

Diplomarbeit

SAVONIUSROTOR MIT

MAXIMUM POWER POINT TRACKER

Ausgeführt an der Höheren Technischen Bundeslehranstalt Wien 3 Rennweg
Abteilung für Mechatronik

durch

Daniel Grohs

Harald Lerch

Koloman Klimpfinger

Patrick Redl

unter der Leitung von

DI Martin Meschik

DI Karl Allabauer

Wien, März 2006

Eidesstattliche Erklärung

Wir erklären an Eides statt, dass wir die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst haben.

Andere als die angegebenen Quellen wurden nicht benützt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen haben wir als solche kenntlich gemacht.

Wien am 30. März 2006

Kurzfassung

Grundidee der Diplomarbeit war die optimale Nutzung eines Savoniusrotors als alternative Energiequelle zum Laden eines Akkumulators über einen Maximum Power Point Tracker (MPPT).

Der Savoniusrotor besteht aus zwei S-förmig angeordneten Rohrhälften, die um 20% zueinander versetzt sind. Um den Rotor windrichtungsunabhängiger und leistungsfähiger zu machen, wird ein weiteres Rotorpaar, um 90° verdreht, darüber angebracht. Mit der aus dem Wind gewonnenen Energie treibt der Rotor einen Gleichstromgenerator an um elektrischen Strom zu erzeugen.

Der Maximum Power Point Tracker besteht aus einem Step Up Converter und einem Mikrokontroller, der diesen überwacht und regelt. Der Step Up Converter wandelt die nicht konstante geringe Eingangsspannung auf einen höheren Ausgangswert, um einen 24 Volt Bleigel-Akkumulator zu laden. Der Mikrokontroller misst mit seiner Sensorperipherie die Ein- und Ausgangsströme und Spannungen um die in den Akku geladene Leistung zu bestimmen und durch den Vergleich mit dem vorherigen Wert den Schaltvorgang im Step Up Converter und damit die Belastung des Savoniusrotors passend zur Windstärke zu optimieren.

Abstract

The basic idea of this thesis was to find the best possible way of using a Savonius-rotor as an alternative energy resource for charging an accumulator by means of a Maximum Power Point Tracker (MPPT).

The Savonius-rotor consists of two halves of a pipe, 20% shifted and arranged in an S-shaped way. To make the rotor more independent of the wind direction and increasingly powerful, a further rotor pair, rotated 90 degrees, is attached on top of the first (one). With the energy produced by the wind, the rotor impels a direct current generator that produces electricity.

The Maximum Power Point Tracker consists of a step-up-converter that is controlled by a microcontroller. The step-up-converter converts the non-continuous low level input voltage into a higher level output voltage to charge a 24 Volt lead-gel-accumulator. The microcontroller, by means of its sensor periphery, measures the input and output currents and voltages to identify the capacity that is charged into the accumulator. By comparing this value with the capacity's earlier value, the microcontroller optimises the step-up-converter's switching operation and this way also the Savonius-rotor's load in relation to the wind strength.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	8
1.1.	Idee	8
1.2.	Motivation	8
1.3.	Ziele	9
2.	Model.....	10
2.1.	Zielsetzung	10
2.2.	Konstruktion	10
2.2.1	Gestell	10
2.2.2	Rotor.....	10
2.2.3	Welle	12
2.2.4	Windleitschaufeln	13
2.3.	Fertigung.....	15
2.3.1	Gestell	15
2.3.2	Rotor.....	15
2.3.3	Windleitschaufeln	15
2.4.	Windkanal	15
2.5.	Messungen	15
3.	Savonius oben ohne	16
3.1.	Planung.....	16
3.1.1	Rotor.....	16
3.1.2	Gestell	20
3.1.3	Generator	21
3.2.	Berechnung	22
3.2.1	Strömungswiderstand.....	22
3.2.2	Lagerberechnung	23
3.2.3	Festigkeitsberechnungen.....	26
3.2.4	Leistungsberechnung	28
3.2.5	Generator	28
3.3.	Fertigung.....	29
3.3.1	Der Rotor	29
3.3.2	Welle	31
3.3.3	Das Gestell	33
3.3.4	Montage	36
3.3.5	Endmontage	38
4.	Der Maximum Power Point Tracker	39
4.1.	Allgemeines / Prinzip	39

4.2.	Der Step-Up Converter	41
4.2.1	Prinzip des Step Up Converters	41
4.2.2	Dimensionierung.....	44
4.3.	Beschreibung des MPPT – Schaltungsaufbau.....	47
4.3.1	Anforderungen.....	47
4.3.2	PIC-Versorgung LT1129 – Quarz	48
4.3.3	Berechnungen Spannungsregler LT1129:.....	48
4.3.4	Messung.....	50
4.3.5	Transistorsteuerung.....	52
4.3.6	RS-232 – DS-275	52
4.3.7	ICD2 & Sonstiges	53
4.4.	Platinenlayout	54
4.4.1	Layout.....	54
4.4.2	Fertigung der Leiterplatte	56
4.4.3	Schrittweise Inbetriebnahme der Leiterplatte.....	58
4.5.	Programm	60
4.5.1	Aufgaben	60
4.5.2	Hauptprogramm.....	61
4.5.3	Unterprogramme	62
5.	Verzeichnisse	64
5.1.	Quellenverzeichnis.....	64
5.2.	Abbildungsverzeichnis	65
5.3.	Tabellenverzeichnis	67

ANHANG	68
Anhang A: Genehmigung der Diplomarbeit	68
Anhang B: Terminplan	68
Anhang C: Projektkosten	68
Anhang D: Konstruktionszeichnungen	68
Anhang E: Schaltplan	68
Anhang F: Platinenlayout	68
Anhang G: Datenblätter	73
Anhang H: Programmlisting	73
Anhang I: Bauteillisten	73
Anhang J: Glossar	73
Anhang K: Erweiterungsüberlegungen	73
Anhang L: Sponsoren	73

Beilage: 1 HD-DVD

Datei-Info:

Dateiname: **DA_Savonius_ZA2.doc**

Speicherdatum: 30. März 2006

Druckdatum: 30. März 2006

Seitenanzahl: 73

Pfad: E:\Dokumente und Einstellungen\kolo\Desktop\DA_Savonius_ZA2.doc

1. Einleitung

1.1. Idee

Grundidee der Diplomarbeit ist die optimale Nutzung eines Savoniusrotors als alternative Energiequelle zum Laden eines Akkumulators über einen Maximum Power Point Tracker (MPPT). Ein Savonius Rotor eignet sich ideal zur dezentralen Stromversorgung von kleinen Haushalten oder Betrieben. Zum Beispiel könnte der Savonius Rotor in Ländern der Dritten Welt aufgestellt werden, um Werkstätten oder Arztpraxen mit Strom zu versorgen. Aber auch in gebirgigen Gebieten, in denen Stromverbindungen nur schwer verlegt werden können, wäre der Savonius äußerst praktisch.

Durch seine um ca. 20% zueinander versetzten Rohrhälften, die er als Windschaufeln verwendet wird der Savonius zu einem windrichtungsunabhängigen Rotor. Zur Leistungssteigerung kann man ein dazu 90° verdrehtes zweites Hälftenpaar darunter hinzufügen. Die Rotorblätter sind fest mit einer vertikalen Welle verbunden, welche einen Generator antreibt.

Um die maximale Leistung des Aufbaus über einen geeigneten Spannungswandler an den Verbraucher zu übertragen, wird ein Maximum Power Point Tracker (MPPT) verwendet. Dieser regelt Innenwiderstand des Wandlers so, dass der Savoniusrotor immer im Maximum Power Point betrieben wird.

1.2. Motivation

Die aktuelle prekäre Lage in der Treibstoffpolitik treibt auch die Strompreise in die Höhe. Die CO₂ Emissionen nehmen ständig zu und verursachen verheerende Katastrophen. Es besteht ganz klar Handlungsbedarf. Da wir selbst über den derzeitigen Trend zur Zerstörung der Umwelt besorgt sind und auch in 20 Jahren noch frische Luft atmen wollen, ist es uns ein großes Anliegen eine Energiegewinnungsanlage im Einklang mit der Natur zu entwickeln. Schon früh in der Geschichte der Menschheit nutzte man die Kraft des Windes aus, doch um konkurrenzfähig zu den anderen oftmals fossilen Energieträgern zu bleiben, muss die Leistung optimal genutzt werden. Mit diesem Ziel vor Augen versuchen wir ein Gerät zu konstruieren, das auch in dezentral gelegenen Gebieten errichtet werden kann und Strom liefert, indem die Windenergie, dank einer intelligenten Steuerung, optimal ausgenutzt wird. So waren wir sicher, mit dem Abschluss unserer Diplomarbeit nicht nur etwas zur Beendigung unserer Ausbildung beizutragen, sondern auch etwas für unsere, eine auch weiterhin lebenswerte und intakte Umwelt getan zu haben.

1.3. Ziele

Mussziele: Eines der Mussziele ist, den Rotor zu optimieren. Dazu soll ein Modell entworfen werden und im Windkanal getestet werden. Am Modell wird die optimale Rotorform und -stellung ermittelt. Ein weiterer Bestandteil der Diplomarbeit ist der Maximum Power Point Tracker, dieser muss entworfen und dimensioniert werden, um die maximal mögliche Leistung in einen Akkumulator zu speisen.

Sollziele: Wenn möglich soll der Aufbau so entwickelt werden, dass er leicht transportiert werden kann. Außerdem sollte der Rotor möglichst leise laufen. (verbesserte Lagerung)

Kannziele: Weiters könnte eine Schaltungserweiterung eingebaut werden die es ermöglicht zwischen verschiedenen Spannungen umzuschalten um verschiedene Akkus zu laden. Außerdem wäre als weiteres Feature der Einbau einer Akkuladestandsanzeige denkbar. Abschließend bestünde die Möglichkeit auch die Einspeisung in Stromnetz durchzuführen.

Nichtziele: Nichtziel ist es die Anlage für Gewerbliche- oder Industriebetrieb zu dimensionieren.

2. Model

2.1. Zielsetzung

Der Grundgedanke unseres Modells war es, die optimale Stellung der Windleitschaufeln herauszufinden und sich mit dem Savoniusrotor zu beschäftigen.

Um den größtmöglichen Wirkungsgrad für den mechanischen Aufbau des Savoniusrotors zu erreichen, ergab sich die Notwendigkeit zunächst ein Model zu bauen. Dieses musste in keinem Maßstab zur großen Anlage stehen, sollte aber wichtige Eigenschaften, wie einen passenden Versatz und dem Verhältnis von Welle und Versatz, trotzdem erfüllen. Wie das „Original“, war auch das Model 2-stufig zu konzipieren.

Weiters waren wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung der großen, Strom erzeugenden Anlage, in Bezug auf die Lagerung, Rotoren, allgemeinem Aufbau, Gestell und Dimensionierung zu erwarten.

2.2. Konstruktion

2.2.1 Gestell

Das Gestell sollte möglichst eine solide Basis für den Savoniusrotor liefern und den Rotor in etwas erhöhte Position bringen, da der Wind am Boden durch die Reibung gebremst wird. Trotzdem sollte es preisgünstig, leicht zerlegbar und somit transportabel sein. Das Gestell sollte aus einem Staffelh Holz gefertigt werden, da dieses sehr preiswert ist. Um es nicht nieder spannen zu müssen, sollte das Modell auf zwei 1000 Millimeter langen Füßen stehen. An Problemstellen, wie der Verbindung von Beinen und Füßen sollten wurden Verstrebungen eingeplant. Um die Stabilität des Modells zu fördern wurde es beidseitig gelagert und an den beiden Lagerpunkten mussten Vertiefungen für die Kugellager ins Gestell geschnitten werden.

[Bild]

Abb. 1 Das konstruierte Gestell

2.2.2 Rotor

Um den Rotor bestmöglich optimieren zu können, bestand die Idee, dass Model so zu bauen, dass die Überschneidung der Rotorblätter stufenlos verändert werden können sollte. Das sollte durch Langlöcher im oberen und unteren Teller realisiert werden. Die, an die Rohrhälften angeschweißten Böden wären dann durch Muttern und

Schrauben and die Teller montiert worden. Die Vorteile dieses Lösungsweges wären, dass die Rotorstellung sehr rasch und unkompliziert verändert werden könnten und dass ein stufenloses ermitteln der optimalen Rotorstellung möglich wäre.

Diese Lösung verfälscht aber das Ergebnis: ein Modifizieren der Rotorstellung, würde auch den gesamt Durchmesser ändern, und somit die Drehzahl beeinflussen.

Eine andere Möglichkeit wäre, mehrere Modelle mit gleichem Gesamtdurchmesser und verschiedenem Versatz zu entwickeln (also mit anderen Rotordurchmessern).

Da die Diplomarbeit aber zeitlich begrenzt ist, wurde beschlossen nur ein Modell zu bauen, wodurch natürlich nicht die beste Rotorstellung gefunden werden konnte.

Die Fachliteratur spricht von einer optimalen Rotorstellung bei ca. 30% (vom gesamt Durchmesser) Versatz.

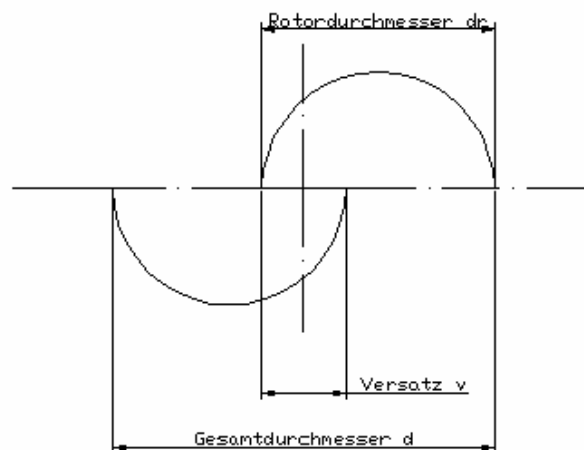


Abb. 2 Erklärungsskizze für die verwendeten Begriffe

Um Material zu sparen und da unser Projekt ja auch eines zum Schutze der Umwelt ist, wurden zwei ausgediente 6kg Lebensmitteldosen für die Fertigung der Rotoren gewählt. Diese Dosen hatten einen Durchmesser von 230mm der dem Rotordurchmesser entsprach. Durch ein Missverständnis wurde die Höhe des Rotors falsch berechnet. Die Höhe der beiden Stufen wurde mit dem Gesamtdurchmesser gleichgesetzt. Dabei sollte die Höhe einer Stufe gleich dem Gesamtdurchmesser d sein und so die gesamte Höhe $2 \cdot d$ sein.

Der Versatz wurde mit $v = \frac{d}{100} \cdot 30$ berechnet. Da d noch nicht bekannt war musste er angenommen werden: $d \approx 350\text{mm} - 400\text{mm}$.

Gesamtdurchmesser d	Versatz v	Rotordurchmesser dr
350mm	105mm	227,5mm
360mm	108mm	234mm
370mm	111mm	240,5mm
380mm	114mm	247mm
390mm	117mm	253,5mm
400mm	120mm	260mm

Tab. 1 Berechnung des Versatzes

Da es sich hier nur um das Model handelt, waren genauere Berechnungen nicht nötig.

