Signalwechsel z.B. die steigende Flanke der Impulsfolge kann in der späteren Auswertung zur Ermittlung der aktuellen Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit heran gezogen werden.

Mit MATLAB wurden Tangenten an die Kurve der Winkelgeschwindigkeit über der Zeit gelegt. Die Steigung der Tangenten multipliziert mit dem Massenträgheitsmoment ergibt das wirkende Moment. Das MATLAB-Skript befindet sich im Anhang B.1.

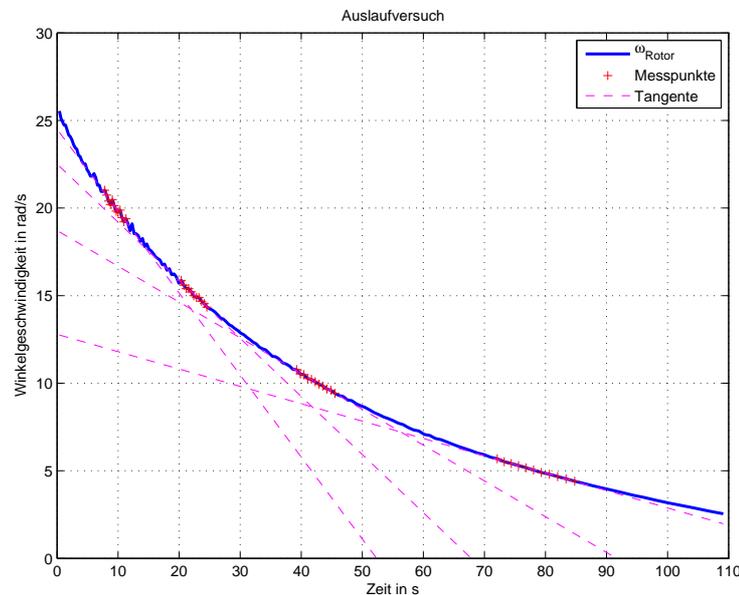


Abbildung 41: Ermittlung des Widerstandsmomentes

6.3.2 Ergebnisse

In Abbildung 42 wird der quadratische Verlauf des Widerstandsmomentes sichtbar. Die deutliche Abweichung im unteren Geschwindigkeitsbereich kommt wahrscheinlich von Effekten die bei höheren Geschwindigkeiten von der Luftreibung dominiert werden. Dazu gehört z.B. die Reibung der Metallkugel auf der Glasplatte.

Die Verläufe bestätigen auch die Vermutung, dass der sechseckförmige Rotor geringere Luftreibungskräfte aufweist. Zum Einen durch die geringere Länge und zum Anderen durch seine Form, die dem Zylinder ähnlicher ist. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Spitzenweite beim Sechseck-Rotor größer ist als beim Viereck-Rotor. Dadurch haben die Rotorkanten bei gleicher Winkelgeschwindigkeit eine größere Umfangsgeschwindigkeit.

Die mit diesem Versuch gewonnenen Messwerte wurden zur Auslegung des zweiten Prototyps herangezogen. Diese Werte wurden mit einer quadratischen Funktion interpoliert und als Modell des Luftwiderstandes bei der Arbeitspunktbestimmung verwendet.

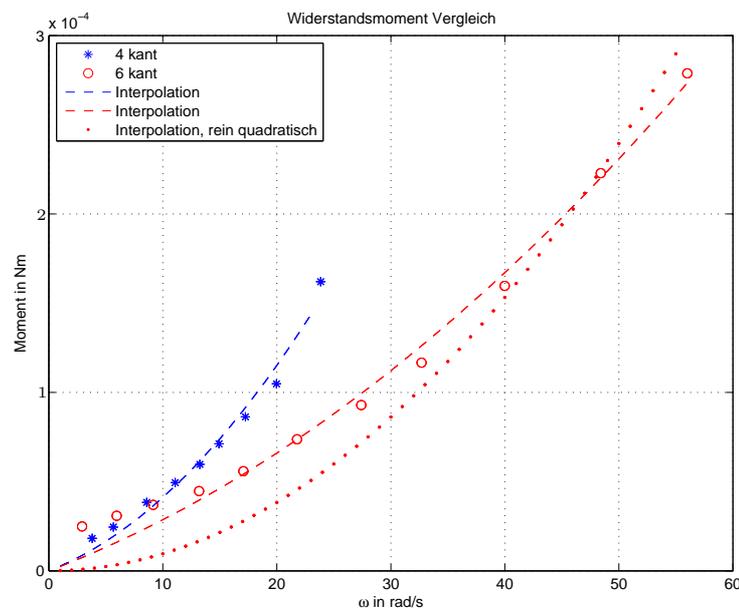


Abbildung 42: Widerstandsmomentenverläufe

Die Interpolationsfunktion für die Messwerte lautet

$$f(\omega) = p_1\omega + p_2\omega^2.$$

Eine zunächst vermutete rein quadratische Abhängigkeit wurde durch die Messungen nicht bestätigt, da eine rein quadratische Funktion die Messwerte nicht so gut approximiert. In Abbildung 42 ist dies für den zweiten Prototyp dargestellt.

6.4 Feldmagnetanordnungen

Die Felderzeugung zur Drehmomentbildung kann auf verschiedene Arten erfolgen. Wie schon im Kapitel 2.4 erwähnt, kann ein eigener Feldmagnet unter dem Rotor plaziert werden oder auch das Feld der Lagermagnete verwendet werden. Beim separaten Erregerfeldmagneten hat man viele Gestaltungsmöglichkeiten, z.B. Form, Lage oder Anzahl der Magneten. Ziel dieser Messung ist die Performance, sprich die maximale Drehzahl und die Beschleunigung der verschiedenen Aufbauten, empirisch zu vermessen. In dieser Messung wurden für den ersten Prototyp folgende Versuchsanordnungen aufgebaut:

- Blockmagnet verschiedener Anzahl direkt unter dem Rotor (einpolige Ausführung)
- Zweipolige Ausführung mit getrennten Magneten auf einer ferromagnetischen Stahlplatte
- ohne zusätzliche Feldmagneten

Als Blockmagnet wurde ein NdFeB N42 mit den Maßen $L \times B \times H$: 50x10x4 mm verwendet. Um die Unterschiede der einzelnen Versuche zu verstärken, wurde mit einer sehr starken Beleuchtung, Halogenspielgellampe 90W, gearbeitet. Daher sind diese Ergebnisse nur qualitativ zu sehen. Die Lampe wurde auf den zur Kommutierung optimalen Winkel ausgerichtet und mit einem Abstand von ca. 10cm zum Rotor montiert.

6.4.1 Versuchsaufbauten

Beim Aufbau 1 liegt der Erregermagnet in Richtung der Rotorachse.

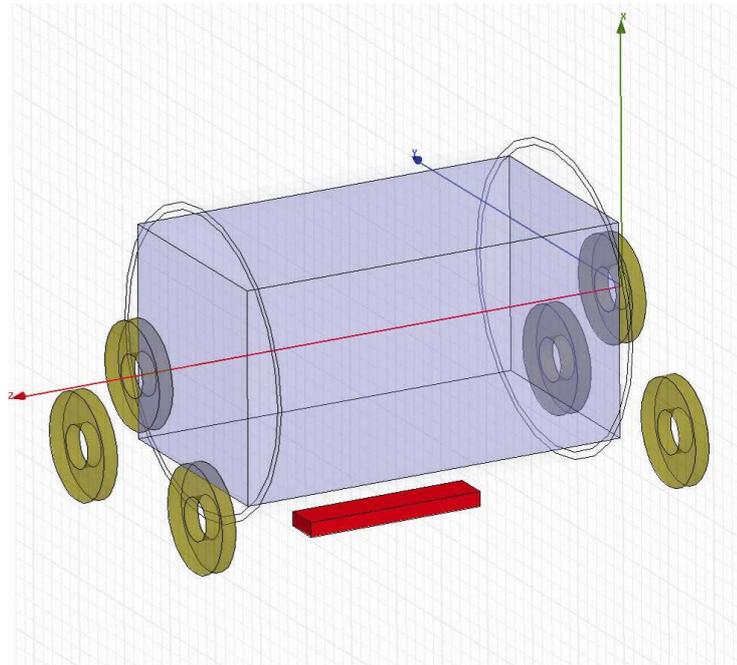


Abbildung 43: Erregermagnet, Aufbau 1

Im Aufbau 2 befindet sich der Magnet quer zur Rotorachse.

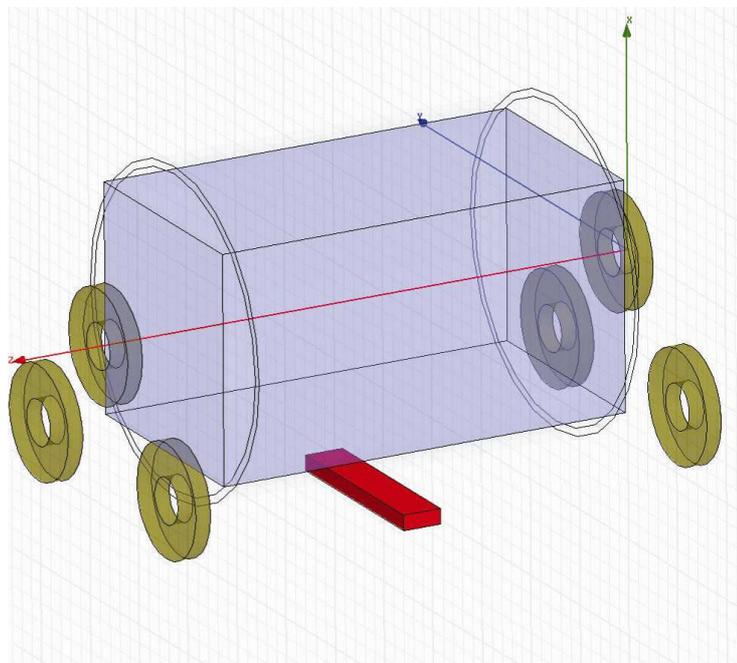


Abbildung 44: Erregermagnet, Aufbau 2

Der zweipolige Aufbau hat auf einer Stahlplatte montierte Blockmagneten. Diese sind jeweils so am Rand der Platte angebracht, dass die Magnetisierungsrichtung von einem Block oben und die vom anderen Block nach unten zeigt.