Da anfangs geglaubt wurde, dass die Höhe mit der Breite in einem Verhältnis von 1:1 stehen soll, mussten die Dosen jeweils um 75mm gekürzt werden:

$$d = h_{soll} = 3590mm$$

$$h_{ist} - h_{soll} = (2 \cdot 250mm) - 350mm = 150mm$$

$$\frac{150mm}{2} = 75mm$$

Schon bei den Tests wurde bemerkt, dass dieser Aufbau nicht das Optimum sein konnte, deswegen wurde in der Fachliteratur über Savoniusrotoren das richtige Verhältnis von Höhe mit der Breite herausgesucht. Es wurde herausgefunden, dass das Verhältnis von Höhe zu Breite nicht 1:1 ist, sondern 2:1.

Nun wusste man das richtige Verhältnis zwischen Höhe und Breite und das es bei der Entwicklung des großen Savoniusrotors zu beachten ist. Außerdem war die Angabe des richtigen Verhältnisses nicht sehr genau, weshalb das falsche Verhältnis nicht weiter zu beachten war, da es die Funktionsweise des Rotors nicht empfindlich störte.

Die Teller sollten einige Millimeter breiter als der Gesamtdurchmesser sein um die Montage zu erleichtern. Die Teller mussten natürlich auch eine Bohrung für die Welle in der Mitte erhalten. Die Teller sollten mit Winkeln an den Rotorblättern angenietet werden.

[Bild]

Abb. 3 Der Rotor in ProE konstruiert

2.2.3 Welle

Als Welle sollte eine Gewindestange verwendet werden. So konnten die Lager und der Rotor mit Muttern fixiert werden. Der Durchmesser der Stange betrug 8mm, da dieser aus Restbeständen der Familie Redl verfügbar war.

2.2.4 Windleitschaufeln

Grundlagen

Die Idee hinter den Windleitschaufeln besteht darin, Wind zum Rotor hin zu drücken, der sonst ungenutzt bleiben würde. Da der Abstand zwischen den Blechen zum Rotor hin abnimmt, wird die Geschwindigkeit der einströmenden Luft erhöht und somit auch die Drehzahl der Windkraftanlage gesteigert.

Grundsätzlich gilt, dass je weiter die Leitschaufeln vom Rotor weg ragen, desto mehr Wind kann zur Anlage geleitet werden. Allerdings bringen zu große Bleche konstruktive Probleme mit sich. Das Gewicht spielt bei den Windleitschaufeln nur eine geringe Rolle, da diese am Gestell und nicht am Rotor (welcher ja besonders leicht sein sollte) angebracht werden.

Damit die, um den Rotor mitlaufenden Luftwirbel nicht gestört werden, muss ein Abstand zwischen Leitschaufelinnenkante und Rotor vorhanden sein [vgl. Schatter1987 S. 287].

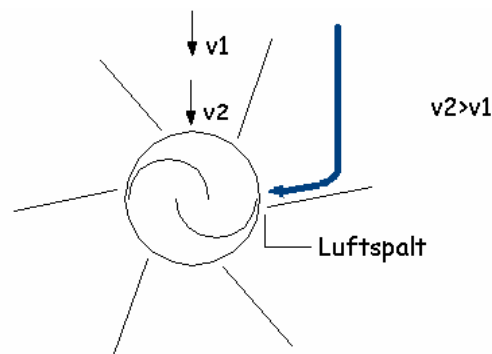


Abb. 4 Prinzip der Windleitschaufeln

Der einzige Nachteil der Leitbleche ist, dass die Windunabhängigkeit teilweise verloren geht. Aus diesem Grund sollten möglichst viele Windleitschaufeln verwendet werden, mindestens aber drei.

Am Modell sollte getestet werden wie stark sich die Schaufeln auf die Drehzahl des Rotors auswirken. Außerdem sollte die optimale Stellung der Bleche ermittelt werden.

Dimensionierung

Zunächst wurde überlegt, die Anlage nur mit 3 Windleitschaufeln auszulegen. Durch die Erkenntnis, dass die Windunabhängigkeit dadurch aber beeinträchtigt wird, wurde beschlossen sechs Bleche anzufertigen. Wegen dem Gestell und den umgewinkelten Montageflächen wäre das Verwenden von mehr Windleitschaufeln problematisch gewesen.

Die Montage der Schaufeln erfolgte durch Scheiben über und unter dem Rotor. Diese musste nicht bis zur Aussenkante der Leitschaufeln reichen, sondern sollten nur genug Platz zur Montage der Windleitschaufeln bieten. Um die Stellung der Windleitschaufeln verändern zu können war geplant, Langlöcher in diese Scheiben zu schneiden. Auf diese Weise konnten aber nur schwer alle Bleche exakt auf dieselbe Stellung gebracht werden. So sollten anstelle von Langlöchern Bohrungen, mit dem Winkelabstand von 15° gefertigt werden.

Da bei unseren Versuchen nur ein kleiner Bereich angeblasen wird, war es nicht nötig sehr weit hinaus reichende Schaufeln zu fertigen. Es wurde beschlossen 300mm breite Bleche zu verwenden.

Mit einem 1,75 dicken Blech wurde eine recht starke Stärke gewählt. Dadurch wurde aber eine hohe Stabilität und Steifigkeit gewährleistet.

Da auf den Holzscheiben das gesamte Gewicht der Windleitschaufeln lastete, wurden auch hier Verstrebungen zwischen Scheiben und Beinen eingeplant.

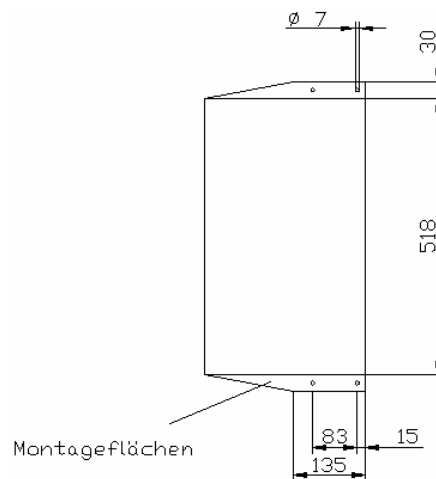


Abb. 5 Windleitschaufeln vor dem Biegen

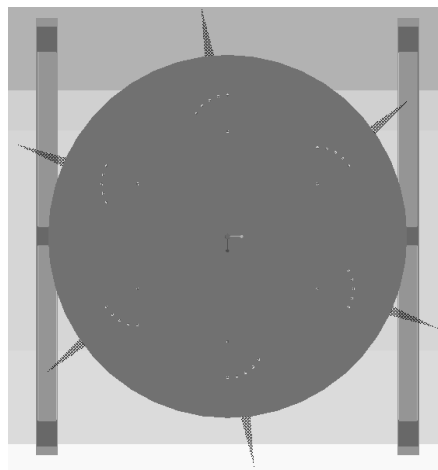


Abb. 6 Modell in der Ansicht von oben.

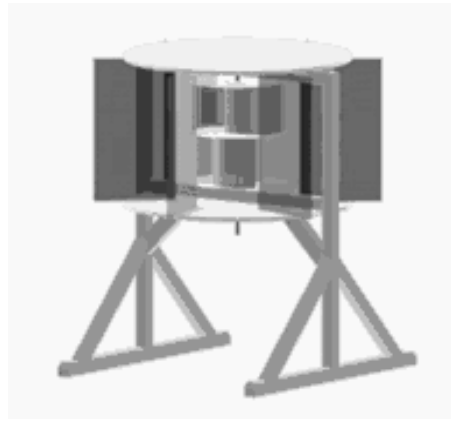


Abb. 7 Das gesamte Modell nach der Planung

2.3. Fertigung

2.3.1 Gestell

Die einzelnen Komponenten wurden mit einer Kreissäge zugeschnitten. Beim oberen Querträger und bei den beiden Beinen wurden Gärungen geschnitten um die Teile besser verbinden zu können. Um das Gestell zu stabilisieren wurden nicht nur Verstrebungen eingebaut, sondern auch Metallwinkel am Übergang von Beinen in Füße angeschraubt. Die Komponenten wurden mit M5x50 Schrauben verbunden. Damit der Rotor nicht später schief stehen würde mussten die beiden Löcher der Querträger genau in der Mitte liegen.

Nachdem die Bohrungen mit dem Durchmesser 20mm in den Querträgern gefertigt wurden, wurden noch für ein besseres Erscheinungsbild Phasen auf die Füße geschnitten.

2.3.2 Rotor

2.3.3 Windleitschaufeln

2.4. Windkanal

2.5. Messungen

3. Savonius oben ohne

3.1. Planung

Ursprünglich war geplant, den Savoniusrotor so kostengünstig wie möglich zu fertigen und so Altwaren, wie Fässer und Kfz-Teile zu verwenden. Der Hauptsponsor, die Firma Werfring, wollte sein Logo allerdings nicht auf ein Produkt aus Altwaren lackieren und schlug vor, für hochwertigeres Material selbst aufzukommen. So sollte für den Rotor und die Welle nierostender Chrom-Nickel-Stahl(X5CrNi18-10) und für das Gestell Halbzeug aus S235JR verwendet werden, da diese Werkstoffe bei der Firma Werfring bereits lagernd waren.

Die Grundidee war, den Savoniusrotor so wie unser Modell und die meisten bereits entwickelten Rotoren beidseitig zu lagern. Zunächst wurde überlegt, auch die Windleitbleche, von denen wir zu dem Zeitpunkt noch nicht wussten, dass wir sie nicht einsetzen würden, beidseitig zu befestigen. Die obere Befestigung sollte durch einen Stahlblechring, der wiederum am Gestell angebracht werden sollte, erfolgen. Die hohen Kosten und die schwere Produktion dieses Ringes und des zusätzlich notwendigen Gestells brachten uns auf die Idee den Savoniusrotor nur einseitig zu lagern. Diese Bauart fordert hohe Ansprüche an die Lager: Die einseitige Lagerung in Verbindung mit einer Unwucht führte nämlich zu starken Vibrationen bei hohen Drehzahlen. [Schulz05]

Jedoch sollten hochwertige Materialien verwendet werden, um solchen Vibrationen vorzubeugen. Außerdem ist der große Vorteil der einseitigen Lagerung, dass der Wind wirklich rundum auf den Rotor wirken kann und dass kein Gestell die mit dem Rotor mit laufenden Wirbeln stört.

Ermöglicht sollte die einseitige Lagerung durch zwei Lager werden, die 350mm von einander entfernt sein sollten. Dadurch konnten sie ein größeres Moment als ein einzelnes Lager aufnehmen.

3.1.1 Rotor

Die Fachliteratur gibt einige Vorgaben bezüglich der Grundabmaße des Savoniusrotors. Da sich diese, laut Autoren, bewehrt haben und es nicht möglich war die optimale Rotorstellung am Modell zu messen, sollte auch die große Anlage den bereits entwickelten Rotoren nachempfunden werden.

So waren bereits Anhaltspunkte wie dem Verhältnis von Rotorhöhe zu –durchmesser oder Wellendurchmesser zu Versatz bereits vorhanden.

Rotorblätter

Die Grundabmaße des Rotors konnten von uns frei gewählt werden. Von ihnen hängen die Maße aller anderen Bauteile, wie Teller, Welle und Gestell ab. Es war wichtig den Rotor groß genug zu bauen, um genügend Leistung für das Laden des Akkumulators zu liefern. Andererseits sollte nicht unnötig viel Material verwendet werden.

Die Höhe der Rotorblätter wurde mit 600mm gewählt. Da Höhe und Breite ja im Verhältnis 1:1 stehen sollen und der Versatz ca. 20% des Gesamtdurchmessers sein soll, ergibt sich dadurch folgende Berechnung:

$$\text{Versatz} = \frac{\text{Gesamtdurchmesser}}{100} \cdot 20 = \frac{600\text{mm}}{100} \cdot 20 = 120\text{mm}$$

$$\text{Rotorblattdurchmesser} = \frac{\text{Gesamtdurchmesser} + \text{Versatz}}{2} = \frac{600\text{mm} + 120\text{mm}}{2} = 360\text{mm}$$

Um auf das abzuschneidende Blechstück zu kommen wird der Rotorblattdurchmesser mit $\frac{\pi}{2}$ multipliziert:

$$360\text{mm} \cdot \frac{\pi}{2} = 565,48\text{mm} \approx 565\text{mm}$$

Die Abmaße der vier zuzuschneidenden Bleche waren also 600mmx565mm. Die Wandstärke mit 1,25mm gewählt. Nach dem Zuschneiden sollten die Rotorblätter auf den richtigen Radius in eine Walze gebogen werden.

Teller

Bei den Tellern war die Symmetrie für das Drehverhalten des Savoniusrotors äußerst wichtig. Deshalb mussten die 42mm Bohrungen genau in der Mitte der Teller liegen und die beiden Bohrbilder, die auch auf den Steifigkeitsscheiben zu finden sind, mit hoher Genauigkeit gefertigt werden.

Der Durchmesser der Teller richtete sich nach dem Durchmesser des Rotors, welcher 600mm beträgt. Für Montage und Schweißnähte wurden an beiden Seiten 10mm hinzugerechnet, woraus sich der Tellerdurchmesser von 620mm ergibt.

Die Fachliteratur spricht bei Stahlblech von einer Mindeststärke von einem Millimeter[vgl. Schulz2005 S. 12]. Da es aber nicht möglich war, verschiedene Wandstärken auszuprobieren, sollten die Teller zur Sicherheit 2mm stark sein. Außerdem hätte ein nur 1mm starker Teller für Probleme beim Verschweißen von Tellern und Rotorblättern gesorgt.

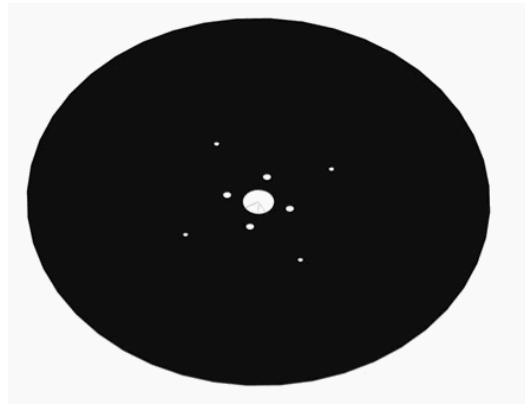


Abb. 8 ProE Zeichnung der Teller

Steifigkeitsscheiben

Wie schon erwähnt sollte der Rotor, und somit auch die Steifigkeitsscheiben, aus nierostendem Chrom-Nickel-Stahl(X5CrNi18-10) gefertigt werden. Die Seifigkeitsscheiben sollten deshalb verwendet werden, weil befürchtet wurde, dass sich die Teller durch das Gewicht der Rotorblätter hinab biegen könnten.

Auf die stabilisierenden Speichen sollte man bei dieser Rotorgröße nicht verzichten, da sonst zu große Materialstärken für die Teller erforderlich wären. [Schulz2005]

Statt Speichen sollten Scheiben verwendet werden, da das Verbinden von Speichen und Tellern die Teller womöglich verformt hätte.