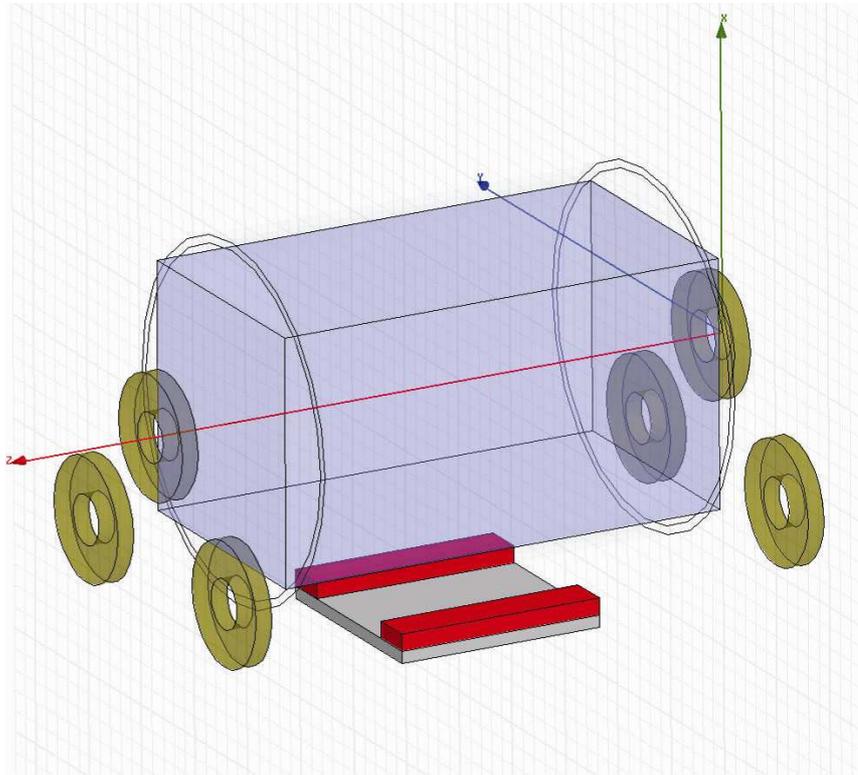


Abbildung 45: Erregermagnet, zweipoliger Aufbau

6.4.2 Messergebnisse

	n_{max}	$t_{n_{max}}$	$t_{n=400min^{-1}}$	$n_{max,schwacheBeleutung}$
	min^{-1}	s	s	min^{-1}
Aufbau 1, 1 Magnet	475	90	43	< 40
Aufbau 1, 2 Magnete	518	80	29	71
Aufbau 1, 3 Magnete	490	82	28	105
Aufbau 2, 1 Magnet	462	90	44	< 40
Aufbau 2, 2 Magnete	504	80	32	< 40
Aufbau 2, 3 Magnete	570	83	22	112
Zweipoliger Aufbau, je 3 Magnete	438	65	36	118
Ohne Erregermagneten	380	-	-	-

t_n ... Beschleunigungszeit

Tabelle 3: Messerwerte Versuchsaufbau Erregermagnete

In der Tabelle 3 erkennt man, dass kein direkter Zusammenhang zwischen den verschiedenen Anordnungen zu finden ist. Für eine genauere Analyse scheint eine FE-Simulation unumgänglich zu sein. Jedoch zeigen sich sowohl der zweipolige Aufbau als auch der Aufbau ohne zusätzlichen Erregermagneten als durchaus funktionstüchtig.

7 Drehzahlmessung

7.1 Messprinzipien

7.1.1 Kapazitive Drehzahlmessung

Die prismatische Form des Rotors ermöglicht prinzipiell die Messung der Drehzahl mittels eines kapazitiven Sensors. Ein kapazitiver Sensor reagiert auf Änderungen der Permittivitätszahlen des Dielektrikums. Die sich am Sensor vorbei drehenden Rotorkanten eignen sich theoretisch für eine derartige Messung.

Dieses Messprinzip benötigt eine aktive Ansteuerung bzw. Versorgung des Sensors und wurde nicht weiterverfolgt.

7.1.2 Sensorspulen

Die Ankerrückwirkung eines Elektromotors kann zur Drehzahlmessung benutzt werden. Ein Rotor mit N Strängen induziert in einer Sensorspule bei einer Drehzahl von n Umdrehungen pro Minute eine Spannung mit einer Grundfrequenz von

$$f_{Sensor} = \frac{n \cdot N}{60}$$

woraus sich die Drehzahl mit

$$n_{Sensor} = \frac{f}{N} \cdot 60$$

ergibt.

Dieses Messprinzip hat den Vorteil, dass keine aktive Versorgung für die Messung benötigt wird. Die Ankerrückwirkung erwies sich aber wegen der geringen Ströme als zu schwach um damit die Drehzahl bestimmen zu können. Ein eigener Feldmagnet für die Sensorspulen ist auf Grund der magnetischen Lagerung nicht möglich. Dieser Magnet würde den Rotor in eine ausgezeichnete Lage bringen und versuchen ihn dort zu halten. Wegen dem geringen Antriebsmoment ist ein Rastmoment in jedem Fall zu vermeiden.

7.1.3 Lichtschranke

Für die Messung der Drehzahl mittels einer Lichtschranke gibt es verschiedene Möglichkeiten.

Die einfachste Möglichkeit ist, die prismatische Form des Rotors zu nützen.

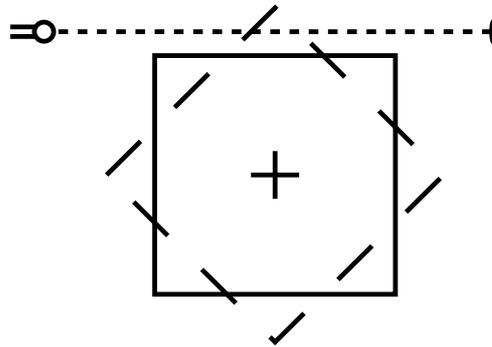


Abbildung 46: Einfache Lichtschranke

Diese Form wäre zwar theoretisch möglich, jedoch können Schwingungen des Rotors leicht zu falschen Signalen führen. Es wurde daher eine Scheibe mit strahlenförmigen Ausnehmungen zur Erzeugung der Signale verwendet (siehe Abbildung 47). Diese Scheibe wurde nahe zum Auflagepunkt der axialen Lagerung montiert, dadurch wirken sich Rotorschwingungen nicht so stark aus, da dort die Schwingungsamplitude klein ist.

Obwohl dieses Messverfahren eine aktive Versorgung der Lichtschranke benötigt wurde dieses Prinzip aus Gründen der Unempfindlichkeit gegenüber Rotorschwingungen gewählt.

7.2 Lichtschranke

Die Lichtschranke liefert als Eingang für die Drehzahlmessung ein Rechtecksignal. Der Mikrocontroller zählt nun die Signalwechsel (z.B. die steigenden Flanken). Der Zusammenhang der Winkelgeschwindigkeit ω des Rotors und dem Zählerstand lautet folgendermaßen:

$$\omega = \frac{2\pi n}{NT},$$

mit n dem Zählerstand des Mikrocontrollers, N der Anzahl der Schlitze der Inkrement-scheibe und T der Messdauer des Mikrocontrollers in Sekunden.

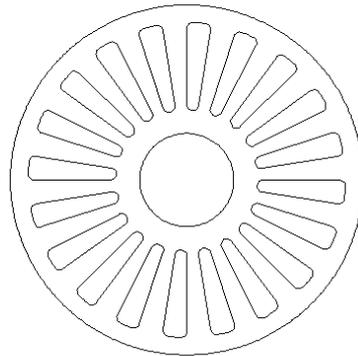


Abbildung 47: Inkrementalscheibe

7.3 Mikrocontroller

Als Mikrocontroller werden Halbleiterchips bezeichnet die neben einem Prozessor auch noch weitere Peripheriefunktionen realisieren. Der Arbeits- und der Programmspeicher befinden sich auf dem selben Chip. Der verwendete Mikrocontroller vom Typ PIC18F4580 verwendet die Harvard-Architektur. Hier sind im Gegensatz zur Von-Neumann-Architektur, welche bei Prozessoren für PCs verwendet wird, der Daten- und der Programmspeicher physisch getrennt. Dies bietet zum Einen Sicherheitsvorteile (es kann kein Schadcode, z.B. der eines Trojaners, durch einen stack overflow in den Programmspeicher gelangen und ausgeführt werden) und zum Anderen ergibt sich eine erhöhte Flexibilität beim Design des Chip und damit Leistungsvorteile. Der verwendete Mikrocontroller besitzt einen 8-Bit breiten Datenspeicher jedoch einen 16-Bit breiten Programmspeicher. Dadurch ergibt sich eine enorme Leistungssteigerung da z.B. die Multiplikation von zwei 8-Bit Zahlen 16 Bit zur Berechnung benötigt. Prozessoren mit einem 8-Bit breiten Programmspeicher müssen die Operation auf zwei Register aufteilen um diese Multiplikation durchführen zu können, was die Berechnung insgesamt bremst. Weiters können durch die größere Breite des Programmspeichers komplexere bzw. mehr Befehle implementiert werden.

Typische von Mikrocontrollern realisierte Peripheriefunktionen sind z.B. Kommunikationsprotokolle (USB, CAN, I²C, Ethernet, USART, SPI), PWM-Ausgänge, A/D Wandler, Komperatoren, usw..[3] Der Mikrocontroller kommuniziert über sogenannte I/O Ports mit der Umwelt. Bei der Vielzahl der Möglichkeiten eines Mikrocontrollers und der begrenzten Pin-Anzahl dient ein einzelner Pin für mehrere Funktionen. So dient z.B. der zweite Pin des Port B beim PIC18F4580 drei unterschiedlichen Anwendungen. Erstens dient er als digitaler Ein-/ Ausgang (RB2), zweitens zur Erkennung externer Interrupts (INT2) und drittens zum Senden mit dem CAN Protokoll (CANTX). Die jeweilig gewünschte Anwendung wird durch setzen bestimmter Konfigurationsbits festgelegt. Eventuelle Überschneidungen bzw. Unvereinbarkeiten müssen bei der Entwicklung der Applikation berücksichtigt werden.

Mikrocontroller werden üblicherweise mit den Programmiersprachen Assembler oder C programmiert. Bei Mikrocontrollern mit geringer Programmspeicherbreite wird ausschließlich Assembler verwendet, da die Compiler von Hochsprachen wie C die knappen Speicher-Ressourcen nicht so effizient nutzen wie dies bei Assembler der Fall ist.

7.3.1 Auswerteprogramm

Das Programm zur Auswertung des Sensorsignals und zur Anzeige der Drehzahl auf einem LCD Display wurde in der Programmiersprache C geschrieben. Die Programmiersprache C erleichtert es komplexere Programme zu erstellen, da die Programmierung mit einem höheren Grad an Abstraktion als in Assembler passiert. Für die Erstellung von Programmen gibt es von Microchip die kostenlose Programmierumgebung MPLAB. In MPLAB ist ein Compiler für Assembler integriert. Es lassen sich aber auch weitere Compiler in die Programmierumgebung einbinden. Für das Auswerteprogramm wurde die kostenlose Studenten-Version des MPLAB C18 C-Compilers von Microchip verwendet.

Zum Messen der Drehzahl wird ein interner Timer des Mikrocontrollers verwendet. Dieser Timer gibt den Takt der Auswertung vor. Der Timer nutzt den Systemtakt. Über die Zählerbreite (der Timer kann im 8-Bit oder im 16-Bit Modus betrieben werden) und einen Prescaler (es kann z.B. nur jeder vierte Takt genutzt werden) wird die Periodendauer des Timers eingestellt. Wenn der Zähler überläuft, wird ein Timer-Interrupt ausgelöst. In der Interrupt-Routine für den Timer-Interrupt kann nun festgelegt werden was der Mikrocontroller periodisch (mit der Periodendauer des Timers) machen soll.

Zum Erfassen des Sensorsignals wird dieses an den INT0-Pin des Mikrocontrollers gelegt. Externe Interrupts sind flankengesteuert und werden von Signalwechseln an den INTx-Pins ausgelöst. In der Interrupt-Routine für den externen Interrupt wird nun bei jedem Auftreten des Interrupts ein interner Zähler um Eins erhöht.

Wenn nun ein Timer-Interrupt auftritt, wird der Wert des internen Zählers in die Drehzahl umgerechnet und auf dem LCD-Display ausgegeben. Anschließend wird der Zähler zurück gesetzt.

Die Ansteuerung des LCD-Displays geschieht mit 7 digitalen I/O Pins. Drei Pins werden benötigt um die Steuerbefehle zum LCD-Modul zu übertragen und vier Pins werden für die anzuzeigenden Daten benötigt.

Der Quelltext des Auswerteprogramms befindet sich in Anhang A

8 Elektronische Versorgungs- und Auswerteschaltung

8.1 Auslegung

8.1.1 Funktionsanforderungen

Die Drehzahlmessung erfordert für die aktive Messung selbst, und für die Anzeige eine geeignete Spannungsversorgung mit Signalanpassung. Für die Entwicklung einer elektronischen Schaltung sind hier folgende Anforderungen definiert:

- Energieversorgung mittels PV-Zellen
- stabile Versorgungsspannung für Controller, RLS(Reflexlichtschranke) und LCD
- einstellbare Stromquelle für RLS-LED
- RLS - LED über Controller schaltbar
- Signalanpassung des RLS - Ausganges

8.1.2 Entwurfparameter

Die Schaltung wurde mit LTSpice IV entworfen und ausreichend getestet, dabei wurde beim Design auf folgende Parameter geachtet:

- geringer Eigenenergiebedarf
- stabil gegen Eingangsspannungsschwankungen und Belastungsschwankungen
- einfacher Aufbau
- Standard Bauelemente

8.2 Realisierung

8.2.1 Schaltung

Für diese Elektronik wurde wegen der geringen Anforderungen auf komplizierte Standardlösungen verzichtet und eine zweckmäßig einfache Schaltung aufgebaut. Die Schaltung gliedert sich in Stromversorgung und Stabilisierung, Stromquelle für RLS und Signalanpassung Drehzahlsignal.

Die Nenndaten von PV-Zellen beziehen sich meist auf eine Sonnenbestrahlung von ca.

1000W/m² und geben somit die maximale Leistung an. Bei Beleuchtung mit künstlichem Licht, z.B. einer Halogenleuchte 50W ist die Leistung der Zelle wesentlich geringer. Um die geforderten Leistungsdaten der Auswerteschaltung zu entsprechen wurden 2 Stück Solarmodule mit je 5V, 81mA in Serie geschaltet. Somit werden sowohl die Stromversorgung der RLS und LCD bzw. auch die stabile Spannungsversorgung für den Controller mit der definierten Beleuchtung sichergestellt.

Die Versorgungsschaltung, Abbildung 48, besteht aus einem Glättungskondensator C1 und einer Spannungsstabilisierung für 5V.

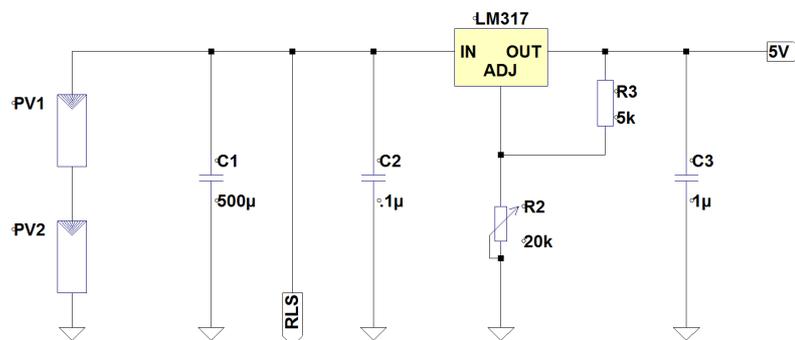


Abbildung 48: Stromversorgung und Stabilisierungsschaltung

Es gibt nun viele Möglichkeiten um eine stabile Versorgungsspannung zu erzeugen. In diesem Projekt wurden Schaltungen mit einem integriertem Baustein der 78XX Familie, einem justierbaren 3-Terminal-Regler LM317 und mit wenigen diskreten Bauteilen simuliert. Dabei zeigt die Schaltung mit dem LM317 gute Eigenschaften hinsichtlich der Stabilität der Ausgangsspannung U_a bei stark schwankender Eingangsspannung U_e . Darüber hinaus ist der Eigenverbrauch dieser Schaltung mit den gewählten Beschaltungswiderständen R2 und R3 deutlich geringer als beim 7805. Die interne Spannungsreferenz U_{ref} zwischen den Anschlüssen OUT und ADJ des LM317 beträgt 1,25V und wird hier wegen möglichst geringer Verluste mit einem relativ hohen Widerstand R3 beschaltet. Mit der definierten Ausgangsspannung von 5V kann man nun den Widerstand R2 wie folgt berechnen:

$$R2 = \left(\frac{U_a}{U_{ref}} - 1 \right) R3.$$

R2 wurde zur exakten Einstellung der Ausgangsspannung mit einem Trimpotentiometer ausgeführt. C2 und C3 werden standardmäßig zum LM317 beschaltet, damit dieser einwandfrei arbeitet. Die Versorgung der relativ starken RLS-Diode geschieht vor der Spannungsstabilisierung um die Verlustleistung des LM317 durch Ausgangsstromminimierung

gering zu halten.

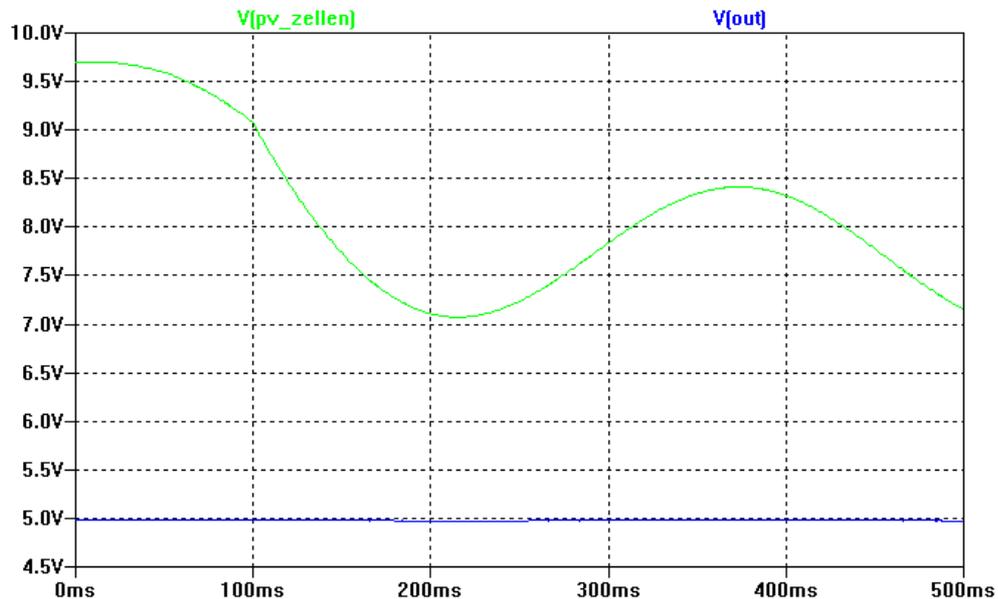


Abbildung 49: Eingangs- und Ausgangsspannungsverlauf

Der nächste Teil der Schaltung, Abbildung 50 stellt die gesteuerte Konstantstromquelle für die Diode (IR-LED) der Reflexlichtschranke dar. Die Transistorschaltung stellt den Strom der LED ein und über die Schnittstelle “RLS_ON” kommt vom Controller der Einschaltbefehl (+5V). Über den Spannungsteiler R6, R5 entsteht an der Basis des T1 eine genügend hohe Spannung um die Kollektor-Emitter-Strecke des T1 sofort durchzuschalten. Im nächsten Moment beginnt T2 durch den Spannungsabfall von R1 zu leiten und vermindert die Basis-Emitterspannung an T1. Bei diesem gegengekoppelten System stellt sich am R1 gerade die konstante Basis-Emitterspannung von T2 ein. Beim verwendeten NPN-Transistor BC847C beträgt diese 600mV. Somit kann mit R1 der gewünschte Diodenstrom $I_D = 50mA$ mit folgender einfachen Formel eingestellt werden.

$$R1 = \frac{U_{BE}}{I_D} = \frac{0.6V}{0.01A} = 60 \Omega$$

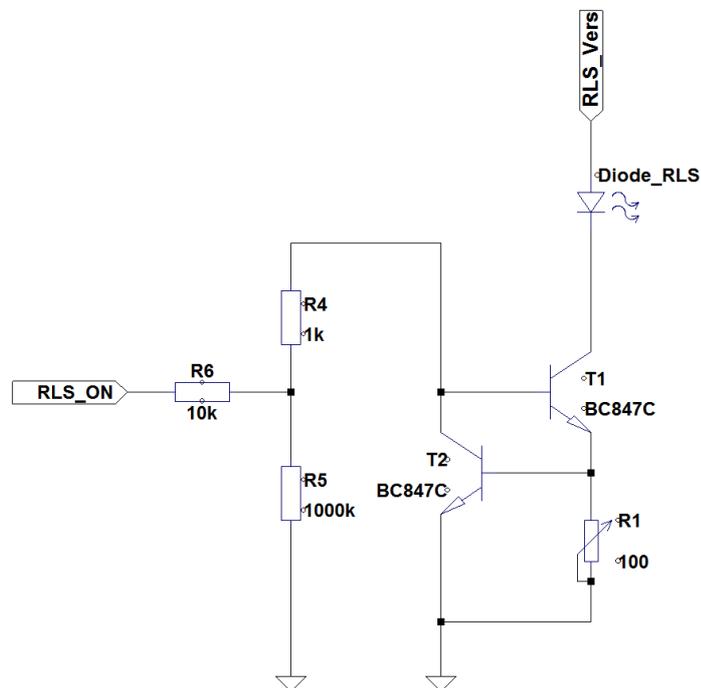


Abbildung 50: Schaltung Stromquelle für RLS

Der Widerstand R4 begrenzt den Basisstrom von T1 und R5 fungiert als Pull-Down Widerstand beim Abschalten der Stromquelle. Diese einfache Stromquelle arbeitet recht effizient und ist für diese Applikation völlig ausreichend.

Das Ausgangssignal der RLS wird mit der Komperatorschaltung, Abbildung 51, für den Controller (PIC) angepasst.

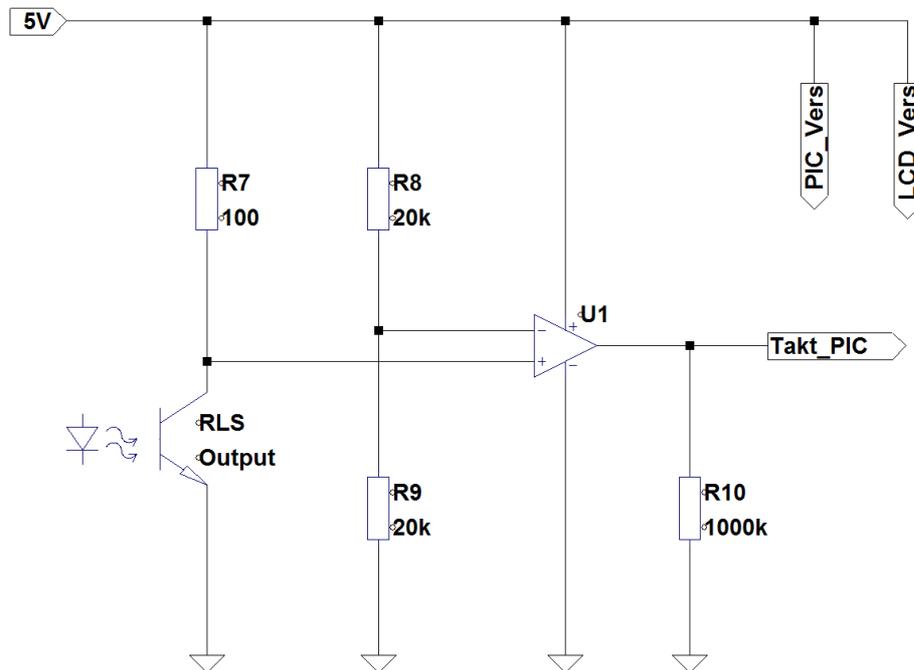


Abbildung 51: Schaltung Signalanpassung

Die Lichtschranke besitzt einen sogenannten Open Collector Ausgang dessen Spannungspegel in dieser Schaltung mit dem Knoten des Spannungsteilers R8, R9 über den Komparator U1 verglichen wird. Während am RLS Ausgang unter dem Einfluss der Spiegelungen von der Inkrementalscheibe ein pulsformiges Signal anliegt, erhält der Signal-Eingang des Controllers nun ein definiertes 5V Rechtecksignal, siehe Abbildung 52. R7 dient als Arbeitspunkteinstellung des RLS-Transistors und R10 als Pull-Down-Widerstand.