Da die Steifigkeitsscheiben 3mm dick sein sollten, verfügten sie über eine hohe Masse. Diese könnte natürlich, wenn die Scheibe nicht genau in der Mitte liegen würde, ein Unrundlaufen verursachen.

Für den Durchmesser der Scheibe musste ein Kompromiss zwischen Masse und Stabilität gefunden werden. Einerseits durfte die Scheibe natürlich nicht zu schwer werden, aber sollte trotzdem so weit wie möglich hinaus reichen. Die Steifigkeitsscheiben sollte rund 40% der Teller bedeckten, wurden also mit dem Durchmesser 245mm geplant.

Für die 40mm dicke Welle musste genau in der Mitte eine Bohrung mit Durchmesser 42mm entstehen, um bei der Montage etwas Spiel zur Verfügung zu haben. Weiters waren noch zwei Bohrbilder anzufertigen: eines zum Fixieren der Flanschplatten und eines zum Verbinden mit den Tellern. Die Schrauben des inneren Lochkreises(für die Flanschplatte) sollte M10 Gewinde haben, die des äußeren M6, da hier geringere Kräfte auftraten.

Um die Verletzungsgefahr bei der Montage zu verringern sollte zuletzt noch eine Phase gefertigt werden.

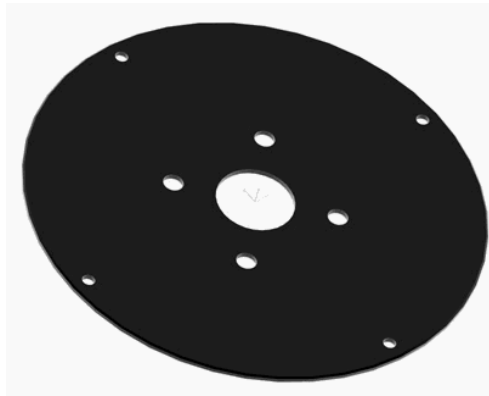


Abb. 9 ProE Zeichnung der Steifigkeitsscheiben

Wellen-Rotor Verbindung

Die Welle sollte mit dem Rotor durch eine Schraubverbindung fixiert werden. Dies sollte durch einen Stellring mit Wurmschrauben, ähnlich wie in Abb. 3, erfolgen.



Abb. 10 Stellring (<http://bill-dart.de/images/billard/253501.jpg>)

Um den Stellring am Rotor anbringen zu können musste eine Flanschplatte verwendet werden. Laut unserem Hauptsponsor gab es solche Bauteile, die Stellring und Flanschplatte kombinierten. Zur Not könnte dieses Teil aber auch händisch angefertigt werden.

Die einzige Anforderung an diese Bauteile war, dass sie den Innendurchmesser 40mm aufwiesen. Außendurchmesser, Höhe und Material hatten eine große Toleranz.

Welle

Die Welle sollte durchgehen von der Spitze des Rotors bis zum Generator reichen. Die Länge der Welle ergab sich aus:

$$\begin{aligned}
 &2 \cdot \text{RotorWellenverbindung} + 2 \cdot \text{Steifigkeitsscheiben} + 3 \cdot \text{Teller} + 2 \cdot \text{Rotorblätter} + 2 \cdot \text{Lager} \\
 &+ 2 \cdot \text{Lagerplatte} + 2 \cdot \text{Träger} + \text{Lagerabs tan } d + \text{Wellenabsatz} = \\
 &2 \cdot 26\text{mm} + 2 \cdot 3\text{mm} + 3 \cdot 2\text{mm} + 2 \cdot 600\text{mm} + 2 \cdot 44.5\text{mm} + 2 \cdot 15\text{mm} + 2 \cdot 50\text{mm} + 240,5\text{mm} + 279\text{mm} = \\
 &2002,5\text{mm}
 \end{aligned}$$

Der Wellenabsatz am Schluss der Welle war für das Anbringen des Generators

vorgesehen. Nach der Festigkeitsberechnung ergab sich für den Wellendurchmesser der Wert von 40mm. Da das Axiallager aber einen Absatz auf der Welle benötigt und die Belastung unterhalb der Lager geringer ist als beim Rotor, musste die Welle nicht durchgehend 40mm Durchmesser haben. Über eine Länge von 1274mm sollte die Welle einen Durchmesser von 40mm, für die nächsten 540mm einen von 35mm haben. Die beiden Lager mussten also auch einen Innendurchmesser von 35mm haben. Das letzte Stück – 200mm lang – sollte 25mm Durchmesser haben.

3.1.2 Gestell

Lagerplatte

Da der Durchmesser der Lochkreise auf den Lagern zu groß war, um die Lager direkt auf die Träger des Gestells zu schrauben, mussten zwei Lagerplatten eingeplant werden. Diese sollten dann jeweils auf zwei Querträgern angeschweißt werden. Die Platten sollten aus 150mm breiten und 15mm starken Halbzeug geschnitten werden, da dieses bei der Firma Werfring lagernd war. Die Länge der Platten sollte 300mm betragen, da so die Querträger weiter auseinander platziert werden konnten und so die Montagearbeiten an der gesamten Anlage vereinfacht wurden.

An den Platten mussten jeweils fünf Bohrungen durchgeführt werden: eine mit Durchmesser 42mm für die Welle und ein Bohrbild mit vier Bohrungen für die Montage der Lager. Bei diesen Bohrungen musste mit höchster Genauigkeit gearbeitet werden, damit die beiden Bohrungen für die Welle exakt übereinander liegen konnten.

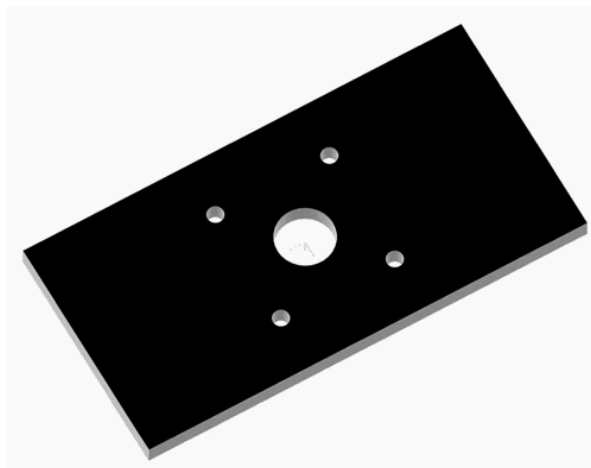


Abb. 11 ProE Zeichnung der Lagerplatten

Gestell

Durch Unebenheiten, Pflanzen und anderer Hindernisse wird der Wind in Bodennähe stark gebremst. Aus diesem Grund war es erforderlich ein Gestell zu entwerfen. Je

höher der Rotor liegt, desto besser, doch bedeutet ein höheres Gestell auch hohe Kosten. Ein Kompromiss zwischen Kosten, Transportierbarkeit, Stabilität und Festigkeit auf der einen Seite und Windstärke auf der anderen Seite brachte das Ergebnis von einem 1500mm hohen Gestell. Bei der Materialauswahl mussten wir uns wieder nach dem Lagerbestand unseres Hauptsponsors richten. Für das Gestell sollte 50x50x3mm Halbzeug aus S235JR verwendet werden.

Die Grundfläche des Gestells sollte Quadratisch sein und da zunächst Windleitschaufeln mit eingeplant waren, musste das Gestell verkleinert werden. Nach dieser Einsparung betrug die Breite des Gestells 1000mm.

Das Gestell sollte später drei horizontale Ebenen haben. Die erste sollte das Axiallager direkt unter dem Rotor tragen. Dazu wurden zwei zusätzliche Träger benötigt. Für die zweite Ebene, die das Radiallager beinhalten sollte, wurden sechs zusätzliche Träger eingeplant, da die zwei Querträger, auf denen die Lagerplatte lag, insgesamt vier vertikale Stützen brauchten. Die letzte Ebene bildete die Basis für diese Stützen und gleichzeitig die Stabilisierung der Beine. Außerdem sollten an ihnen eventuell der Generator und später eine Ummantelung angebracht werden. Diese Ebene benötigte 4 Träger. Mit den vier Stützbeinen und einem Träger für die Ummantelung machte das dann insgesamt 21 Komponenten

Nachdem zusammenschweißen der Komponenten sollten noch höhenverstellbare Füße angebracht werden um Unebenheiten im Boden ausgleichen zu können.



Abb. 12 Die gesamte Anlage in ProE gezeichnet

3.1.3 Generator

3.2. Berechnung

3.2.1 Strömungswiderstand

Für die Berechnungen am Savoniusrotor wurde der Extremfall bzw. „worst-case“ angenommen. Die Windgeschwindigkeit wurde mit 30m/s(108km/h)angenommen, was laut der Windstärkentabelle nach Beaufort eine Windstärke von 12 bedeutet und schwere Verwüstungen verursacht[vgl. Grotmaack1978 S. 9].

Außerdem sollte der Wind auf eine nicht drehbare Fläche blasen, die der projizierten Fläche des Rotors entsprechen sollte.

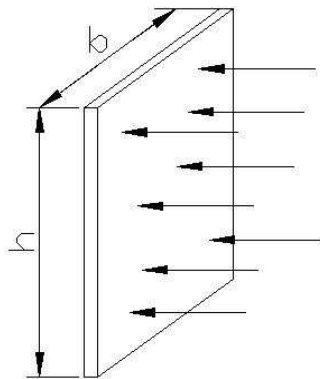


Abb. 13 Wind bläst auf die projizierte Fläche des Rotors

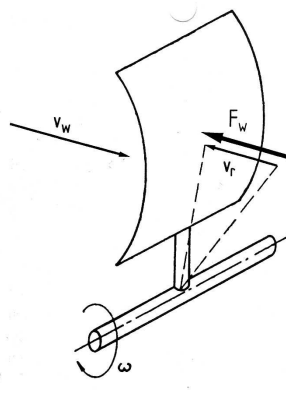
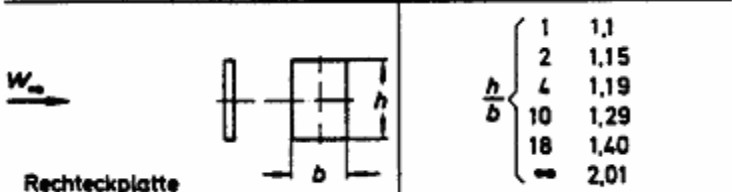


Abb. 14 Prinzip des Widerstandläufers

Das Prinzip des Widerstandläufers – der Savoniusrotor ist ein Vertreter dieser Rotorart - ist, dem Wind Widerstand entgegenzusetzen und sich so antreiben zu lassen. Die Kraft F_w ist die Kraft, die der Rotor dem Wind entgegensetzt.

$$F_w = c_w \times \frac{\rho}{2} \times A \times v_w^2$$

c_w ist der Luftwiderstandsbeiwert, der sich aus Form und Größe der angeblasenen Fläche ergibt.



Rechteckplatte

$\frac{h}{b}$	1	1,1
	2	1,15
	4	1,19
	10	1,29
	18	1,40
	∞	2,01

Abb. 15 Luftwiderstandsbeiwert bei rechteckiger Fläche; rechte Spalte: links das Verhältnis von h zu b , rechts der dazugehörige c_W -Wert

$$h = 1200\text{mm}$$

$$b = 600\text{mm}$$

$$\frac{h}{b} = \frac{1200\text{mm}}{600\text{mm}} = 2$$

$$\Rightarrow c_W = 1,15$$

Die Luftdichte ρ bei 20°C und 1bar beträgt 1,205kg/m³. Aus diesen Werten ergibt sich für den Strömungswiderstand:

$$F_W = 1,15 \cdot \frac{1,205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot 1,2\text{m} \cdot 0,6\text{m} \cdot \left(30 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2$$

$$F_W = 448\text{N}$$

3.2.2 Lagerberechnung

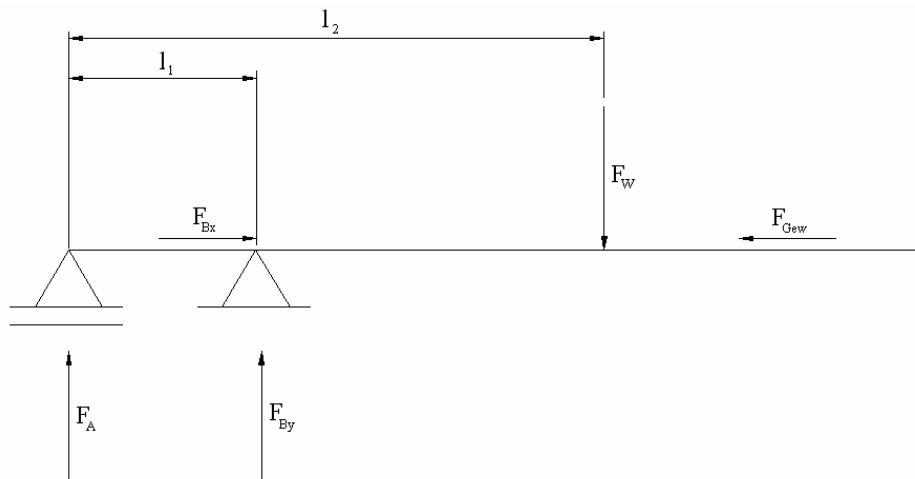


Abb. 16 Einwirkung des Windes und der Gewichtskraft und die Auflagerreaktionen. Um das System besser darstellen zu können wurde es um 90° gekippt darges tellt.

$$l_1 = 350\text{mm}$$

$$l_2 = 993\text{mm (von A bis zur Mitte des Rotors)}$$

Die Dichte ρ des für den Rotor zu verwendenden Materials X5CrNi 18-10 1.4301 beträgt $7,9 \text{ kg/dm}^3$ [siehe Anhang XX].