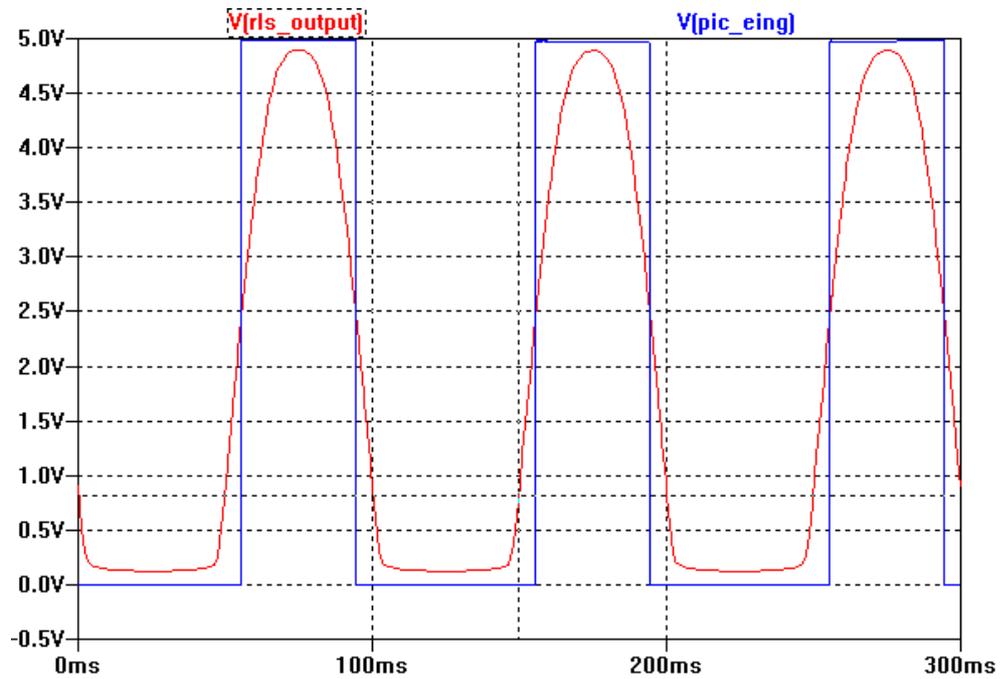


Abbildung 52: Spannungsverlauf Signalanpassung

Der Controller sowie die LCD-Anzeige werden über das stabilisierte 5V Netz versorgt.

Das Layout der Schaltung wurde mit der Software Eagle 5.6.0 erstellt und die Platine mit der Platinenfräse am Institut gefertigt. Der vollständige Schaltplan bzw. das Layout für die Platine befinden sich im Anhang.

9 Fertigung

9.1 Rotor

Der Rotor besteht aus einer durchgehenden Aluminiumwelle welche den prismatischen Rotoraufbau aus Kunststoff trägt. Die Welle wurde von einem der Autoren auf einer Universaldrehmaschine der JKU Linz gefertigt. Die Wahl von Aluminium als Werkstoff liegt einerseits im geringen Gewicht und andererseits an den magnetischen Eigenschaften begründet.

In ein Wellenende ist eine Kugelschreiberspitze eingeklebt.

Die Welle trägt an beiden Enden jeweils einen Wellenabsatz auf dem sich ein Gewinde befindet. Damit kann mittels zweier Muttern der Rotorkörper auf der Welle fixiert werden. Da der Motor nur geringe Drehmomente erzeugen kann, genügt ein handfestes Anziehen der Muttern um eine genügend feste kraftschlüssige Verbindung von Welle und Rotorkörper herzustellen.

Der Rotorkörper besteht aus zwei Stirnplatten und vier bzw. sechs Seitenplatten. Die Seitenplatten tragen die Solarzellen und sind mit den Stirnplatten mit Kunststoffschrauben verschraubt. Hier wurden handelsübliche Kunststoffschrauben verwendet. Stahlschrauben würden durch ihre Magnetisierbarkeit ein Rastmoment erzeugen, welches im schlimmsten Fall verhindert, dass der Motor von selbst anläuft. In die Seitenplatten sind zur Kontaktierung der Solarzellen Ausnehmungen gefräst, da die Rückseite der Solarzellen nach dem Verkleben nicht mehr zugänglich ist.

In die Seitenkanten des Rotorkörpers, an den Stoßstellen der Seitenplatten, sind die Wicklungen eingelegt. Dafür sind auch in den Stirnplatten kleine Ausnehmungen vorhanden.

Die Wicklung wurde mit lackisoliertem Wicklungsdraht hergestellt.

9.2 Stator

Der Stator des ersten Prototyps wurde aus Aluminium-Konstruktionsprofilen gebaut. Diese sind leicht verfügbar und es lassen sich ohne mechanische Bearbeitung Änderungen am Aufbau vornehmen. Zur Verbindung der Profile wurden beim Stator teilweise Stahlschrauben verwendet, da diese sich hier nicht in einem Rastmoment auswirken. Die Lager-Magnete wurden mit Kunststoffschrauben an Aluminium-Winkel befestigt. Hier würde die Verwendung von Stahlschrauben einen magnetischen Kurzschluss bewirken und das nutzbare Feld erheblich schwächen.

Als Stator für den zweiten Prototyp wurde anfangs der Stator des ersten Prototyps, nach entsprechendem Umbau, verwendet. Danach wurde ein neuer Stator größtenteils aus transparentem Kunststoff gefertigt. Die einzelnen Teile sind über Aluminium-Winkel und Kunststoffschrauben verbunden.

Weiters wurde auch Platz für die Auswerteschaltung und die Solarzellen für deren Versorgung vorgesehen. Am Widerlager für den Rotor wurde die Reflexions-Lichtschranke montiert.

9.3 Widerlager

Die Glasscheibe für das Widerlager des ersten Prototyps ist eine handelsübliche Schutzscheibe für Schweißschirme. Bei diesen ist vor dem eigentlichen Schutzglas, welches zum Schutz vor dem Licht des Lichtbogens stark getönt ist, eine Scheibe aus normalem, billigerem Glas angeordnet. Dieses schützt die teure verdunkelte Scheibe vor Schweißspritzern und Funken. Da das Format dieser Scheibe gut für diese Anwendung passt wurde diese verwendet.

Für den zweiten Prototyp wurde das Widerlager aus transparentem Kunststoff gefertigt, da dies aus ästhetischen Gründen geeigneter erschien.

9.4 Auswerteschaltung

Um das Layout für die Platine zu erstellen, wurde der Schaltplan mit der E-CAD Software EAGLE erstellt. Die Leiterplatte dient sowohl zur Realisierung der Schaltung als auch zur Aufnahme des Displays. Sämtliche EAGLE-Schaltpläne sind im Anhang ersichtlich. Als Basismaterial wurde eine Zweischicht-Leiterplatte verwendet, die mit der institutseigenen Platinenfräsmaschine bearbeitet wurde. Die Unterschicht wurde großteils als Massefläche verwendet. Zwei Layer waren ohnehin notwendig, um einerseits den Platzbedarf zu minimieren und andererseits unumgängliche Leitungskreuzungen zu realisieren. Die Abbildung des Layoutes ist ebenfalls im Anhang zu finden. Abbildung 53 zeigt die fertig gefräste Leiterplatte.

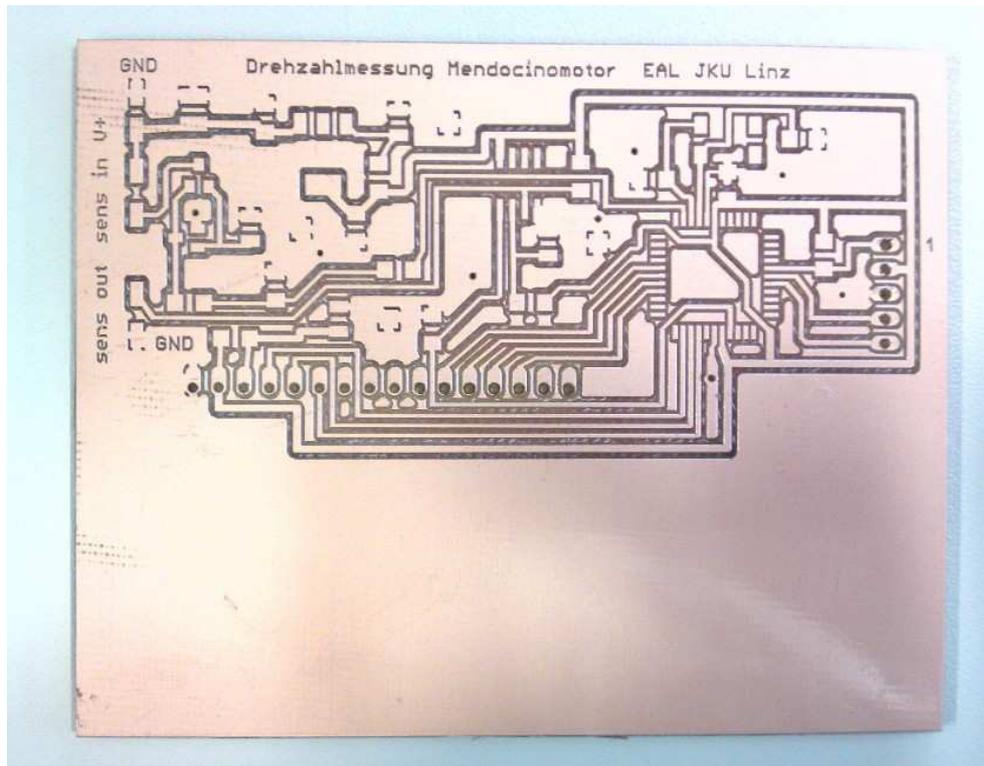


Abbildung 53: gefertigte Leiterplatte

Nach der Bestückung der SMD Bauteile wurde das Display auf der Platine installiert und die Schaltung getestet. Die PV-Module für die Stromversorgung sind neben der Platine auf der Grundplatte montiert. Als Energieversorgung respektive als Lichtquelle für die gesamte elektronische Schaltung genügt sowohl eine konventionelle 20W Halogenspiegelleuchte als auch direktes oder indirektes Sonnenlicht. Eine Beleuchtung mit Leuchtstofflampen, wie sie als Raumausleuchtung verwendet werden, ist jedoch nicht ausreichend.

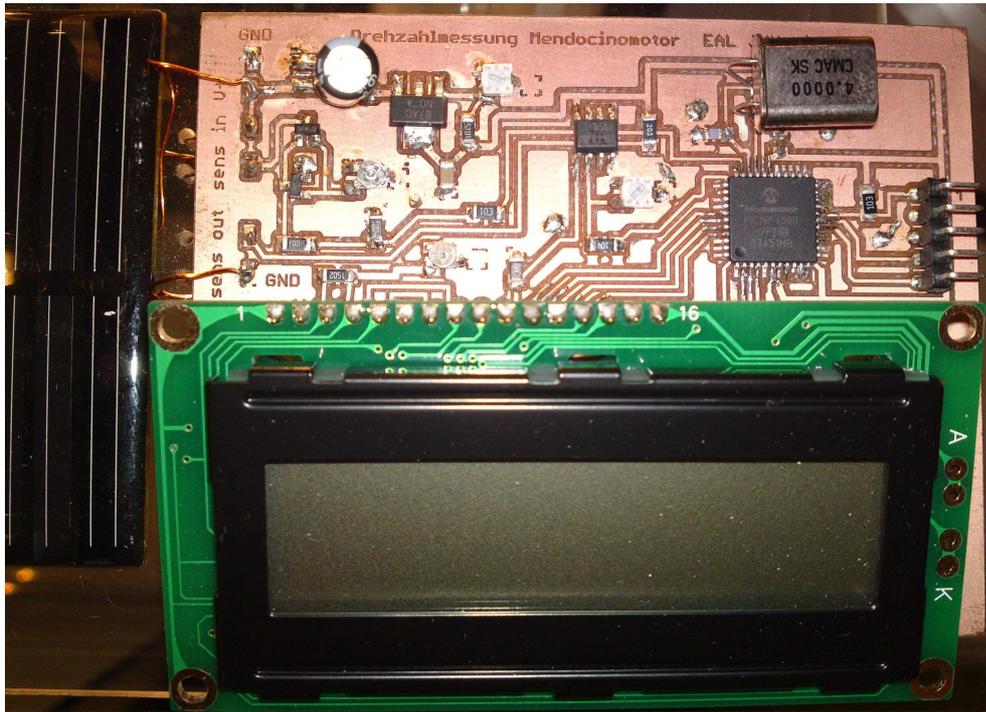


Abbildung 54: Platine Auswerteschaltung fertiger Aufbau

10 Ausblick

10.1 Solarzellen

Verbesserungspotential im Sinne von mechanischer Robustheit besteht bei den Solarzellen. Diese wurden bei den bisherigen Motoren auf die Seitenteile des Rotors direkt aufgeklebt. Da die monokristallinen Solarzellen dünne spröde Scheiben sind, sind diese sehr empfindlich gegenüber mechanischen Belastungen. Sprünge im Silizium führen dazu, dass Teile der Solarzelle keinen elektrischen Kontakt mehr haben und wirksame Solarzellenfläche dadurch verringert wird.



Abbildung 55: Solarzellenbruch

Robuster wären hier in Kunstharz vergossene Solarzellen, jedoch sind im Handel nur un-
vergossene Solarzellen oder vergossene, aber bereits verschaltene, Solarzellen, die darüber
hinaus in vielen Fällen nicht die gesamte Fläche ausnutzen, erhältlich.

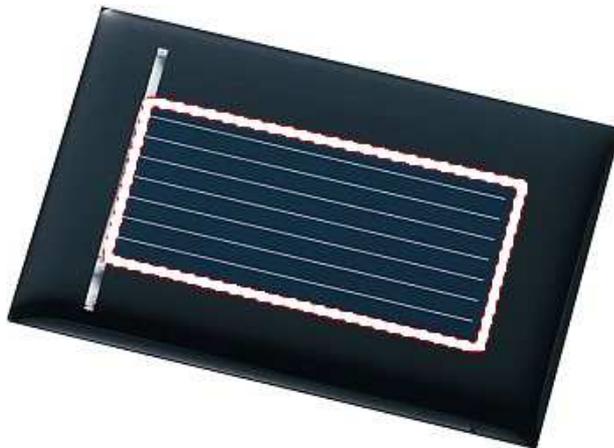


Abbildung 56: Solarmodul

In Abbildung 56 ist der Bereich den die Solarzelle einnimmt weiß umrandet. Im Hinblick auf eine möglichst gute Ausnutzung der verfügbaren Fläche ist eine Verwendung der in Harz vergossenen Solarmodule nicht sinnvoll, jedoch sind diese mechanisch sehr robust. Allerdings fällt bei der Verwendung von vergossenen Solarzellen der Lichtanteil, der durch Reflexion am Übergang Luft auf Harz auftritt, weg. Unvergossene Solarzellen besitzen hingegen meist eine strukturierte Oberfläche um Reflexionen zu verringern.

Vergossene Module mit einer hohen Flächenausnutzung würden die Solarzellen weitgehend unempfindlich gegen mechanische Stöße machen.

10.2 Magnetanordnung

Durch dreidimensionale Feldberechnungen könnte eine optimale Anordnung der Magnete gesucht werden, die die momentenbildende Magnetfeldkomponente maximiert. Durch die starke Verkopplung von Rotorposition und Magnetanordnung würde dies sicher in einem iterativen Prozess erfolgen müssen. Die freie Ausbreitung des Feldes im Raum ohne eine Feld-Führung durch Eisenteile würde eine solche Berechnung durchaus anspruchsvoll machen da übliche Vereinfachungen (konstanter Fluss im Eisenkreis, keine Streuflüsse, etc.) bei der Feldberechnung von elektrischen Maschinen entfallen.

Die Verwendung von eigenen Magneten zu Erzeugung des momentenbildenden Feldes müsste ebenfalls mittels numerischer Feldberechnung untersucht werden. Dabei müssen in jedem Fall die Lagermagneten mit berücksichtigt werden, da diese selber schon momentenbildend wirken. Das Feld der Erregermagnete würde sich dem der Lagermagnete überlagern. Auch die Rückwirkung auf die Lagerung muss im Auge behalten werden.

Eine Effizienzsteigerung im Bereich der Magnete könnte auch durch die Verwendung von nicht gelochten Scheiben möglich sein. Dadurch würde zwar die Montage, speziell am Rotor, anspruchsvoller, jedoch entfällt für das Magnetfeld der Pfad durch die Bohrung. Die ganzen Feldlinien müssten sich dann außen um den Magnet herum schließen.

10.3 Rotorform

Der Übergang von einer gestreckten Rotorform zu einer eher gedrungenen hat gezeigt, das dadurch der Rotor stabiler läuft und weniger zu Schwingungen neigt. Bei einem kurzen Rotor mit großem Durchmesser fallen die Rotationsachse und die Trägheitshauptachse mit der größten Trägheit zusammen. In diesem Fall stabilisiert die Rotation selbst den Rotor, siehe auch [1].

Eine Erhöhung der Strangzahl würde die Form des Rotors mehr an die eines Zylinders annähern. Die Fläche einer einzelnen Solarzelle würde sich zwar dadurch verringern. Jedoch würde sich die gesamte Solarzellenfläche erhöhen, da die Mantelfläche eines Prisms mit n -eckiger Grundfläche gleich dem Produkt Umfang der Grundfläche mal Länge entspricht. Der Umfang eines regelmäßigen n -Ecks wächst mit wachsender Anzahl der Ecken

bei gleich bleibendem Umkreisradius. Eine bessere Annäherung der Zylinderform ließe auch eine Verringerung des Luftwiderstandes bei gleichem Umkreisradius und gleicher Länge erwarten. Eine Erhöhung der Strangzahl müsste auch die Anlaufeigenschaften verbessern. Mehr Stränge würden weiters bedeuten, dass mehr Kupferdraht für die Wicklungen benötigt wird. Dadurch würde sich das Massenträgheitsmoment erhöhen was wiederum den stabilisierenden Einfluss der Rotation erhöht.

10.4 Lagerung

Werden konzentrische Magnetringe für die radiale Lagerung verwendet (siehe Abbildung 7) ergibt sich eine viel steifere Lagercharakteristik, da der Rotormagnet vom Statormagnet umschlossen wäre. Aus ästhetischen Gründen wurde dies jedoch bei den gebauten Prototypen nicht umgesetzt.

Literatur

- [1] Hartmut Bremer. Technische Mechanik 3.
- [2] Microchip. *Code Examples*. Microchip Technology, Inc., <http://www.microchip.com/CodeExamplesByFunc.aspx>, 11 October 2008.
- [3] Microchip Technology Inc. *PIC18F2480/2580/4480/4580 Data Sheet*, 2009.
- [4] Reto Schöb. Theorie und Praxis der Magnetlagertechnik - Eine kurze Einführung.
- [5] Schlichting H. *Grenzschicht-Theorie*. G. Braun, Karlsruhe, 1982.
- [6] W. Amrhein. Elektrische Antriebstechnik I Teil 1.
- [7] Werner Braunbeck. Freies Schweben diamagnetischer Körper im Magnetfeld. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 112(11):764–769, 17 April 1939.

Bildquellen

- [AT] Andreas Titze, <http://www.bis0uhr.de/magnet/index.html> 2010
- [MK] Manfred Klose, <http://www.mendocinomotor.de/1,000000128402,8,1>
- [RS] Ralf Schuster, <http://www.de.heinrici-heissluftmotor.de/html/projekte.html> 2009
- [RZ] Ralf Zierfaß, http://klingon77.roboterbastler.de/Mendocino_Motoren/001/001.html 2010
- [US] User:Splarka, http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamagnetic_graphite_levitation.jpg 2006
- [HO] User:Hokanomono, http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de/8/8a/Solarzelle_SiSpektrum.svg 2010

A Drehzahlmessung

Hier sind die Quelltext-Dateien des Auswerteprogramms eingefügt. Die Datei *display.c* wurde selbst geschrieben. Die Dateien *LCD.c* und *LCD.h* stammen aus einer Beispiel-quelltextsammlung von der *Microchip*-Homepage. Die in *display.c* weiters eingebundenen Header-Dateien *p18f4580.h*, *delays.h* und *portb.h* sind Teil der Header-Bibliothek des verwendeten C-Compilers. Diese Dateien werden hier nicht angeführt.

A.1 Auswerteprogramm

Listing 1: Die Datei display.c

```
1 // #define USE_OR_MASKS
2 #include <p18f4580.h>
3 #include "delays.h"
4 #include "portb.h"
5 #include "LCD.h"
6
7 // prototypes
8 void high_isr (void);
9 void low_isr (void);
10 void DisplayCounter(void);
11 void DisplayMendo(void);
12 void DisplayRPM(void);
13 void foo(void);
14
15 // global variables
16 unsigned long int count;
17 unsigned int MSD, MdD, LSD;
18
19 // ----- interrupt handler -----
20 // set interrupt handler
21 #pragma code high_vector=0x08 // High-Priority- oder Standard-Interruptvektor
22 void interrupt_at_high_vector(void)
23 {
24     _asm GOTO high_isr _endasm
25 }
26
27 #pragma code low_vector=0x18 // Low-Priority Interruptvektor
28 void interrupt_at_low_vector(void)
29 {
30     _asm GOTO low_isr _endasm
31 }
32 #pragma code
33
34 // interrupt handler
35 #pragma interrupt high_isr
36 void high_isr (void)
37 {
```

```

38  if (INTCONbits.TMR0IE && INTCONbits.TMR0IF)
39  {
40      INTCONbits.TMR0IF = 0; // Interrupt-Flag löschen
41
42      // hier der Code, der beim Timer0 Interrupt ausgeführt werden soll
43          DisplayRPM();
44          DisplayCounter();
45          count = 0;
46  }
47
48      if (INTCONbits.INT0IE && INTCONbits.INT0IF)
49      {
50          INTCONbits.INT0IF = 0;
51
52          count++;
53      }
54  }
55
56  #pragma interruptlow low_isr
57  void low_isr (void)
58  {
59      // hier der Code für alle Low-Priority Interrupts (IPEN=1)
60          //LATB = 8 & (~LATB);
61
62          //INTCONbits.TMR0IF = 0;
63  }
64  // ----- end interrupt handler -----
65
66
67  // ----- main routine -----
68  void main(void)
69  {
70      /* ----- register setup ----- */
71
72      // port x data direction register ; 1=input, 0=output
73      TRISA = 0b00010001;
74      TRISB = 0b11110001;
75      TRISC = 0xF0;
76
77      RCONbits.IPEN = 1; //Verwendung von priorisierten Interrupts aktivieren
78
79      // interrupt control registers
80      INTCON = 0b10110000;
81      INTCON2 = 0b01110100;
82      INTCON3 = 0b11000000;
83
84      // timer0 control register
85      T0CON = 0b10000010;
86
87      /* ----- end register setup ----- */
88