Die Masse der Welle ist daher:

$$V = (r_1^2 \cdot \pi \cdot l_1) + (r_2^2 \cdot \pi \cdot l_2) + (r_3^2 \cdot \pi \cdot l_3)$$

$$V = [(0,2 \text{ dm})^2 \cdot \pi \cdot 12,74 \text{ dm}] + [(0,175 \text{ dm})^2 \cdot \pi \cdot 5,4 \text{ dm}] + [(0,125 \text{ dm})^2 \cdot \pi \cdot 2 \text{ dm}]$$

$$V = 1,6 \text{ dm}^3 + 0,52 \text{ dm}^3 + 0,098 \text{ dm}^3$$

$$V = 2,218 \text{ dm}^3$$

$$m = V \cdot \rho = 2,218 \text{ dm}^3 \cdot 7,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

$$m = 17,528 \text{ kg}$$

Die Masse des Rotors:

$$V_{\text{ges}} = V_{\text{Rotorblatt}} \cdot 4 + V_{\text{Teller}} \cdot 3 + V_{\text{Scheibe}} \cdot 2$$

$$V_{\text{Rotorblatt}} = 6 \text{ dm} \cdot 5,65 \text{ dm} \cdot 0,0125 \text{ dm} = 0,42375 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Teller}} = (3,1 \text{ dm})^2 \cdot \pi \cdot 0,02 \text{ dm} = 0,6 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Scheibe}} = (1,225 \text{ dm})^2 \cdot \pi \cdot 0,03 \text{ dm} = 0,14143 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{Stellring}} \approx 0,02 \text{ dm}^3$$

$$V_{\text{ges}} = 0,42375 \text{ dm}^3 \cdot 4 + 0,6 \text{ dm}^3 \cdot 3 + 0,14143 \text{ dm}^3 \cdot 2$$

$$V_{\text{ges}} = 3,77786 \text{ dm}^3$$

$$m = V \cdot \rho = 3,77786 \text{ dm}^3 \cdot 7,9 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}$$

$$m = 29,845 \text{ kg}$$

Die Masse von Rotor und Welle beträgt somit rund 47 kg.

$$F_{\text{Gew}} = m \cdot g = 47 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{\text{Gew}} = 461,07 \text{ N}$$

Die Gleichgewichtsbedingungen für dieses System lauten:

$$\sum F_y = 0 = F_W - F_{By} - F_A$$

$$\sum F_x = 0 = F_{\text{Gew}} - F_{Bx}$$

$$\sum M = 0 = F_{By} \cdot l_1 - F_W \cdot l_2$$

Für F_{By} wird ein neuer Ausdruck gesucht um in die Gleichgewichtsbedingung der Momente einsetzen zu können und es so möglich ist F_A zu bestimmen.

$$F_{By} = F_W - F_A$$

$$(F_W - F_A) \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = 0$$

$$F_W \cdot l_1 - F_A \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = 0$$

$$F_W \cdot l_1 - F_W \cdot l_2 = F_A \cdot l_1$$

$$F_A = \frac{F_W \cdot l_1 - F_W \cdot l_2}{l_1}$$

$$F_A = \frac{447,1N \cdot 350mm - 447,1N \cdot 993mm}{350mm}$$

$$F_A = 821,4N$$

Mit der Gleichgewichtsbedingung der Kräfte in Y-Richtung kann nun F_{By} berechnet werden:

$$F_{By} = F_W - F_A$$

$$F_{By} = 447,1N - (-821,4N)$$

$$F_{By} = 1268,5N$$

Da in X-Richtung nur die Gewichtskraft das Lager B belastet, entspricht F_{Bx} der Gewichtskraft.

Lebensdauer

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n}$$

L_{10} und L_{10h} heißen nominelle Lebensdauer und haben die Einheiten 10^6 Umdrehungen bzw. h. L_{10} gibt an wie viele Umdrehungen das Lager mindestens überlebt, L_{10h} gibt die Stundenanzahl an. C ist die lagerspezifische dynamische Tragzahl und entspricht in diesem Fall 15kN[siehe Anhang XX]. P heißt dynamische äquivalente Lagerbelastung und ist die zuvor berechnete Lagerbelastung, p ist der Lebensdauerexponent, der für Kugellager 3 lautet.

Für die Drehzahl wurde als Richtwert die Drehzahl des Modells gewählt. Da dieser Wert nur ungefähr für die große Anlage stimmt, sollte die Lebensdauer später erneut berechnet werden.

Lebensdauer für das Lager A:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_A} \right)^p = \left(\frac{15kN}{0,82kN} \right)^3$$

$$L_{10} = 6089 \cdot 10^6 \text{ Umdrehungen}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 6089h}{60 \cdot 432 \text{ min}^{-1}}$$

$$L_{10h} = 234950h$$

Lebensdauer für das Lager B:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{F_{By}} \right)^p = \left(\frac{15kN}{1,27kN} \right)^3$$

$$L_{10} = 1654 \cdot 10^6 \text{ Umdrehungen}$$

$$L_{10h} = \frac{10^6 \cdot L_{10}}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 63786h}{60 \cdot 432 \text{ min}^{-1}}$$

$$L_{10h} = 63792h$$

3.2.3 Festigkeitsberechnungen

Rotor

- Schweißnahtberechnung
- Berechnung der Durchbiegung der Teller mit und ohne Steifigkeitsscheiben
- Berechnung auf Scherung der Schrauben

Wellenberechnung

In Abbildung 4 ist zu erkennen wie die Welle belastet wird.

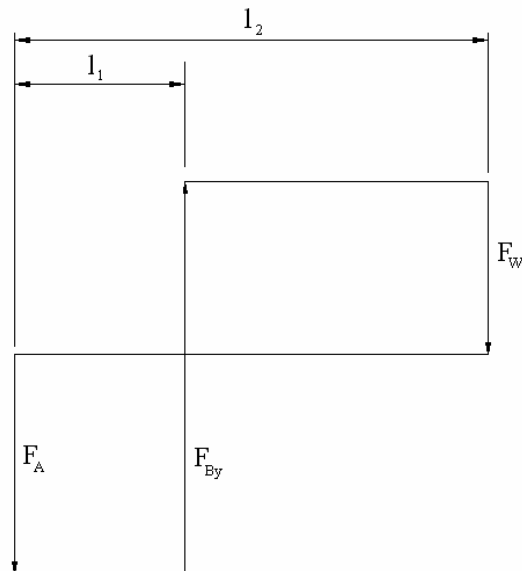


Abb. 17 Kräfteverlauf auf dem belastetem Wellenstück

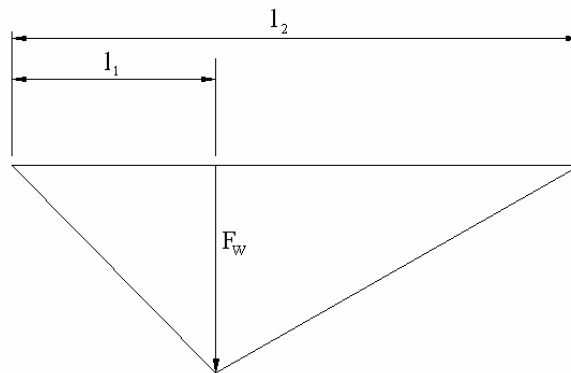


Abb. 18 Momentenverlauf auf dem belastetem Wellenstück

$$M_B = F_W \cdot (l_2 - l_1) = F_A \cdot l_1$$

$$M_B = 447,1 \text{ N} \cdot (993 \text{ mm} - 350 \text{ mm})$$

$$M_B = 287498,16 \text{ Nmm} = 287,5 \text{ Nm}$$

Die zulässige Biegespannung entspricht der Grenzspannung, die für jedes Material festgelegt ist, dividiert durch eine Sicherheit. Die Sicherheit wurde von uns mit 1,5 gewählt, die zulässige Spannung beträgt 250 N/mm^2 [vgl. Roloff S. 4].

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma_{Grenz}}{S} = \frac{250 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,5}$$

$$\sigma_{zul} = 166,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Berechnung des Wellendurchmessers:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{B \max}}{W_x} \leq \sigma_{zul}$$

$$W_x \geq \frac{M_{B \max}}{\sigma_{zul}}$$

$$W_x = \frac{d^3 \cdot \pi}{32}$$

$$\frac{d^3 \cdot \pi}{32} \geq \frac{M_{B \max}}{\sigma_{zul}}$$

$$d \geq \sqrt[3]{32 \cdot \frac{M_{B \max}}{\sigma_{zul} \cdot \pi}}$$

$$d \geq \sqrt[3]{32 \cdot \frac{287498,16 Nmm}{166,67 \frac{N}{mm^2} \cdot \pi}}$$

$$d \geq 26mm$$

Beim Massenträgheitsmoment kommt es darauf an, wie weit die Masse von der Drehachse entfernt liegt. Da die Welle direkt an der Drehachse liegt, konnte sie ohne Probleme stärker geplant werden als laut Berechnungen nötig. Lager mit dem Durchmesser 35mm sind bei der Firma Werfring Standard. Damit nicht extra andere Lager bestellt werden mussten, sollten daher diese Lager verwendet werden. Das Axiallager benötigt jedoch eine Schulter auf der Welle, welche dann auf dem Lager aufsitzt. Deshalb sollte die Welle beim Rotor einen Durchmesser von 40mm haben.

Gestell

- Biegebeanspruchung der Träger
- Schweißnahtberechnung

3.2.4 Leistungsberechnung

3.2.5 Generator

3.3. Fertigung

Bei der Fertigung stand die bestens ausgestattete Werkstatt der Firma Werfring zur Verfügung.

Zum einfachen Verständnis sind die einzelnen Arbeitsschritte nicht immer in chronologischer Reihenfolge angeführt. Das kommt daher, dass öfters Maschinen besetzt waren, oder Material noch nicht eingetroffen war und so an anderen Stellen weitergearbeitet wurde. Bei einer zeitlich geordneten Aufzählung der Arbeiten würde man schnell die Übersicht verlieren.

Sinnlos und nicht zweckmäßig wäre auch ein Erwähnen von Arbeiten wie entgraten, senken, Schweißnähte putzen oder Fasen schneiden. Diese Tätigkeiten wurden, wann immer notwendig, durchgeführt.

3.3.1 Der Rotor

Steifigkeitsscheiben

Zwei Blechstücke mit den Maßen 250mm x 250mm wurden grob, mit einer elektrischen Blechschneidemaschine, ausgeschnitten. Auf ihnen wurden die Kreise mit dem Durchmesser 245mm mit einem Zirkel angerissen und die Bleche ungefähr auf Kreisform zugeschnitten. In der Mitte entstand ein Stanzloch mit Durchmesser 42mm.

Um runde Scheiben zu erhalten sollten diese Bleche auf einer Drehbank bearbeitet werden. Da die Bleche aber nur 3mm dick waren, konnten sie nicht direkt eingespannt werden. Es musste zuerst ein Plastikzylinder bearbeitet werden, auf dem die Bleche befestigt wurden und der auch eingespannt werden konnte. Hierzu wurde auf dem Zylinder ein 2,5mm langer Absatz mit Durchmesser 42mm gedreht auf dem die Bleche aufgesteckt wurden. Auf der anderen Seite sorgten ein weiterer Plastikzylinder und ein Rollkörnerr für die nötige Stabilität. Nachdem durch das Drehen runde Scheiben entstanden wurde das Bohrbild gefertigt.

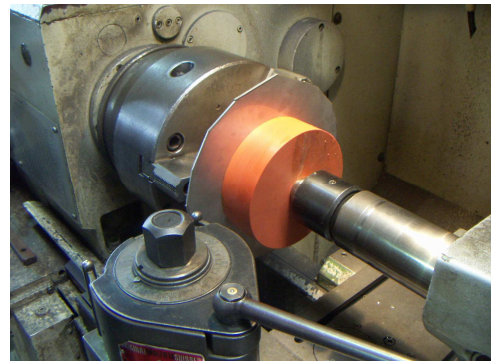
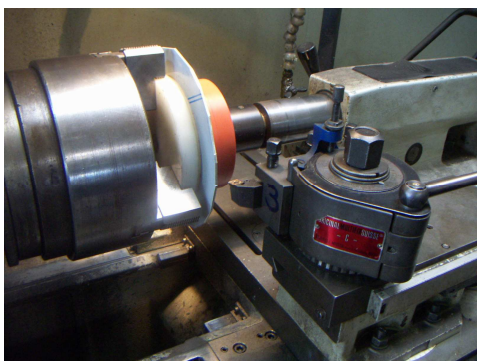


Abb. 19 und 20 *Bearbeitung der Steifigkeitsscheiben*

Teller

Die Teller sollten wie die Steifigkeitsscheiben an der Drehbank gefertigt werden, allerdings war der Abstand zwischen Spannfuttermittelpunkt und Führung des Werkzeugschlittens zu gering.

Deshalb wurden die drei Scheiben mit einem Plasmaschneider bei 60 A aus einem großen Blechstück hinaus geschnitten. Der Plasmaschneider wurde durch ein Gestänge mit einer zuvor angefertigten Bohrung im Mittelpunkt der Scheibe verbunden. Wichtig bei der Fertigung war, exakt runde Scheiben zu erhalten, da anderen falls der Rotor unrund laufen würde.



Abb. 21 und 22 Plasmaschneider und Gestänge

Das Stanzwerkzeug hat an der Unterseite eine Spitze, mit der man wegen einem Körnerpunkt exakt in die Mitte des zu stanzenden Loches treffen kann. Da aber, wegen dem Plasmaschneiden bereits eine Bohrung vorhanden war, konnte der Mittelpunkt nicht mehr gekörnt werden. Als Lösung wurde ein Klebeband über das Loch geklebt und so der Mittelpunkt erneut angerissen. Erwartungsgemäß war dieser Weg aber nicht ganz genau, was auch später für Probleme sorgte.

Auch hier wurde am Schluss das Bohrbild zur Verbindung von Teller, Steifigkeitsscheiben und Flanschplatten angefertigt.

Flanschplatten mit Stellring

Da entgegen den Erwartungen kein Einzelteil, der Flanschplatte und Stellring kombiniert, zur Verfügung stand, musste dieser erst gefertigt werden. Hierzu wurden zwei Wasserrohrflanschplatten aus Restbeständen und zwei Stellringe (mit je zwei Wurmsschrauben), jeweils mit Innendurchmesser 40mm, verschweißt. Da diese Schweißnähte nur gering belastet werden, wurde, ohne vorhergehende Berechnungen, beschlossen, die beiden Teile nur durch einige wenige kurze Nähte zu verbinden. Die rechnerische Kontrolle dieser erfolgte im Nachhinein.

Die zwei verwendeten Flanschplatten wiesen ein stark unsymmetrisches Bohrbild auf, welches aber die Funktionsweise nicht beeinflusste.

Rotorblätter

Gleich beim Zuschneiden der Rotorblätter war ein Fehler passiert: die Bleche wurden genau nach Plan abgeschnitten. Weil aber, beim Biegen in der automatischen Walze, nicht die gesamte Länge des Bleches gebogen werden kann, mussten auf jeder Seite ungefähr 150mm dazugerechnet werden. Deshalb wurden neue Bleche zugeschnitten, die 300mm länger waren.

Beim Biegen gab es das Problem, dass man nur in kleinen Schritten zustellen konnte, da man sonst die Bleche nicht mehr in die Walzen einführen konnte. So war die Arbeit an den vier Blechen sehr langwierig.

Nach dem die Rotorblätter gebogen waren wurden die überschüssigen 150mm auf jeder Seite der vier Bleche mit einem Winkelschleifer abgetrennt. Der entstandene Grad wurde mit einem Winkelschleifer, mit Fächerschleifscheibe, weggeschliffen.



Abb. 23 *Biegen der Rotorbleche an der automatischen Walze*

3.3.2 Welle

Zunächst war geplant die Welle aus einem Stück zu drehen. Vor Ort wurde uns aber bewusst, dass es mit den verfügbaren Maschinen nicht möglich war eine so lange Welle anzufertigen beziehungsweise zu bearbeiten. Aus diesem Grund sollte die Welle aus zwei Teilen bestehen: die Welle mit dem Durchmesser 40mm, mit der der Rotor verschraubt werden sollte und die Welle mit dem Absatz, auf die der Generator angebracht werden sollte.

Die erste Idee bestand darin die Wellen durch Innengewinde an den beiden Wellen und eine Gewindestange zusammenschrauben zu können. Dieser Lösungsweg hätte den Vorteil gehabt, dass die Welle teilbar und somit leichter transportierbar gewesen wäre. Allerdings wurde befürchtet, dass durch das Gewindenspiel ein un rundes Laufen der Welle verursacht werden könnte.