```

```

89 LCDinit();
90 foo();
91
92 count = 0;
93
94 PORTA = 0x00;
95 PORTB = 0x00;
96 PORTC = 0x00;
97 LATC = 0b00000001;
98
99 DisplayMendo();
100 DisplayRPM();
101
102 while(1)
103 {
104 }
105
106 }
107
108
109 void foo(void) {
110 // nothing
111 int i;
112 for (i = 0; i < 600; i++) {}
113 }
114
115 void DisplayCounter(void)
116 {
117     count = count*6;
118
119     // Hunderter Stelle ausgeben, Tausender auskommentiert
120     Bin2BCD_char(count/100);
121     //LCDwrite(MdD+0x30);
122     LCDwrite(LSD+0x30);
123     // Zehner- und Einserstelle ausgeben
124     Bin2BCD_char(count%100);
125     LCDwrite(MdD+0x30);
126     LCDwrite(LSD+0x30);
127     LCDwrite('_');
128     LCDwrite('r');
129     LCDwrite('p');
130     LCDwrite('m');
131
132 }
133 void DisplayMendo(void)
134 {
135     SetLine(0x80);
136     nop();
137     LCDwrite('M'); //Write into Ram of LCD for display
138     LCDwrite('e'); //Write into Ram of LCD for display
139     LCDwrite('n'); //Write into Ram of LCD for display

```

```

140     LCDwrite('d');           //Write into Ram of LCD for display
141     LCDwrite('o');           //Write into Ram of LCD for display
142     LCDwrite('c');           //Write into Ram of LCD for display
143     LCDwrite('i');           //Write into Ram of LCD for display
144     LCDwrite('n');           //Write into Ram of LCD for display
145     LCDwrite('o');           //Write into Ram of LCD for display
146     LCDwrite('␣');           //Write into Ram of LCD for display
147     LCDwrite('M');           //Write into Ram of LCD for display
148     LCDwrite('o');           //Write into Ram of LCD for display
149     LCDwrite('t');           //Write into Ram of LCD for display
150     LCDwrite('o');           //Write into Ram of LCD for display
151     LCDwrite('r');           //Write into Ram of LCD for display
152 }
153 void DisplayRPM(void)
154 {
155     SetLine(0xC0);
156     LCDwrite('D');           //Write into Ram of LCD for display
157     LCDwrite('r');           //Write into Ram of LCD for display
158     LCDwrite('e');           //Write into Ram of LCD for display
159     LCDwrite('h');           //Write into Ram of LCD for display
160     LCDwrite('z');           //Write into Ram of LCD for display
161     LCDwrite('a');           //Write into Ram of LCD for display
162     LCDwrite('h');           //Write into Ram of LCD for display
163     LCDwrite('l');           //Write into Ram of LCD for display
164     LCDwrite('␣');           //Write into Ram of LCD for display
165 }
166 void Bin2BCD_char(char temp) // Reciev the byte in RAM(temp)
167 {
168     LSD = temp;               // Store the byte in LSD
169
170     // Do repeated subtraction with 100 untill LSD > 100, count interation(MSD)
171     for (MSD = 0 ; LSD >= 100 ; LSD>=100?(LSD -= 100):LSD, MSD++ );
172
173     // Do repeated subtraction with 10 untill LSD > 10, count interation(MsD)
174     for (MdD = 0 ; LSD >= 10 ; LSD>=10?(LSD -= 10):LSD, MdD++);
175 }

```

A.2 LCD-Display Ansteuerung

Listing 2: Die Datei LCD.c [2]

```

1 /*****
2 ; LCD interface on PICDEM 2 PLUS board: (40 PIN REFERENCE)
3 ; PORTA 1, 2, 3 (Pin 3, 4, 5 respectively) are controll lines to LCD
4 ; * PORTA.1 = LCD EN : LCD enable signal
5 ; * PORTA.2 = RD/WR : LCD Read/Write operation, (PORTA.2 == 0 ? Write : Read)
6 ; * PORTA.3 = RS : LCD data/Command, (PORTA.3 == 0 ? Data : Command)
7 ;
8 ; PORTD 0, 1, 2, 3 (Most Significant Bit) are data lines to LCD
9 ; Example: To write a byte
10 ; * Write High Nibbe first to PORTD(3:0)

```

```

11 ;      * Clock EN signal
12 ;      * Write Low Nibble to PORTD(3:0)
13 ;      * Clock EN signal
14 ;
15 *****/
16
17         #include "p18f4580.h"
18         #include "LCD.h"
19
20 unsigned char Most_Sig_Byte,Middle_Sig_Byte,Least_Sig_Byte;
21 /*****
22 * Function:          void LCDinit(void)
23 *
24 * PreCondition:    None
25 *
26 * Input:           None
27 *
28 * Output:         None
29 *
30 * Side Effects:   None
31 *
32 * Overview:       This function will perform necessary enumeration to LCD
33 *                   for display and communication with the PIC
34 *                   Refer to LCD data sheet for more information.
35 *
36 *
37 *
38 * Note:            All delay functions written here for 10.000000 MHz Clock
39 *                   If using any other speed please tune the delay function
40 *                   appropriately
41 *****/
42
43
44 void LCDinit(void)
45 {
46     PORTA = 0x00;      // Clear Control port
47     LATA = 0x00;      // and its corresponding Latch
48     TRISA = 0x01;     // Make PORTA as output port
49     ADCON1 = 0x0E;    // Make PORTA as digital I/O
50     // This is done here assuming application code may be using PORTA of Analog application.
51
52     _delay(4);        //
53     _delay(4);        //
54     _delay(4);        // ~15 ms delay
55
56     //foo();          // 15 ms delay
57
58
59     WriteNibble(0x30); // #1 control byte
60     _delay(4);
61     //nop();

```

```

62     //nop();
63     //nop();      // 3*1.5 = 4.5 ms delay
64
65     WriteNibble(0x30); // #2 control byte
66
67     _delay_100us();
68     //nop();      // 100us required
69
70
71     WriteNibble(0x30); // #3 control byte
72     _delay_100us();
73     //nop();      // 100us required
74
75     WriteNibble(0x20); // #4 control sets 4 bit mode
76     _delay_100us();
77     //nop();      // 100us required
78
79     Check_LCDBusy(); // Check whther LCD is free to continue operation
80
81     FunctionSet(0x28); // #5 control byte Function set
82
83     DisplayON (0x0D); // Turn on Display
84
85     DisplayClr (0x01); // Clear Display (clears junk if any)
86
87     EntryMode(0x06); // Entry mode selection
88
89     DDRAMads(0x80); // Initialise DDRAM address to 80h.
90
91 } // LCD Init ends
92
93
94
95 /*****
96 * Function:      void WriteNibble(unsigned char data)
97 *
98 * PreCondition:  None
99 *
100 * Input:        8 bits value (These values are used to command LCD for an action)
101 *
102 * Output:       None
103 *
104 * Side Effects : None
105 *
106 * Overview:     RS line of LCD is driven low to indicate LCD to accept a command.
107 *               Write Hi Nibble first
108 *               Then Low Nibble
109 *
110 *
111 *
112 * Note:         This function is only for command (Many functions found in this file

```

```

113 *           are similar, only function name are different, for Demo and Clarity
114 *           sake it is not been optimized.)
115 *****/
116
117
118 void WriteNibble(unsigned char data)
119 {
120     unsigned char temp = 0;
121     LATA = 0x00; // RS = 0; // RW = 0;
122     TRISD &= 0xF0; // Make output;
123     nop();
124     nop();
125
126     temp = data>>4; // Take High Nibble
127     temp &= 0x0F;
128
129     LATA |= 0x02; // LCD_EN = 1;
130     LATD = temp; // Write High Nibble to PORTD (LATD)
131     nop();
132     nop();
133     nop();
134     LATA &= 0x00; // LCD_EN = 0;
135
136     // NOTE: Since low Nibble is zero and also
137     // LCD will write always first to High Nibble and Low nibble will be zero unless written
138
139 }
140 /*****/
141 * Function:           void WriteNibble(unsigned char data)
142 *
143 * PreCondition:      None
144 *
145 * Input:             8 bits value (These values are used to Display on LCD segment)
146 *
147 * Output:           None
148 *
149 * Side Effects :    None
150 *
151 * Overview:         RS line of LCD is driven Hi to indicate LCD to accept a Character
152 *                  to display on LCD.
153 *                  Write Hi Nibble first .
154 *                  Then Low Nibble.
155 *
156 *
157 *
158 * Note:             This function is only for Data to be displayed on LCD
159 *                  (Many functions found in this file –
160 *                  are similar, only function name are different, for Demo and Clarity
161 *                  sake it is not been optimized.)
162 *****/
163 void WriteNibbleRS_H(unsigned char data)

```

```

164 {
165     unsigned char temp = 0;
166     LATA = 0x08; // RS = 1; // RW = 0;
167     LATD = 00;
168     TRISD &= 0xF0; // Make output;
169     nop();
170     nop();
171     temp = data>>4;
172     temp &= 0x0F;
173
174     LATA |= 0x02; // LCD_EN = 1;
175     LATD = temp;
176     nop();
177     nop();
178     nop();
179     LATA &= 0x08; // LCD_EN = 0;
180
181 }
182 /*****
183 * Function:          void Check_LCDBusy(void)
184 *
185 * PreCondition:    None
186 *
187 * Input:           None
188 *
189 * Output:          None
190 *
191 * Side Effects:   None
192 *
193 * Overview:       This function will read LCD to find whether LCD is Busy or free.
194 *                   This function will wait until LCD becomes free.
195 *
196 *
197 *
198 *
199 * Note:            None
200 *****/
201 void Check_LCDBusy(void)
202 {
203     unsigned char BUSY = 0, temp = 0;
204     loop:
205     TRISD |= 0x0F; //Make Data to read mode
206     // PORTA = 0x00; // RS = 0
207     LATA = 0x04; //RW = 1
208     nop();
209     nop();
210     LATA |= 0x02; // LCD_EN = 1;
211     nop();
212     nop();
213     nop();
214     nop();

```

```

215 //Read HIGH Nibble
216 temp = PORTD<<4;
217 LATA = 0x04; // LCD_EN = 0;
218 nop();
219 nop();
220 nop();
221 nop();
222 nop();
223 nop();
224 nop();
225 nop();
226 LATA |= 0x02; // LCD_EN = 1;
227 nop();
228 nop();
229
230 //Read LOW Nibble
231
232 BUSY = PORTD;
233 BUSY |= temp;
234 BUSY &= 0x80;
235
236 if (BUSY != 0) goto loop;
237
238 }
239 /*****
240         function set
241 *****/
242 void FunctionSet(unsigned char temp)
243
244 {
245     unsigned char i = 0;
246
247     i = temp;
248     i &= 0xF0;
249     WriteNibble(i);
250     i = temp<<4;
251     i &= 0xF0;
252     WriteNibble(i);
253 }
254 /*****
255         Dsplay On
256 *****/
257 void DisplayON(unsigned char temp)
258
259 {
260     unsigned char i = 0;
261
262     i = temp;
263     i &= 0xF0;
264     WriteNibble(i);
265     i = temp<<4;

```

```

266     i &= 0xF0;
267     WriteNibble(i);
268 }
269
270 /*****
271         Dsplay Clear
272 *****/
273 void DisplayClr(unsigned char temp)
274
275 {
276     unsigned char i = 0;
277
278     i = temp;
279     i &= 0xF0;
280     WriteNibble(i);
281     i = temp<<4;
282     i &= 0xF0;
283     WriteNibble(i);
284 }
285
286 /*****
287         ENTRY Mode
288 *****/
289 void EntryMode(unsigned char temp)
290
291 {
292     unsigned char i = 0;
293
294     i = temp;
295     i &= 0xF0;
296     WriteNibble(i);
297     i = temp<<4;
298     i &= 0xF0;
299     WriteNibble(i);
300 }
301 /*****
302         DDRAM address
303 *****/
304 void DDRAMadrs(unsigned char temp)
305
306 {
307     unsigned char i = 0;
308
309     i = temp;
310     i &= 0xF0;
311     WriteNibble(i);
312     i = temp<<4;
313     i &= 0xF0;
314     WriteNibble(i);
315 }
316 /*****

```

```

317 LCD write
318 *****/
319 void LCDwrite(unsigned char temp)
320
321 {
322     unsigned char i = 0;
323     Check_LCDBusy(); // Check this spoint
324     i = temp;
325     i &= 0xF0;
326     WriteNibbleRS_H(i);
327     i = temp<<4;
328     i &= 0xF0;
329     WriteNibbleRS_H(i);
330 }
331 *****
332 Set LCD line [ For Line 1: temp = 0x80h; Line 2: temp = C0h
333 *****/
334 void SetLine(unsigned char temp)
335
336 {
337     unsigned static char i = 0;
338     Check_LCDBusy(); // Check this spoint
339     i = temp;
340     i &= 0xF0;
341     WriteNibble(i);
342     i = temp<<4;
343     i &= 0xF0;
344     WriteNibble(i);
345 }
346
347
348 *****
349 100 micro sec delay loop
350 *****/
351 void _delay_100us()
352 {
353
354     int i;
355
356     for (i = 0; i < 18*4; i++);
357         //nop();
358         //nop();
359         //nop();
360
361 }
362 *****
363 Variable delay in ms
364 *****/
365 void _delay(unsigned int temp)
366 {
367     int i;

```

```

368
369     for (i = 0; i < 800*8*temp; i++);
370         //nop();
371 }
372
373 /*****
374     NOP
375 *****/
376 void nop ()
377 {
378 }
379 /*****
380     cursor set
381 *****/
382 void set_curser(unsigned char temp)
383
384 {
385     unsigned char i = 0;
386     Check_LCDBusy(); // Check this spoint
387     i = temp;
388     i &= 0xF0;
389     WriteNibble(i);
390     i = temp<<4;
391     i &= 0xF0;
392     WriteNibble(i);
393 }
394 /*****
395     Cursor ON or OFF
396 *****/
397 void curser_ONOFF(unsigned char temp)
398
399 {
400     unsigned char i = 0;
401
402     i = temp;
403     i &= 0xF0;
404     WriteNibble(i);
405     i = temp<<4;
406     i &= 0xF0;
407     WriteNibble(i);
408 }
409 /*****
410     Description:
411     – This function will convert 8 bit Binay to 3 digit BCD
412     – This function uses repeated subtraction method
413         1. Subtract Byte with 100 until byte is greater than 100, count number of iterations (Gives Most_Sig_Byt
414         2. Then subtract with 10 until byte is greater than 10, count number of interations (Gives Middle_Sig_By
415         3. Then the remainder is unit (Gives Least_Sig_Byte)
416         4. Then convert all value to respective ASCII (by adding 0x30) to display on LCD
417 *****/
418

```

```

419 void Bin2BCD (unsigned char temp)
420 {
421     Least_Sig_Byte = temp;
422     for (Most_Sig_Byte = 0 ; Least_Sig_Byte >= 100 ; Least_Sig_Byte>=100?(Least_Sig_Byte -= 100):Least_Sig_Byte)
423     for (Middle_Sig_Byte = 0 ; Least_Sig_Byte >= 10 ; Least_Sig_Byte>=10?(Least_Sig_Byte -= 10):Least_Sig_Byte)
424         Middle_Sig_Byte++;
425     Most_Sig_Byte += 0x30;
426     Middle_Sig_Byte += 0x30;
427     Least_Sig_Byte += 0x30;
428 }
429
430 /*****
431      E N D of LCD.C
432 *****/

```

Listing 3: Die Datei LCD.h [2]

```

1  #ifndef LCD_H
2  #define LCD_H
3
4
5  extern void LCDinit(void);
6  extern void LCDSupportfn(unsigned char);
7
8  extern void display(unsigned char, unsigned char); //Displays PR2, and DC on LCD
9  /*****
10
11
12  /** P R O T O T Y P E S *****/
13  void LCDinit(void); // This will initialise LCD module, Configures LCD for 4 bit interface
14  void WriteNibble(unsigned char); // Used to write command (RS = 0), writes in Nibbles since it is 4 bit i
15  void WriteNibbleRS_H(unsigned char); // Used to write Data to LCD (RS = 1), writes in Nibbles as above
16  void Check_LCDBusy(void); // Reads LCD to check busy before proceeding to next write operation
17  void _delay(unsigned int); // delay function in milliseconds.(NOTE: 1msec is tuned for 10MHz crystal)
18  void _delay_100us(void); // 100 microsec delay for LCD operation
19  void FunctionSet(unsigned char); // Function set for LCD initialisation, 4 bit mode
20  void DisplayON(unsigned char); // Turns on LCD
21  void DisplayClr(unsigned char); // Clears Display
22  void LCDwrite(unsigned char); // Writes DATA to LCD
23  void EntryMode(unsigned char); // Entry Mode selection
24  void DDRAMadrs(unsigned char); // DDRAM address selection
25  void SetLine(unsigned char); // LCD line selection
26  void nop(void); // NOP
27  void curser_ONOFF(unsigned char ); // Cursor ON or OFF controll
28  void set_curser(unsigned char); // Cursor position set (Sets cursor position based on the command valu
29
30 // NOTE: For more information on LCD
31 // NOTE: All the discrete functions can
32 // For clarity sake many functions are p
33 void Bin2BCD (unsigned char); // Coverts Binary Value to BCD and ASCII for LCD
34 void display_result_on_lcd(unsigned int result1); //display integer result on lcd

```

```

35 void Bin2BCD_char(char temp) ;
36 void Timer(void);
37 void DisplayDate(char day, char month, char year);
38 void DisplayTime(char hours, char minutes, char seconds,char milli_secs );
39
40 extern unsigned int msec, sec, min, hr,MSD, MdD, LSD;
41 extern char day,month,year;
42 /*****
43 extern void delay(void);
44 /*****V A R I A B L E S*****/
45 extern unsigned char Most_Sig_Byte,Middle_Sig_Byte,Least_Sig_Byte;
46
47 void LCDSupportfn(unsigned char);
48 void text_display(unsigned char*); // Displays string of data on LCD
49 void display(unsigned char, unsigned char); //Displays PR2, and DC on LCD
50 void ACQ_delay(void); // Not used in this application, kept for future reference.
51
52 /*****
53 External Definitions // See LCD.C for details
54 *****/
55 extern void LCDinit(void);
56 extern void text_display(unsigned char*); // Displays string of data on LCD
57 extern void Bin2BCD(unsigned char); // Converts 8 bit Binary to 3 digit BCD
58 extern void DisplayClr(unsigned char); // Clears Display
59 extern void LCDwrite(unsigned char); // Writes DATA to LCD
60 extern void set_curser(unsigned char); // Cursor position set (Sets cursor position based on the comm
61 extern void SetLine(unsigned char); // LCD line selection
62
63 /*****
64
65
66 *****/
67
68 #endif

```

B MATLAB Auswertungen

B.1 Auslaufversuch

Hier sind die Quelltext-Dateien für die Auswertung der Messergebnisse des Auslaufversuchs mit MATLAB beschrieben.

Listing 4: Die Datei auswertungAuslaufversuch.m

```
1 clc; clear all;
2 close all
3 load messung4kant.mat % 4kant
4 load messung1.mat    % 6kant
5 load messung2.mat    % 6kant
6
7 J1 = 2.2561413*1e-4; % J1 -- 4kant
8 J2 = 1.9127938*1e-4; % J2 -- 6kant
9 N1 = find(out3>0,1); % Messbeginn
10 N2 = 11;
11 N3 = find(out2>0,1);
12
13 % zeit und winkelgeschwindigkeit
14 t1 = outT3(N1:end-N2); % [t] = s
15 w1 = out3(N1:end-N2)*2*pi; % [w] = rad/s
16
17 t2 = outT2(N3:end);
18 w2 = out2(N3:end)*2*pi;
19
20
21 omega = [0];
22 moment = [0];
23
24 figure(1)
25 plot(t1,w1,'LineWidth',2)
26 grid on
27 hold on
28 xlabel('Zeit_in_s')
29 ylabel('Winkelgeschwindigkeit_in_rad/s')
30 title('Auslaufversuch_4kant')
31 %xlim([0 110])
32
33
34 %% 4 kant Rotor
35
36 % waehle Datensaeetze
37 n1 = 3;
38 n2 = 15;
39 n3 = 28;
40 n4 = 40;
41 n5 = 48;
42 n6 = 58;
```

```

43 n7 = 65;
44 n8 = 75;
45 n9 = 78;
46 n10 = 88;
47 n11 = 95;
48 n12 = 105;
49 n13 = 115;
50 n14 = 125;
51 n15 = 140;
52 n16 = 148;
53 n17 = 155;
54 n18 = 162;
55
56 tp = [t1(n1:n2),t1(n3:n4),t1(n5:n6),t1(n7:n8),t1(n9:10),t1(n11:n12),t1(n13:n14),t1(n15:n16),t1(n17:n18)];
57 wp = [w1(n1:n2),w1(n3:n4),w1(n5:n6),w1(n7:n8),w1(n9:10),w1(n11:n12),w1(n13:n14),w1(n15:n16),w1(n17:n18)];
58 n = [n1,n2,n3,n4,n5,n6,n7,n8,n9,n10,n11,n12,n13,n14,n15,n16,n17,n18];
59
60 % berechne Tangenten und Momentenwerte
61 for i=1:length(n)/2
62     omega(i) = mean(w1(n(2*i-1):n(2*i)));
63     pk = polyfit(t1(n(2*i-1):n(2*i)),w1(n(2*i-1):n(2*i)),1);
64     moment(i) = pk(1)*J1;
65 end
66
67 plot(tp, wp,'r+')
68 legend('\omega_{Rotor}','Messpunkte')
69 ylim([0 30])
70
71 % interpolationsfunktion
72 modelfun = @(p,x) p(1).*x.^2 + p(2).*x;
73 BETA = NLINFIT(omega,-moment,modelfun,[1,1])
74 momentFit = modelfun(BETA, 1:1:max(omega));
75
76 % interpolation - rein quadratisch
77 modelfunQ = @(p,x) p(1).*x.^2;
78 BETAQ = NLINFIT(omega,-moment,modelfunQ,[1])
79 momentFitQ = modelfunQ(BETAQ, 1:1:max(omega));
80
81 % zeichne Widerstandskennlinie
82 figure(2)
83 plot(omega,-moment,'b*')
84 hold on
85 grid on
86 plot(1:1:max(omega), momentFit)
87 title('Widerstandsmoment_4kant_Rotor')
88 xlabel('\omega_in_rad/s')
89 ylabel('Moment_in_Nm')
90 legend('Messwerte','Interpolation','location','NorthWest')
91
92
93 %% 6 kant Rotor