Der nächste Lösungsansatz war, die Wellen mit einer Passung zusammen zustecken und mit jeweils einer Wurm schraube pro Seite zu verschrauben. Dazu wurden zunächst die beiden Wellen gefertigt, wobei auch Zentrierbohrungen für den Rollkörner angefertigt werden mussten. Der Einsatz des Rollkörners war bei den, noch immer langen, Wellen unbedingt nötig.

Zunächst wurden 35mm lange Bohrungen mit dem Durchmesser 15,5 vorgearbeitet und dann die Passungen 16F8 mit einer Reibahle gefertigt.

Der Bolzen, welcher die beiden Wellen verbinden sollte, wurde auf die Passung 16h9 und auf die Länge 60mm gedreht. Auf der ganzen Länge wurde er auf einer Breite von ungefähr 3mm geschliffen, um beim einschlagen die Luft ausströmen zu lassen.

Nachdem die Bohrungen und Gewinde für die beiden Wurm schrauben an einer Fräsmaschine fertig gestellt wurden, wurde der Bolzen zur zusätzlichen Sicherheit in einer Welle mit Metallkleber befestigt.

Obwohl eine Passung verwendet wurde, war nach dem Verbinden der Wellen noch immer soviel Spiel vorhanden, dass die Welle, durch den einseitigen Druck, verursacht durch die Wurm schrauben, einen leichten Knick erhielt. Eine Lösung für dieses Problem wäre gewesen weitere Wurm schrauben in die Welle zu treiben.

Es wurde aber beschlossen, auf die Vorzüge einer teilbaren Welle zu verzichten und lieber die Stabilität zu fördern. Deshalb sollten die beiden Wellen verschweißt werden. Da auf die Welle mehr Kräfte wirken als auf die Flanschplatte, wurde hier eine durchgehende Naht geschweißt. Auch hier erfolgte die Schweißnahtberechnung erst im Nachhinein, da in der Planungsphase noch nicht klar war, dass hier geschweißt werden müsse.

Durch das Schweißen verzog sich die Welle um einige wenige zehntel Millimeter, die sich aber stark auf das Drehverhalten des Rotors ausgewirkt hätten, wäre dieser Verzug nicht behoben worden. Deshalb wurde die Welle in der Drehbank mit sehr kleiner Drehzahl gedreht, mit einem Zentriertaster vermessen und gegebenenfalls Unrundheiten mit einer Spindelpresse korrigiert. Dieser Vorgang musste mehrere Male wiederholt werden.

Das Gewicht der Welle betrug nun 17,5kg.

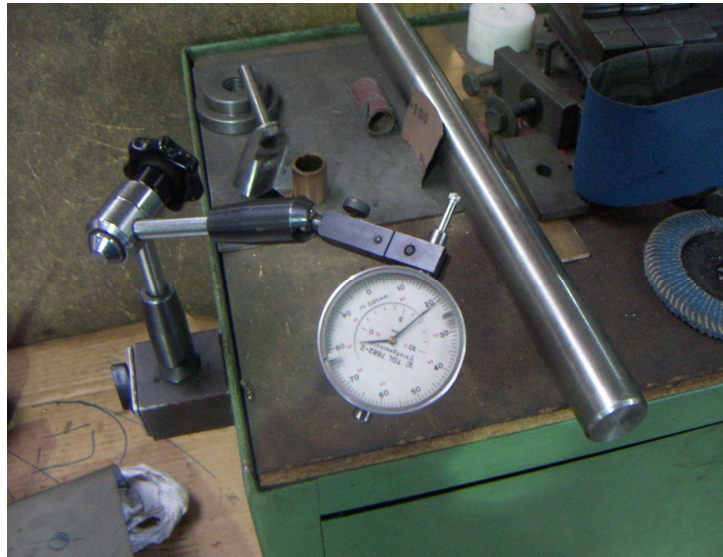


Abb. 24 Die verwendete Messuhr

3.3.3 Das Gestell

Lagerplatte

Aus einem 15mm dicken und 150mm breiten Rohling wurden zwei 300mm lange Stücke geschnitten. Dabei handelte es sich um den Werkstoff St37.0, nicht weil dieser besondere Eigenschaften aufweist, sondern weil er verfügbar war. Das genaue Einhalten der Maße 15x150x300 war nicht weiter wichtig, da diese Abmessungen die Funktionsweise nicht beeinflussen.

Das Bohrbild sollte an einer Fräsmaschine gefertigt werden, da hier eine hohe Genauigkeit erzielt werden kann. Um bei der Montage eine genaue Überlagerung der beiden 42mm Bohrungen in den Mitten der Platten erreichen zu können, wurde der Ausgangspunkt (Null-Punkt) für alle Bohrungen in der linken oberen Ecke gewählt. Auch bei der Montage musste sich dann an diesen Punkten orientiert werden. Wären die beiden Bohrungen für die Welle nicht exakt übereinander, hätte sich der Rotor womöglich nicht gedreht.

Nach der Montage der Lager wurde die Welle eingeführt. Da sich diese aber nur sehr schwer drehen lies und weil es bei beiden Lagern fast unmöglich ist, dass Regenwasser von unten in die Lager eintritt, wurden die Simmerringe an der Unterseite der Lager entfernt. Dadurch lies sich die Welle erheblich leichter drehen.

Gestell

Zunächst wurden alle 21 Teile aus 50x50x4mm Halbzeug mit einer Bandsäge zugeschnitten. Die Gehrungen, einiger der zuzuschneidenden Teile, wurden ebenfalls an der Bandsäge gefertigt, da deren Winkel zum Werkstück verstellt werden konnte.



Abb. 25 und 26

Zuschneiden des Gestells an der Bandsäge

Beim verschweißen der Formrohre musste sehr genau darauf geachtet werden, dass die einzelnen Teile im rechten Winkel zu einander standen. Aus diesem Grund wurde intensiv mit Anschlagwinkeln und Haarwinkeln gearbeitet. Waren die Rohre in ihren richtigen Positionen wurden sie zunächst geheftet, erneut ausgerichtet und erst dann rundum mit 140A angeschweißt. Diese Arbeit war sehr zeitintensiv und musste immer zu zweit durchgeführt werden. Nach Beendigung dieser Arbeit wurden noch die Füße in die Stützen eingeschlagen.

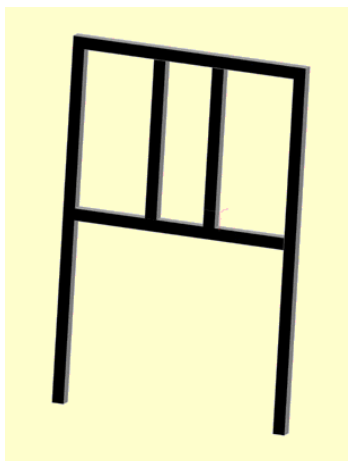


Abb. 27

Gestell_1

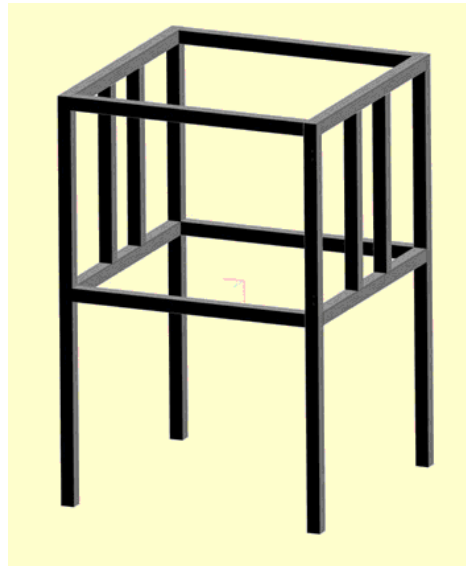


Abb. 28 Gestell_2



Abb. 29 Gestell_3

Bei Fertigstellung des Gestells wurde bemerkt, dass sich die Stützen durch das Schweißen etwas verzogen hatten. Um das zu korrigieren wurden mit einer Winde jeweils zwei Stützen auseinander gedrückt.

Als letztes wurden die Lagerplatten angeheftet. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Null-Punkte und somit auch die Bohrungen exakt übereinander lagen. Dass die Platten genau in der Mitte des Gestells lagen, war für die Funktionalität des Rotors nicht wichtig.



Abb. 30 Auseinanderbiegen der Stützen mit Hilfe der Winde

3.3.4 Montage

Nachdem Teller und Steifigkeitsscheiben verschraubt wurden konnten die Flanschplatten mit Stellring darauf gelegt werden. Da die Bohrbilder auf den Flanschplatten unsymmetrisch waren, war es nur so möglich die Löcher auf die Steifigkeitsplatten zu übertragen. Außerdem musste nun markiert werden, welche Flanschplatten, Steifigkeitsscheiben und Teller zusammengehörten, da die verwendeten Flanschplatten nicht identisch waren.

Da die Stanzmaschinen maximal 3mm starke Bleche stanzen konnten, wurden die Teller und Steifigkeitsscheiben wieder auseinandergeschraubt, die Löcher der Steifigkeitsscheiben gestanzt und an den Teller angezeichnet. Nachdem auch die Teller mit weiteren Löchern versehen wurden konnten alle drei Teile miteinander verschraubt werden. Allerdings wurde beim Stanzen etwas ungenau gearbeitet, weshalb die Flanschplatte auf einem der Teller nicht ganz mittig lag. Aus diesem Grund musste bei Teller und Steifigkeitsscheibe noch eine Kleinigkeit gestanzt und gefeilt werden. Wie bei der Fertigung der Teller bereits beschrieben, waren auch die Löcher in der Mitte der Teller nicht ganz mittig. Auch diese wurden nun durch feilen vergrößert.

Der nächste Arbeitsschritt war, die Rotorblätter anzubringen. Dazu wurden die Mittellinien und an ihnen die Abstände der Rotorblätter zur Aussenkante und zum Mittelpunkt der Teller mit einem Zentrierwinkel angerissen. Auch hier waren beim Schweißen zwei Personen gefordert: der Schweißer, und jemand, der die Rotorblätter auf ihre richtigen Positionen niederdrückte. Das war oft ein größerer Kraftakt, da die Rotorblätter nicht exakt dem vorgegebenem Durchmesser entsprachen und so händisch in ihre richtige Position gebogen werden mussten. Zunächst wurden die beiden Teile nur aneinander geheftet, um nach dem ersten Test der Anlage eventuelle

Veränderungen leichter durchführen zu können. Der fertige Rotor wog insgesamt 31kg.

Nun konnte die Welle eingeführt und durch die Wurmschrauben der Stellringe mit dem Rotor verbunden werden. Das Gestell wurde gekippt, um den Rotor und die Welle leichter montieren zu können.

Erste Inbetriebnahme

Jetzt wurde die gesamte Anlage(135kg) wieder aufgestellt und mit einem Gabelstapler aus der Halle geführt. Bereits durch den geringen Fahrtwind begann sich der Rotor langsam zu drehen.

Draußen waren bei leichtem Wind (es stand leider kein Anemometer zur Verfügung) 91 Umdrehungen pro Minute zu messen. Der Rotor rannte sehr rund und die gesamte Anlage war sehr stabil.



Abb. 31 Erste Inbetriebnahme des Savoniusrotors

3.3.5 Endmontage

Rotor und Gestell wurden getrennt und die Rotorblätter an die Teller geschweißt, da keine Veränderungen mehr durchgeführt werden mussten. Die Schweißnähte hier waren eine große Herausforderung, da die Wandstärken der Rotorblätter nur 1,25mm und die der Teller 2mm betrugen. Es musste mit geringem Strom (66A) und schneller Vorwärtsbewegung geschweißt werden, da eines der Bleche sonst durchbrennen hätte können. Trotzdem musste ein Schweißbad erzeugt werden um die beiden Teile richtig zu verbinden. Hier wurden die Schweißnähte mit einem Beizgerät geputzt und auch die Lagerplatten wurden jetzt fertig verschweißt.

Als nächstes wurde die Verkleidung angefertigt. Dazu wurden alle Bleche zugeschnitten und gebohrt, während am Gestell noch eine Verstrebung an der gegenüberliegenden Wand der Plexiglasscheibe und für die Deckel zwei Stützplättchen angebracht wurden. Um die Blechplatten zu montieren, wurden Gewindebolzen an das Gestell geschweißt. Da das Arbeiten mit dem Bolzenschweißgerät nicht immer funktionierte, musste teilweise mit dem Schweißapparat bei 100A nachgebessert oder der Bolzen ausgerichtet werden. Beim Ausrichten wurde vor dem Hämmern eine Mutter auf den Bolzen geschraubt, um dessen Gewinde nicht zu beschädigen.



Abb. 32 Stanzen der Verkleidungsbleche

Die 6mm dicke Plexiglasscheibe wurde zugeschnitten und mit Bohrungen versehen. Um die Sterngriffe anbringen zu können wurden auch hier die Gewindebolzen am Gestell angeschweißt. Auf der Seite des Scharniers wurden Gewinde in das Gestell geschnitten und zwei Plättchen montiert, die den 6mm Höhenunterschied, verursacht von der Wandstärke der Plexiglasscheibe, kompensieren sollten.

Um das Gestell später besser am Standort fixieren zu können wurden noch Ringe an den vier Eckpunkten des Gestells mit 117A angeschweißt. Mit ihnen und Drahtseilen sollte die Anlage später am Boden nieder gespannt werden.

4. Der Maximum Power Point Tracker

4.1. Allgemeines / Prinzip

Der Maximum Power Point Tracker ist die elektronische Komponente des Gesamtaufbaus, welche dafür sorgt, dass die Leistung des Savoniusrotors möglichst optimal in elektrischer Form in einen Akkumulator gespeist wird. Er besteht aus einem Step-Up Converter welcher die geringere Eingangsspannung des Gleichstromgenerators auf ein höheres Niveau wandelt um so den Akkumulator zu laden. (Die Funktion des Step-Up Converter wird im Kapitel ‚Prinzip des Step-Up Converters‘ erklärt)

Durch das Schalten des Step-Up Converter wird jedoch nicht nur die Ausgangsspannung zum Laden des Akkus bestimmt, sondern auch der Ersatzwiderstand, also die Last die auf den Generator, und somit auch auf den Savoniusrotor wirkt. Um diese Last und die gegebenen Windverhältnisse anzupassen und den Aufbau im Maximum Power Point zu betreiben, muss der Wandler also geregelt werden.