```

```

94
95 % waehle Datensaeetze
96 m1 = 21;
97 m2 = 40;
98 m3 = 70;
99 m4 = 90;
100 m5 = 130;
101 m6 = 150;
102 m7 = 191;
103 m8 = 207;
104 m9 = 240;
105 m10 = 255;
106 m11 = 290;
107 m12 = 305;
108 m13 = 335;
109 m14 = 345;
110 m15 = 370;
111 m16 = 380;
112 m17 = 400;
113 m18 = 415;
114 m19 = 425;
115 m20 = 433;
116 m21 = 440;
117 m22 = 446;
118
119 m = [m1,m2,m3,m4,m5,m6,m7,m8,m9,m10,m11,m12,m13,m14,m15,m16,m17,m18,m19,m20,m21,m22];
120 tp2 = [t2(m1:m2),t2(m3:m4),t2(m5:m6),t2(m7:m8),t2(m9:m10),t2(m11:m12),t2(m13:m14),t2(m15:m16),...
121         t2(m17:m18),t2(m19:m20),t2(m21:m22)];
122 wp2 = [w2(m1:m2),w2(m3:m4),w2(m5:m6),w2(m7:m8),w2(m9:m10),w2(m11:m12),w2(m13:m14),w2(m15:m16),...
123         w2(m17:m18),w2(m19:m20),w2(m21:m22)];
124
125 omega6 = [0];
126 moment6 = [0];
127
128 % berechne Tangenten und Momentenwerte
129 for i=1:length(m)/2
130     omega6(i) = mean(w2(m(2*i-1):m(2*i)));
131     pk = polyfit(t2(m(2*i-1):m(2*i)),w2(m(2*i-1):m(2*i)),1);
132     moment6(i) = pk(1)*J2;
133 end
134
135 %%
136 figure(3)
137 plot(t2,w2)
138 hold on
139 grid on
140 title('Auslaufversuch_6kant')
141 plot(tp2, wp2,'r+')
142
143 % interpolationsfunktion
144 modelfun = @(p,x) p(1).*x.^2 + p(2).*x;

```

```

145 BETA = NLINFIT(omega6,-moment6,modelfun,[1,1])
146 moment6Fit = modelfun(BETA, 1:1:max(omega6));
147
148 % interpolation – rein quadratisch
149 modelfunQ = @(p,x) p(1).*x.^2;
150 BETAQ = NLINFIT(omega6,-moment6,modelfunQ,[1])
151 moment6FitQ = modelfunQ(BETAQ, 1:1:max(omega6));
152
153 % zeichne Widerstandskennlinie
154 figure(4)
155 plot(omega6, -moment6,'b*')
156 grid on
157 hold on
158 xlim([0 60])
159 plot(1:1:max(omega6),moment6Fit)
160 title('Widerstandsmoment_6kant_Rotor')
161 xlabel('\omega_in_rad/s')
162 ylabel('Moment_in_Nm')
163 legend('Messwerte','Interpolation','location','NorthWest')
164
165 % zeichne Widerstandskennlinien
166 figure(5)
167 plot(omega, -moment,'b*')
168 hold on
169 grid on
170 plot(omega6, -moment6,'ro')
171 plot(1:1:max(omega), momentFit,'b--')
172 plot(1:1:max(omega6),moment6Fit,'r--')
173 %plot(1:1:max(omega), momentFitQ,'b.')
174 plot(1:1:max(omega6),moment6FitQ,'r.')
175 legend('4_kant','6_kant','Interpolation','Interpolation','Interpolation_rein_quadratisch','location','NorthWest')
176 title('Widerstandsmoment_Vergleich')
177 xlabel('\omega_in_rad/s')
178 ylabel('Moment_in_Nm')
179 ylim([0, 3*1e-4])
180 saveas(gcf,'img_momentenverlaufVergleich.eps','psc2')

```

B.2 Lagerkraftsimulation

Hier ist das MATLAB-Skript zur Auswertung der Simulationsergebnisse für die Lagerkraft angeführt.

Listing 5: Die Datei lagerkraftAuswertung.m

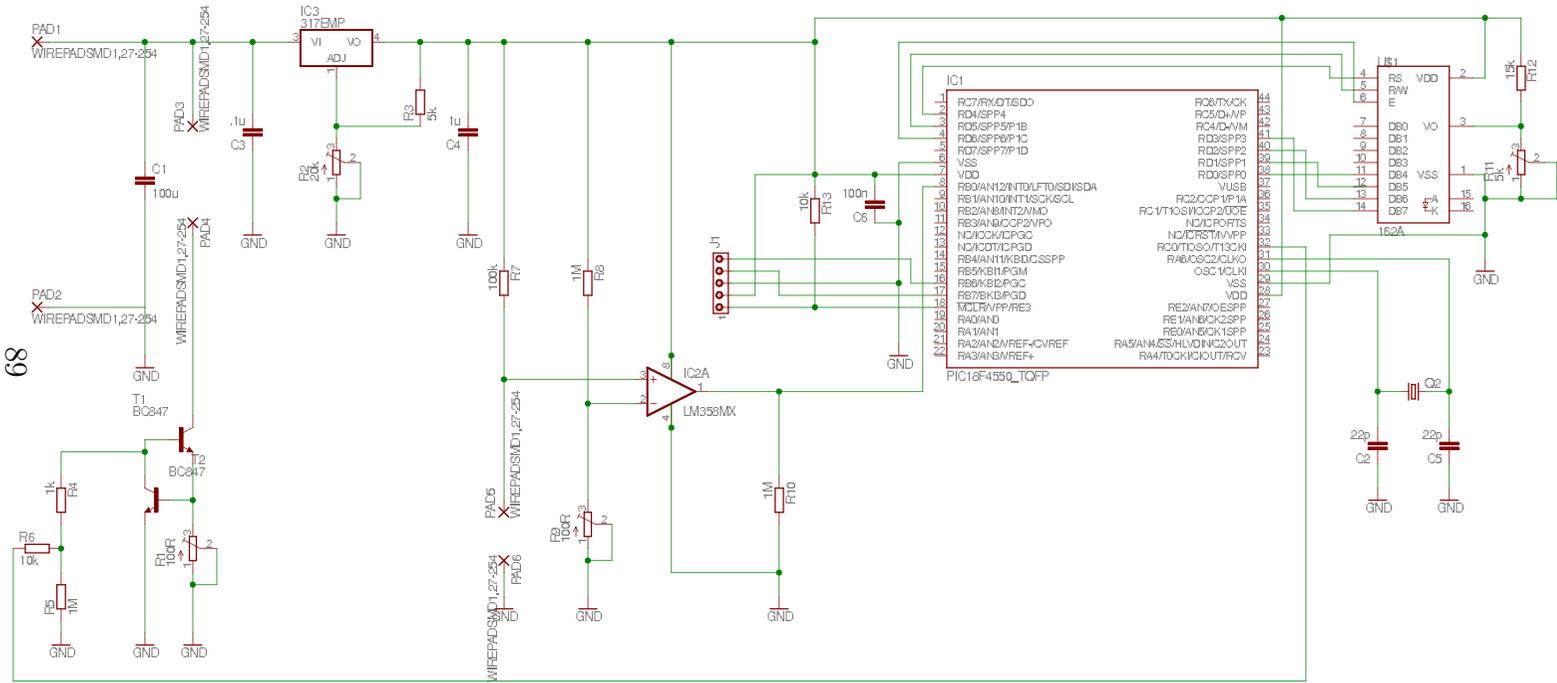
```

1 % Auswertung der Lagerkraftsimulation
2 clear all
3 close all
4 clc
5
6 tmp = importdata('H32.txt');

```

```
7 data = tmp.data(1,:);
8
9 n = length(data);
10
11 xDat = data(1:2:n-1)-30;
12 yDat = data(2:2:n);
13
14
15 %% nicht lineare Interpolation
16
17 modelFun = @(p,x) p(1)/(x.^2+p(2));
18 beta0 = [1 1];
19 beta = nlinfit(xDat, yDat, modelFun, beta0);
20
21 yDatInterp = modelFun(beta,xDat);
22
23
24 %% graphische Ausgabe
25
26 figure(1)
27 hold on
28 grid on
29 plot(xDat,yDat,'b+', 'LineWidth',2)
30 plot(xDat,yDatInterp,'r', 'LineWidth',2)
31 legend('Simulationsdaten','Interpolation', 'location', 'NorthEast')
32 xlim([0, 50])
33 xlabel('h_in_mm')
34 ylabel('Kraft_in_N')
35 title('Lagerkraft-Kennlinie')
36 saveas(gcf, 'lagerkraftKennlinie.eps', 'psc2')
```


C Schaltung



89

Abbildung 57: Schaltung

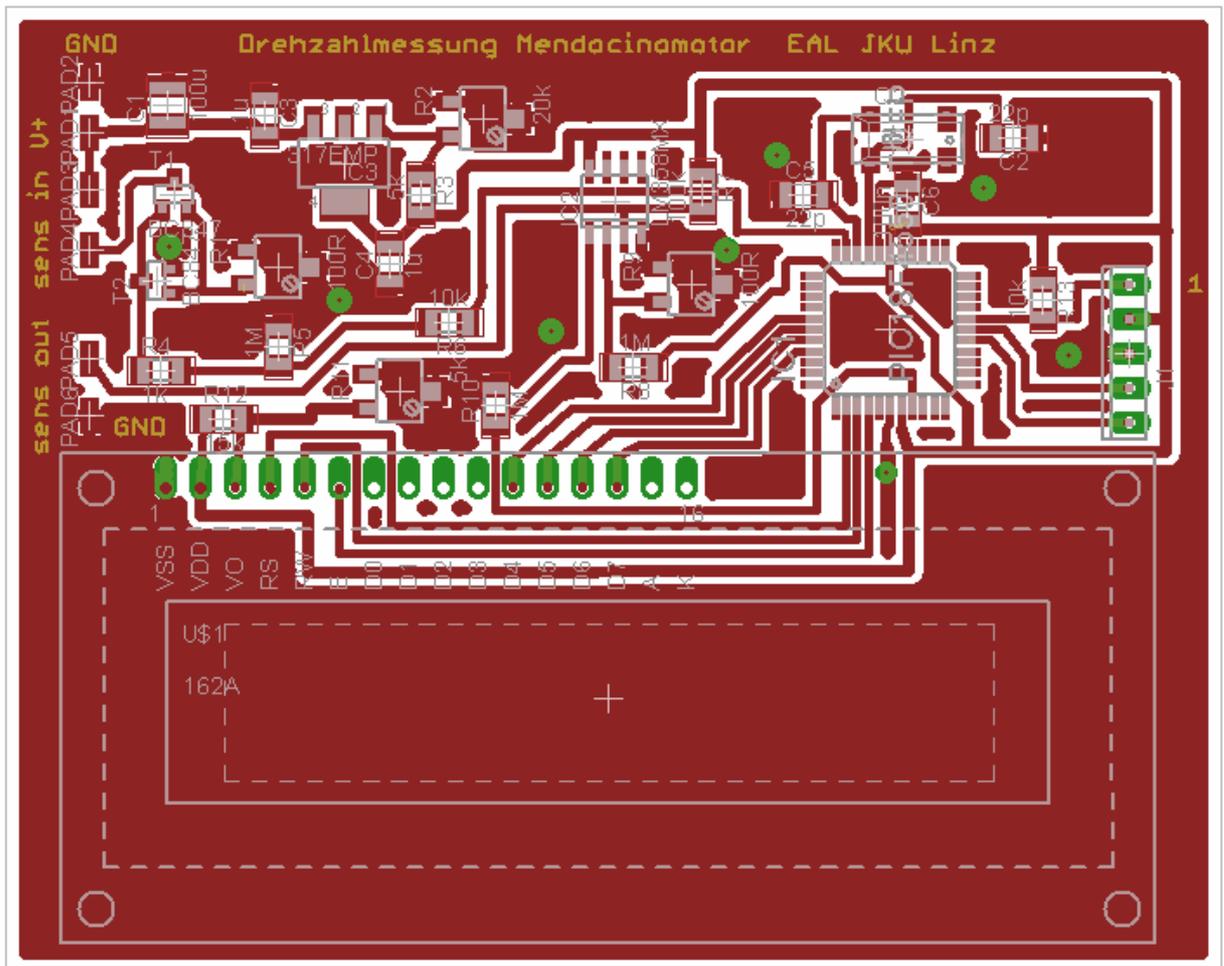


Abbildung 58: Layout