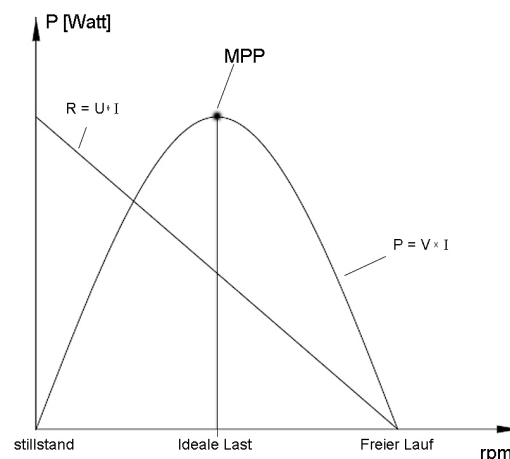


Abb. 33 Umdrehungs-Leistungsdiagramm mit MPP:
zeigt den Verlauf bei fixer Windstärke

Die Regelung des Step-Up Converters übernimmt ein Mikroprozessor. Dieser muss ständig überwachen, ob die aktuelle Leistung optimal ist. Hierzu testet er, ob sich eine Erhöhung oder Verringerung der Schaltdauer des Wandlers positiv oder negativ auf die Leistung auswirkt. Dazu muss er ständig Spannung und Strom messen um daraus die Leistung zu berechnen. Diese wird mit dem vorherigen Wert verglichen. Ist die neue Leistung größer, war die Änderung der Schaltdauer richtig und sie kann weiter in diese Richtung verändert werden. Ist die Leistung jedoch gesunken muss eine Umkehr der Änderung statt finden. Außerdem muss der Kontrolller darauf achten, dass kein Kurzschluss zustande kommt, oder die Schaltung durch sonstige Vorgänge im

Betrieb zu Schaden kommt, d.h. er darf nur 10% - 90% Schaltdauer zulassen. *Ebenfalls von Vorteil wäre eine gewisse Mindestspannung abzuwarten, um den Wandler nur dann zu betreiben wenn sich dies auch rentiert.* Die gesamte Schaltung und damit auch die Regelung muss natürlich möglichst Strom sparend arbeiten um so dass entladen des Akkumulators, bei ausbleibendem Wind zu verhindern, und den Wirkungsgrad des Maximum Power Point Trackers möglichst wenig zu beeinflussen.

Der Mikrokontroller benötigt also zur Überwachung des Step-Up Converters ausreichend Analog - Digital Wandler für die Messungen und mindestens einen PWM-Ausgang zur Transistoransteuerung. Außerdem benötigt er ausreichend Rechenleistung um die benötigten Berechnungen und Vergleiche anstellen zu können. Daher wurde der PIC 16F88 von Microchip ausgewählt, welcher alle diese Anforderungen erfüllt. (Für genauere Angaben siehe Datenblatt im Anhang G)

4.2. Der Step-Up Converter

4.2.1 Prinzip des Step Up Converters

Der Step-Up Converter ist der Leistungsteil der Elektronik. Er wandelt die geringe Eingangsspannung in eine höhere Ausgangsspannung um und bedient sich dabei einer Induktivität als Energiespeicher.

Anhand eines vereinfachten Schaltplans lässt sich sein Funktionsprinzip leicht erklären.

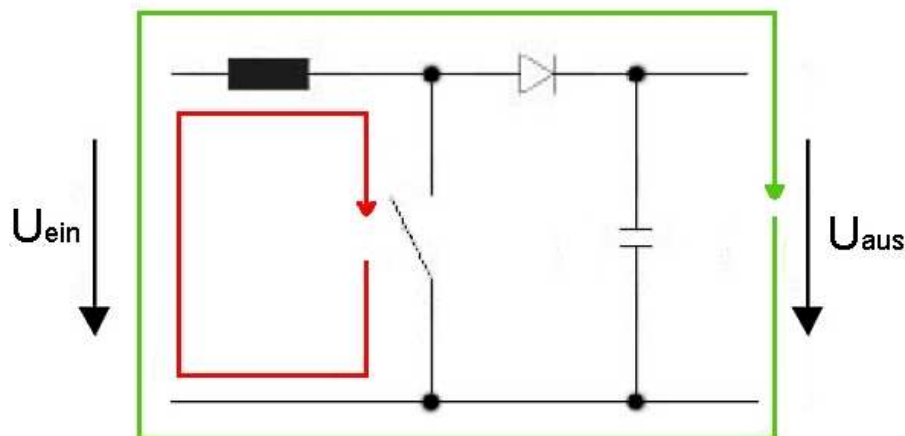


Abb. 34 Step Up Converter Prinzip

Der Aufwärtswandler besteht aus zwei überlagerten Stromkreisen, welche abwechselnd, durch den Schalter bestimmt, aktiv sind.

Ist der Schalter, welcher meist als MosFET ausgeführt wird, geschlossen bildet er mit der Induktivität einen Stromkreis. Der Spulenstrom steigt linear an, erzeugt ein magnetisches Feld und speichert so die Energie in der Induktivität.

Wird nun der Schalter geöffnet beginnt das Magnetfeld zusammen zu brechen und induziert eine Spannung um ihrer Zustandsänderung entgegenzuwirken. So erhält die Spule den Stromfluss aufrecht. Die Spulenspannung wird mit der Eingangsspannung addiert ($U_{\text{in}} > U_{\text{out}}$) und treibt so den Strom durch die Sperrdiode, welcher verhindert, dass Strom in die falsche Richtung zum Ausgang fließt. Ist die Spule entladen bevor der Schalter wieder geschlossen wird sinkt der Spulenstrom auf Null ab, der Strom lückt. Man spricht von der so genannten GAP-Zeit im diskontinuierlichen Betrieb. Im Normalbetrieb bzw. kontinuierlichen Betrieb eines Aufwärtswandlers sollte dies nie auftreten.

Ebenso wie am Ausgang wird auch am Eingang des Aufwärtswandler ein Kondensator parallel geschaltet. Diese dienen dazu das Ein- bzw. Ausgangssignal zu glätten und konstant zu halten bzw. einen plötzlichen Spannungseinbruch zu

verhindern. Mit seiner Ladung wird die Schaltung bzw. die Last versorgt wenn sonst kein Strom zur Verfügung stehen würde. Dadurch wird die Welligkeit des Signals verringert.

Im folgenden Bild lassen sich die Spannungs- und Stromverläufe erkennen, um die Schaltvorgänge besser nachvollziehen zu können.

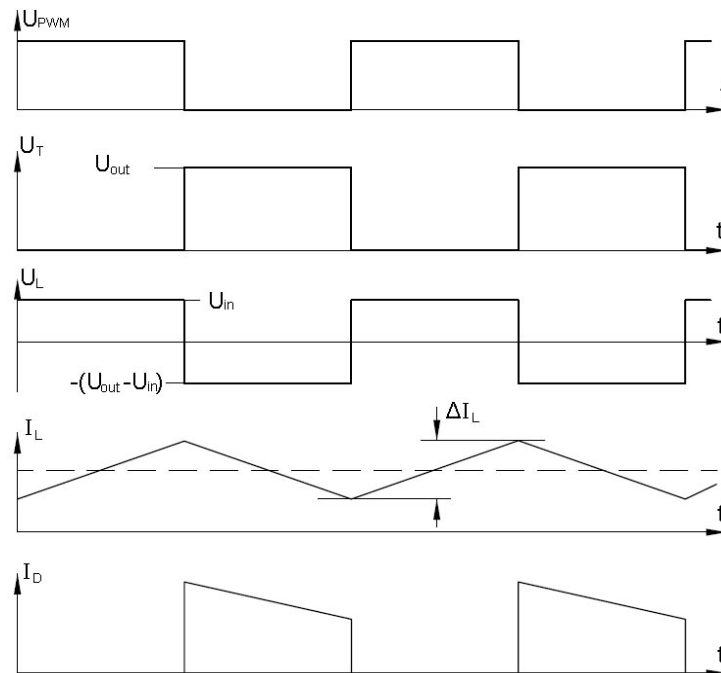


Abb. 35 Strom und Spannungsverlauf

Man kann den Aufwärtswandler auch mittels einer Energiebetrachtung beschreiben: Während der Ein-Phase des Schalters wird Energie in die Induktivität geladen. Diese wird während der Aus-Phase samt der Eingangsenergie an den Ausgang übertragen.

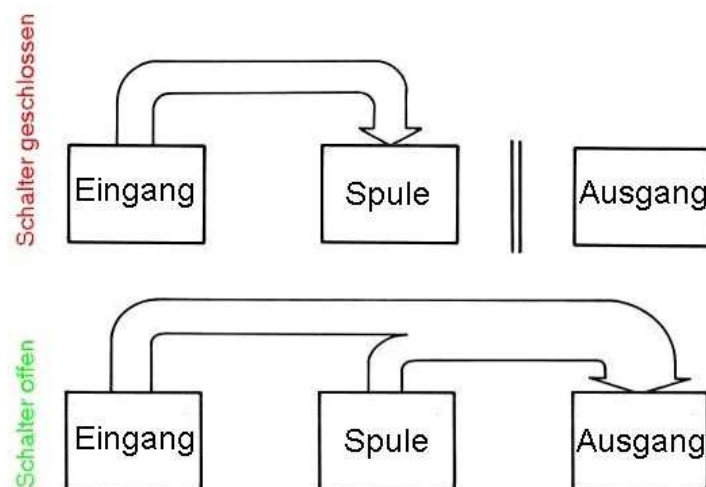


Abb. 36 Energiebetrachtung

Daran lässt sich auch leicht erkennen, dass beide Ladungsmengen gleich bleiben müssen. $Q_{in} = Q_{out}$, daraus ergibt sich:

$$U_{Ein} \times t_{on} = (U_{Aus} - U_{Ein}) \times t_{off} \quad U_{Aus} = U_{Ein} \times \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}}$$

Im kontinuierlichen Betrieb lässt sich aus dem Induktionsgesetz eine wichtige Formel für die Differenz des Spulenstroms ableiten, welche zur Dimensionierung der Spule eines Aufwärtswandlers nötig ist.

$$u = L \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \Delta i = \frac{1}{L} u \times \Delta t$$

$$\Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{1}{L} (U_{out} - U_{In}) \times t_{on}$$

$$\text{für } t_{on} = t_{off} \quad \Rightarrow \quad \Delta I_L = \frac{1}{L} (U_{out} - U_{In}) \times \frac{U_{In}}{U_{out}} \times \frac{1}{f}$$

$$L = \frac{1}{\Delta I_L} (U_{out} - U_{In}) \times \frac{U_{In}}{U_{out}} \times \frac{1}{f}$$

4.2.2 Dimensionierung

Zur Dimensionierung des Step-Up Converters wird folgender Schaltplan verwendet.

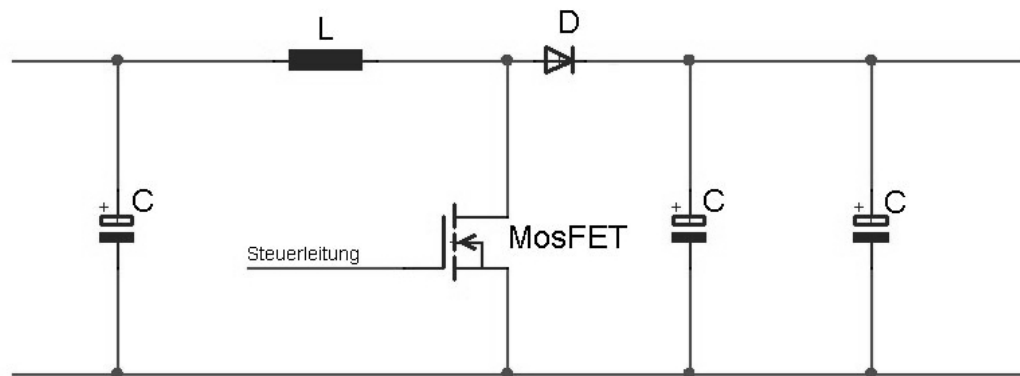


Abb. 37 Step-Up-Converter Schaltung

Da die Spule als Energiespeicher dient, und nicht im diskontinuierlichen Betrieb gearbeitet werden soll, muss diese groß genug sein um am Ausgang genügend Energie zu Verfügung zu stellen. Aus den Formeln des StepUp Converters lässt sich folgende Gleichung zur Berechnung der Spule ableiten:

$$L = \left(\frac{1}{\Delta I_L} \right) \times (U_{Aus} - U_{ein}) \times \left(\frac{U_{Ein}}{U_{Aus}} \right) \times \left(\frac{1}{f} \right)$$

Die Kondensatoren am Ein und Ausgang des Step-Up Converters dienen der Glättung des Signals. Der Ausgangskondensator wird während der Zeit t_{off} geladen und muss während der Zeit t_{on} den Ausgang mit Strom versorgen, der Strom fließt also zwei mal durch ihn, daher wirkt sich auch sein ESR stärker aus. Für eine zulässige Schwankung des Ausgangssignals gilt folgende Formel:

$$C > \frac{I_{out} \times DC}{f \times dU_{out}}$$

Bei größeren Lastströmen und höheren Schaltfrequenzen ($f > 10 \text{ kHz}$) wirkt sich der ESR noch stärker aus.

Außerdem gilt:
$$dU_{out} = \frac{I_{out} \times ESR}{DC}$$

Bauteiltermittlung

Folgende Parameter wurden zur Dimensionierung des Step-Up Converters festgelegt:

$U_{\text{Ein}} = 26 \text{ V}$ Die maximal auftretende Eingangsspannung.

Max

$I_{\text{Ein Max}} = 5 \text{ A}$ Der maximale Eingangsstrom

$f = 40\,000 \text{ Hz}$ Die Schaltfrequenz des Transistors

$ESR = 60 \text{ m}\Omega$ Angenommener Innenwiderstand

$\Delta I_L = 20\% I_{\text{Ein}}$ Die Welligkeit des Spulenstroms

Mit diesen Angaben kann die Berechnung durchgeführt werden.

Induktivität

$$L = \left(\frac{1}{\Delta I_L} \right) \times (U_{\text{Aus}} - U_{\text{ein}}) \times \left(\frac{U_{\text{Ein}}}{U_{\text{Aus}}} \right) \times \left(\frac{1}{f} \right)$$

$$L = \left(\frac{1}{1 \text{ A}} \right) \times (27,6 \text{ V} - 26 \text{ V}) \times \left(\frac{26 \text{ V}}{27,6 \text{ V}} \right) \times \left(\frac{1}{40.000 \text{ Hz}} \right)$$

$$L = 0,000037681 \text{ H} = 37 \text{ mH}$$

Gewählt wurde für die Schaltung jedoch eine Spule mit $250 \mu\text{H}$ auf Grund von Erfahrungswerten aus einschlägiger Literatur.

Kondensatoren

$$dU_{\text{out}} = \frac{I_{\text{out}} \times ESR}{DC} = \frac{I_{\text{Ein}} \times \frac{U_{\text{Ein}}}{U_{\text{Aus}}} \times ESR}{DC}$$

$$dU_{\text{out}} = \frac{5 \text{ A} \times \frac{26 \text{ V}}{27,6 \text{ V}} \times 60 \text{ m}\Omega}{0,9} = 0,314 \text{ V}$$

$$C > \frac{I_{\text{out}} \times DC}{f \times dU_{\text{out}}} = \frac{I_{\text{Ein}} \times \frac{U_{\text{Ein}}}{U_{\text{Aus}}} \times DC}{f \times dU_{\text{out}}}$$

$$C > \frac{5 \text{ A} \times \frac{26 \text{ V}}{27,6 \text{ V}} \times 0,9}{40.000 \text{ Hz} \times 0,314 \text{ V}} = 0,0003375 \text{ F}$$

Bei den Ausgangskondensatoren werden zwei Kondensatoren parallel geschaltet um die Kapazität zu erreichen. Dadurch verringert sich der Gesamtinnenwiderstand der Kapazität welcher verantwortlich für die Leistungsverluste im Kondensator ist. Außerdem werden großvolumige Kondensatoren verwendet, da diese in der Regel oft kleinere ESR besitzen. Es wird ein 1000µF/63V ELKO verwendet, da diese die Anforderungen erfüllen und uns von unserem Betreuer DI Meschik zur Verfügung gestellt wurden.

MosFET

Als Schalter wird ein Power MosFET verwendet. Dieser muss den auftretenden Strom, $I = 5\text{ A}$ schalten können und gleichzeitig die maximale Spannung $U = 26\text{ V}$ aushalten. Die Wahl fiel auf den BUZ102AL von Siemens, dieser hält 50 V und 42 A aus und hat nur einen Innenwiderstand von 28 Milliohm. Geht man von 10 A Spulenstrom aus bedeutet dies einen Verlust von 2,8 Watt. (Das Datenblatt befindet sich im Anhang G)

Sperrdiode

Die Sperrdiode muss ebenfalls für die maximal auftretenden Ströme und Spannungen ausgelegt sein. Gewählt wurde die Schottky Diode MBR1645 von General Semiconductor da diese für das Schalten in höheren Frequenzbereichen geeignet sind. Sie hält konstant 16 A und Spitzenströme von 32 A stand und hält eine Spannung von 45 Volt aus. Bei einem durchschnittlichen Diodenstrom von 5 A und einem Spannungsabfall von 0,7 Volt bedeutet das einen Verlust von 3,5 Watt. (Das Datenblatt befindet sich im Anhang G)

Zusammen ergeben die Verluste also in Summe weniger als 10 Watt. Dies ist jedoch nur ein idealisierter Wert, da jeweils die idealen Bedingungen und Werte angenommen wurden. In der Realität steigt dieser Wert leicht auf das doppelte an, wenn nicht alle Bauteile ideal sind.

4.3. Beschreibung des MPPT – Schaltungsaufbau

Das Blockschaltbild, auf welches alle folgenden Beschreibungen bezogen sind, sieht wie folgt aus:

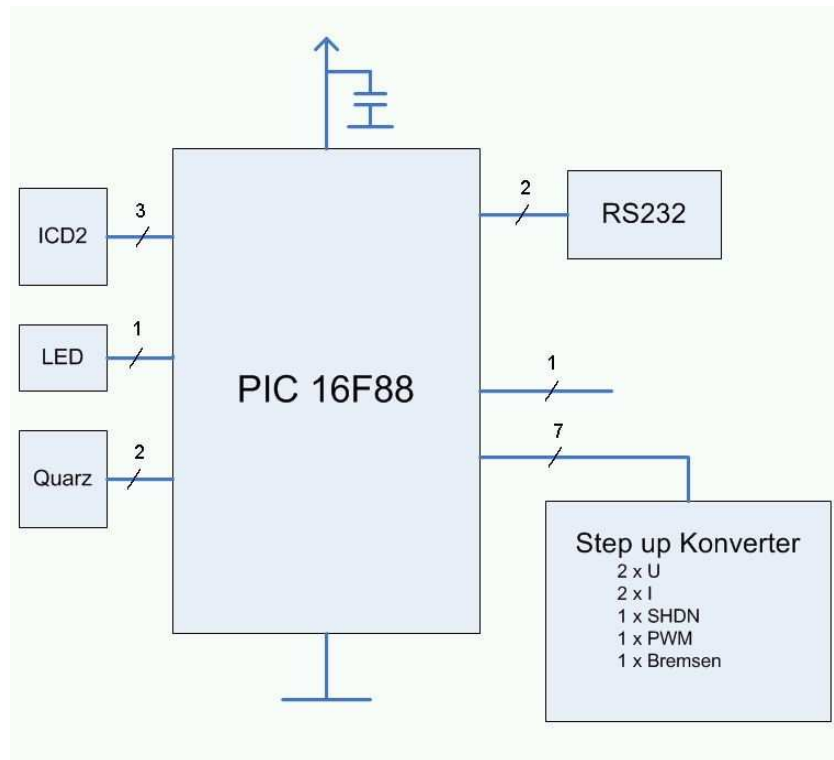


Abb. 38 Blockdiagramm

4.3.1 Anforderungen

Der Step-up-Converter ist das Herzstück der Elektronik des Maximum Power Point Trackers. Für die Steuerung und Kontrolle dieser Schaltung mussten aber weitere Verbindungen zwischen dem Aufwärtswandler und dem Microchip PIC geschaffen werden. Dazu sollte zuerst ein Blockschaltbild mit allen Anforderungen und Wünschen an die wirkliche Platine entworfen werden, anhand dieser Überlegung und Skizze kann man dann mit dem Zeichnen des großen Schaltplans starten. Das Blockschaltbild wurde in mehreren Schritten erarbeitet, zuerst wurden alle wichtigen Steuerungs- und Messleitungen zwischen PIC und Step-up-Converter geplant. Es müssen die Spannung und der Strom am Eingang des Aufwärtswandlers gemessen werden, das heißt je eine Messleitung für Strom und Spannung gehen vom Schaltungseingang zum PIC16F88. Außerdem müssen für eine mögliche Steuerung des Wandlers die aktuelle Ausgangsspannung und der Ladestrom messbar gemacht werden, auch dazu wird je eine Leitung benötigt. Die letzte wichtige Verbindung geht vom PWM (Pulsweitenmodulation) Ausgang zu einem MOSFET-Transistor welcher den Aufwärtswandler steuert.

4.3.2 PIC-Versorgung LT1129 – Quarz

Der Maximum Power Point Tracker regelt die Eingangsspannung auf eine höhere Ausgangsspannung die im Bereich von 24V bis 27,8V liegt. Mit dieser Spannung vom 24V-Akkumulator kann man nicht direkt die Elektronik wie Mikroprozessor, Treiberbausteine und andere IC's versorgen. Es mussten daher fertige Spannungsregler eingesetzt werden, welche Spannungen bis 30V in 5V und 12V regeln können, dabei sollten außerdem möglichst geringe Verluste auftreten. Für die MPPT-Schaltung wurde der LT1129 von Linear Technologies eingesetzt, diesen gibt es unter anderem im TO-220 Gehäuse in Ausführungen von 3,3V, 5V und einstellbarer Ausgangsspannung. Es musste daher die Außenbeschaltung für 12V und 5V berechnet werden, diese beiden Spannungspegel konnten die gesamte Regelelektronik ausreichend versorgen.

4.3.3 Berechnungen Spannungsregler LT1129:

- 12V-Spannungsversorgung

$$R1 = 100k\Omega, U = 12V, R2 = ?$$

Die Formel zur Berechnung wurde aus dem Datenblatt (Seite 9) für LT1129 entnommen.

$$U_{ADJ} = 3,75V, I_{ADJ} = 150nA$$

$$V_{out} = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + (I_{ADJ} \cdot R2)$$

$$12V = 3,75V + \frac{R2}{100k\Omega} \cdot 3,75V + 150nA \cdot R2$$

$$\Rightarrow R2 = \left(\frac{12V - 3,75V}{\frac{3,75V}{100k\Omega} + 150 \cdot 10^{-9}} \right) = 219,123k\Omega$$

$$\rightarrow R2 = 220k\Omega$$

- 5V-Spannungsversorgung

$$R1 = 100k\Omega, U = 5V, R2 = ?$$

$$V_{out} = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + (I_{ADJ} \cdot R2)$$

$$5V = 3,75V + \frac{R2}{100k\Omega} \cdot 3,75V + 150nA \cdot R2$$

$$\Rightarrow R2 = \left(\frac{5V - 3,75V}{\frac{3,75V}{100k\Omega} + 150 \cdot 10^{-9}} \right) = 33,333k\Omega$$

$$\rightarrow R2 = 33k\Omega$$

Weiters wichtig ist die Verwendung eines externen Oszillators, da der interne Oszillator des PIC16F88 maximal 4MHz erzeugt. Um eine erforderliche PWM-Steuerfrequenz von ca. 40kHz zu ermöglichen sind 4MHz eine zu niedrige Frequenz. Mit Hilfe einer kurzen Berechnung wurde die erforderliche Quarzfrequenz ermittelt.

Interner Oszillator: 4 MHz aufgeteilt für 8 Bit

$$2^8 \text{ Möglichkeiten} = 256$$

$$\frac{4 \text{ MHz}}{256} = 15,625 \text{ kHz}$$

Die Steuerung des Transistors muss mit einer Pulsweitenmodulation in einem Frequenzbereich von 30 bis 70 kHz erfolgen. Der interne Oszillator ist daher für die Steuerung des Step-up-Converters ungeeignet, es wird ein externer Quarz benötigt. Die Berechnung mit einem 10 MHz Quarz ergibt ein brauchbares Ergebnis von ca. 40 kHz PWM, auch eine noch schnellere Oszillatorfrequenz wäre denkbar.

10 MHz Quarz: 10 MHz aufgeteilt für 8 Bit

$$2^8 \text{ Möglichkeiten} = 256$$

$$\frac{10 \text{ MHz}}{256} = 39,0625 \text{ kHz}$$

Der externe Quarz benötigt zwei Pins des PIC16F88, eine weitere wichtige Erweiterung der Schaltung ist die Möglichkeit einer Notabschaltung. Dazu muss ein Ausgang mit einem leistungsstarken MOSFET-Transistor verbunden werden, dieser soll einen Bremswiderstand aktivieren um den Rotor auch ohne Last zu bremsen. Der Widerstand liegt im 5 bis 10 Ω Bereich und hält hohe Leistungen aus, somit wird der Rotor über den Generator elektrisch belastet und etwas gebremst. Diese Option muss dann aktiviert werden, wenn auf Grund der vollständigen Aufladung des Akkus keine weitere Ladung mehr vorgenommen werden darf. Dann wird der Akku mittels Schalter vom Aufwärtswandler getrennt, die Belastung des Generators erfolgt dann über den Bremswiderstand und damit wird der Rotor durch die Belastung gebremst und gerät

nicht außer Kontrolle. Als Transistor wird wieder ein BUZ102 verwendet, da dieser auch die hohen Spannungen und Ströme unbeschadet aushält, um den Transistor mittels PIC steuern zu können wird der zweite Kanal des Treibers TC4427A verwendet. Um eine nützliche Belastung als Bremse mittels Widerstand zu erzeugen, muss bei dieser so dimensioniert sein, dass er möglichst viel Strom fließen lässt. Dieser Widerstand muss sehr hohe Leistungen aushalten, die Dimensionierung erfolgt am einfachsten mit Hilfe des ohmschen Gesetzes:

Lastaufnahme von $U = 30V$ und $I_{\text{Brems}} = 5A$

$$\Rightarrow R = \frac{U}{I} = \frac{30V}{5A} = 6\Omega$$

→ Gewählter Bremswiderstand $6,8\Omega$

Abfallende Maximalleistung:

$$P = U \cdot I = 30V \cdot 5A = 150W$$

Anhand der Rechenergebnisse wurde ein 200W Leistungswiderstand mit dem Wert $6,8\Omega$ ausgewählt.

4.3.4 Messung

Die **Spannungsmessung** erfolgt im Prinzip mit Hilfe eines einfachen Spannungsteilers, dieser muss so dimensioniert sein dass der messbare Spannungsbereich zwischen 0V und Maximalspannung des Generators, auf einen Bereich zwischen 0V und maximal 5V aufgeteilt wird. Eine Anforderung an die PIC-Steuerung ist allerdings sehr hohe Sparsamkeit um die Entladung des Akkus durch die Steuerung möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund ist der einfache Spannungsteiler nicht gut genug, die Schaltung darf nur kurze Zeit während der Messung Strom verbrauchen, daher braucht man eine etwas aufwendigere Messschaltung mit 2 unipolaren Transistoren. Die Transistoren erlauben dem PIC eine gezielte Ansteuerung, dass heißt nur für kurze Zeit wird die Spannungsmessung zum Mikroprozessor verbunden. Die Ansteuerung des Schaltransistors der Spannungsmessschaltung benötigt einen weiteren PIC-Ausgang. Somit kann man mit dem Mikroprozessor kurzzeitig die Spannungsmessung zum PIC-Eingang verbinden, die Spannung am Eingang bzw. Ausgang kann man mit Hilfe des ADC-Moduls und der geschriebenen Software mit dem PIC16F88 direkt einlesen.

Als nächstes wurden Überlegungen zur **Strommessung** unternommen, auch hier musste eine möglichst sparsame Lösung gefunden werden. Ströme kann man mittels PIC nicht einfach direkt aus der Schaltung messen, es werden weitere eigene spezielle IC-Bausteine benötigt. Die entwickelte Steuerschaltung verwendet zur Strommessung den Bauteil MAX472 der Firma Maxim. Dieser Bauteil eignet sich besonders für die MPPT-Steuerung, da er einfach den Strom über einen definierten Sensorwiderstand direkt aus der Schaltung messen kann. Die Sparsamkeit erreicht der IC mit Hilfe der Shutdown-Leitung, somit kann auch der Stromverbrauch der Strommessung auf kurze Zeit beschränkt werden. Die Shutdown-Leitungen beider Strommessungseinheiten sind mit einer Leitung an den PIC verbunden, mithilfe eines weiteren Transistors kann der PIC die Messung einschalten und erhält erst dann die Messwerte am Eingang. Am Output des MAX472 wird bei richtiger Dimensionierung des Ausgangswiderstands der gemessene Stromwert proportional in Form einer Spannung ausgegeben. Somit wird dem PIC eine brauchbare Strommessung ermöglicht, da der PIC die Spannung des MAX472 mittels AD-Wandlung messen und aufnehmen kann.

AD-Wandlung – Spannungsteiler

$$R2 = 10k\Omega$$

$$\frac{U1}{U2} = \frac{R2 + R1}{R2}$$

$$R1 = \frac{U1}{U2} \cdot R2 - R2 = \frac{30V}{5V} \cdot 10k\Omega - 10k\Omega =$$

$$R1 = 50k\Omega$$

$$\rightarrow R1 = 50k\Omega$$

Exakter Aufbau in der Leiterplatte durch Serienschaltung von 47kΩ und 3,9kΩ = 50,9kΩ

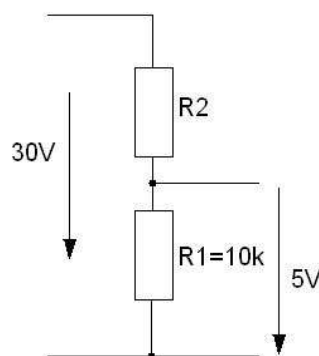


Abb. 39 Spannungsteiler

Verluste und Leistungen im Step-up-Converter:

Worst-case: $U = 28V$, $I = 5A$

Abfall $5m\Omega$ Messwiderstand für Strommessung:

$$U = R \cdot I = 5m\Omega \cdot 5A = 25mV$$

$$P = U \cdot I = 25mV \cdot 5A = 125mW = 0,125W$$

4.3.5 Transistorsteuerung

Die programmierte Software des Mikrokontrollers ermöglicht dem PIC eine weitere Verarbeitung der Messwerte und ermittelt das dementsprechende PWM-Signal. Dieses Signal muss über den Steuerausgang zum MOSFET-Transistor übertragen werden, dieser verändert dadurch seine Ein- und Ausschaltzeit und regelt den Step-up-Converter. Als Transistor wird ein MOSFET vom Typ BUZ102 der Firma Siemens eingesetzt, dieser Bauteil ist für Spannungen bis 50V und einen Maximalstrom von 30A ausgelegt. Der BUZ102 benötigt zur Ansteuerung eine Spannung über 5V, daher muss man einen Treiber einsetzen. Als Treiber wird der TC4427A von Microchip verwendet und verstärkt das PWM-Ausgangssignal auf die erforderliche Ansteuerspannung. Alle unbedingt notwendigen Steuer- und Messleitungen sind nun festgelegt, um die Steuerung des Aufwärtswandlers aber wirklich realisieren zu können müssen weitere Komponenten in die bisherige Schaltung eingebaut werden.

Kontrollrechnung PIC-Ausgang:

$$I_{\max} = 25mA$$

Verwendung von 3 Transistoren mit $R_{GS} = 20k\Omega$

$$U = 5V$$

$$\Rightarrow I = \frac{U}{R} = \frac{5V}{20k\Omega} = 0,25mA$$

0,25mA pro Transistor ergibt insgesamt $3 \times 0,25mA = 0,75mA$

→ Gemeinsame Aktivierung von drei BSS89-Transistoren ist zulässig.

4.3.6 RS-232 – DS-275

Alle weiteren Teile der kompletten Schaltung sind zur Kommunikation und direkten Programmierung des PIC16F88, diese Bauteile und Schnittstellen sind also nicht mehr unbedingt für die korrekte Steuerung des Aufwärtswandlers nötig, erleichtern aber den Umgang und die Fehlersuche enorm.

Die erste Komponente der kompletten Schaltung ist die serielle Schnittstelle, welche eine Datenübertragung der Messwerte vom PIC zum PC ermöglicht. Zwei Pins des PIC16F88 sind die RX (RB2) und die TX-Leitung (RB5) und sind über einen

Transceiver-Baustein von Dallas Semiconductor mit der Schnittstelle verbunden. Die RS232-Schnittstelle benötigt Spannungen von $\pm 3V$ bis $\pm 15V$, der PIC sendet und empfängt Spannungen von 5V und 0V. Der so genannte DS275 ist ein 8-Pin RS232-Transceiver-Chip, welcher die Spannungen der RS232-Schnittstelle in Logic Level wandelt (5V/0V). Der DS275 ist kostengünstig und wurde für das Diplomprojekt von Dallas Semiconductor als Sample verschickt. Er wurde für den MPPT gewählt, da er line-powered arbeitet, das heißt der Chip kann für die Sendeleitung die nötige Spannung von der Empfangsleitung über den PC entnehmen. Dies erfolgt durch eine ausgeklügelte einzigartige Schaltung im IC, die es ermöglicht, dass die Sendeleitung des Chips die Versorgung von seiner Empfangsleitung „stiehlt“. Diese Eigenschaft funktioniert solange die Sendeleitung auf Marking-Pegel ist, was bei standardmäßiger serieller Übertragung über einen Großteil der Verbindungszeit der Fall ist, z.B. in allen Wartepausen wenn keine Datenübertragung erfolgt. Somit muss der DS-275 nur kurzzeitig von seiner eigenen Versorgungsleitung Strom ziehen. Dadurch ist dieser Transceiver-Bauteil sehr sparsam, die einzige Beschränkung liegt darin das er keine wirkliche voll-duplexe Übertragung ermöglicht. Außerdem kann es sein, dass der DS-275 während der Datenübertragung nicht immer die Mindestpegel der RS-232 einhält, allerdings sind die Abweichungen so gering sodass fast alle Geräte die Signale richtig lesen können. Da der PIC beim Step-up-Converter allerdings nur Messwerte senden muss, reicht eine halb-duplexe Datenübertragung über die serielle Schnittstelle vollkommen aus.

4.3.7 ICD2 & Sonstiges

Eine weitere Komponente ist die ICD2-Schnittstelle, welche uns das Programmieren des PIC's in der eingebauten Schaltung ermöglicht. Weiters kann man mit Hilfe des ICD2-Steckers den PIC mit dem PC verbinden und debuggen. Das heißt es gibt eine Möglichkeit die einzelnen Programmschritte über den PC zu kontrollieren und dabei eventuelle Softwarefehler leichter aufzufinden. Der ICD2-Stecker hat 5 Pins, wobei je einer für Masse und Versorgung dienen, alle drei weiteren Anschlüsse müssen direkt mit dem PIC verbunden werden.

Nach Abschluss der Schaltungsentwicklung bleibt noch ein PIN frei, dafür eignet sich besonders der RB0 als Interrupt-Pin. An diesem Pin könnte noch ein Schalter für eventuelle Erweiterungen der MPPT-Schaltung angeschlossen werden.

Der Schaltplan befindet sich in Anhang E.

4.4. Platinenlayout

4.4.1 Layout

Nachdem fertig stellen des vollständigen Schalplans in Eagle konnte man mit dem Erstellen des Leiterplattenlayouts starten. Mit der verwendeten Zeichensoftware Eagle ist es möglich direkt aus dem Schalplan in den Layoutmodus zu wechseln. Der Schaltplan wird gespeichert und wird ab diesem ersten Umschalten sozusagen „verlinkt“ mit dem Layout, somit werden alle nachträglichen Änderungen in der Schaltung schnell und einfach im Leiterplattendesign mit geändert. Hauptaufgabe beim Leiterplattendesign ist es, die entworfene Schaltung für die spätere Fertigung auf einer Leiterplatte abzubilden. Man muss dabei immer bedenken, dass auch die beste Schaltung bei falschem Platinendesign funktionsuntüchtig sein kann, da verschiedenste Arten von Leitungen auf so kleinem Raum enorme Störungen und Fehlwirkungen erzeugen können. Dazu werden im Anhang die allgemeinen Design-Regeln zum Layoutentwurf erklärt, in diesem Kapitel folgt die Beschreibung der Spezialitäten der MPPT-Leiterplattenentwicklung.

Hauptaugenmerk beim Design der MPPT-Schaltung ist die Verlegung der Pulsweitenmodulierte (PWM) Signalleitungen, welche direkt, kurz und kreuzungsfrei verlegt werden müssen. Die Messleitungen für Strom- und Spannungsmessung wurden ebenfalls kurz und störungsfrei verlegt um große Messfehler vermeiden zu können. Für die Maximum Power Point Tracker - Schaltung wurde eine Europlatine mit den Abmaßen 160mm x 100mm ausgewählt, denn bei dieser Größe bleibt Platz für alle Leiterbahnen, große Bauteile wie Spule und Kondensatoren und auch für Kühlkörper. Alle Leitungen des Step-up-Converters müssen höhere Ströme und Leistungen aushalten und es werden Leiterbahndicken von bis zu 4mm Stärke verwendet, weiters soll der Leistungsstromkreis keine unnötigen Umwege beinhalten und daher immer den kürzesten Verbindungsweg verfolgen. Die Klemmleisten befinden sich natürlich am Rand, die 220µH Spule ist aufgrund der Größe sehr platzaufwendig und es musste ein genügend großer Freiraum eingeplant werden. Ein bedrahteter 1mF Kondensator befindet sich am Eingang des Step-up-Converters, die beiden anderen beim Ausgang. Dazwischen mussten im Layout die Schottky-Diode und die beiden BUZ102-Transistoren so eingebaut werden, dass alle drei Teile im TO-220 Gehäuse an einem gemeinsamen Kühlkörper befestigt werden können.

Im nächsten Schritt wurden die Strom- und Spannungsmessung am Schaltungseingang eingeplant. Am wichtigsten und besonders aufwendig ist dabei das richtige Design der Strommessung mit allen Widerständen und Kondensatoren rund um den IC MAX472. Ein 5mΩ Messwiderstand wird im Stromkreis des Step-up-Converters eingebaut. Vom Messwiderstand führen zwei kurze und unbedingt

gleichlange (!!) Leitungen über die Vorwiderstände direkt zu den Messeingängen des IC's. Weiters wichtig ist eine eigene dicke Verbindungsleitung vom Aufwärtswandler-Eingang zum IC, welche für den MAX472 als Versorgungsleitung benötigt wird. Da das Layout sowohl für den MAX472 (Strommessungen bis 10A) als auch für den MAX471 (Strommessungen bis 3A) ausgelegt wurde, befinden sich noch weitere Widerstände im Umfeld des IC, welche aber je nach Bauteilauswahl verschiedene Werte besitzen (teilweise 0Ω -Widerstände oder manche Pads werden nicht bestückt). Alle Leitungen wurden manuell nach den beschriebenen Voraussetzungen verlegt, die Leiterbahnen haben großteils eine Dicke von $0,04\text{inch} = 1,016\text{mm}$, nur die Verbindungen weg von den Bauteilen in den SO-8 Gehäusen (MAX472, DS275) sind noch dünner mit $0,016\text{inch} = 0,4064\text{mm}$.

Am Layout wurden zum Schluss mehrere GND-Flächenbereiche für die Leistungsteile und die IC's separat erstellt und nur durch einzelne Verbindungen am GND-Sternpunkt am Eingangskondensator miteinander verbunden. Nach der Verlegung aller Leiterbahnen und dem Erzeugen von brauchbaren GND-Flächen wird das Layout auf Papier gedruckt um Fehler zu korrigieren, Leitungslängen zu optimieren und die Dicke von Bahnen weiter zu erhöhen.

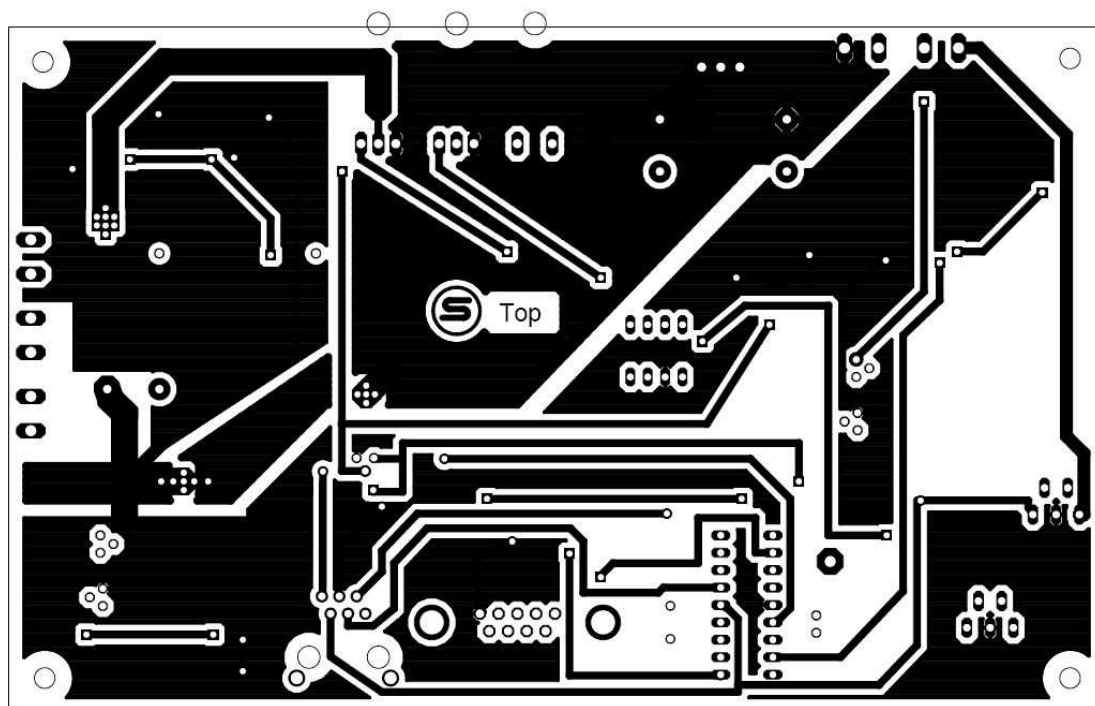


Abb. 40 Layout Top

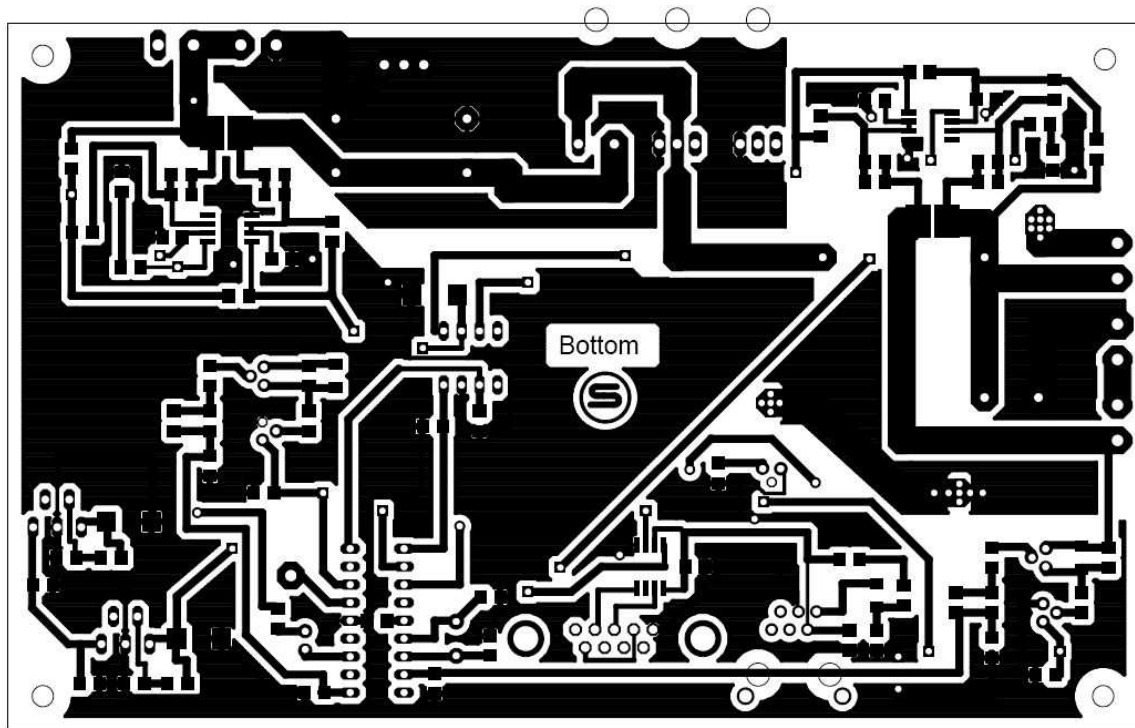


Abb. 41 Layout Bottom

4.4.2 Fertigung der Leiterplatte

Bei der Fertigung der Leiterplatte mussten in der Elektronik-Werkstätte zu allererst das Layout vom PC auf geeignete Folien gedruckt werden. Es wurden Laserdruckerfolien verwendet und das Layout ist zentriert platziert worden, um die Verzerrung des Druckes zu minimieren. Beide Platinenseiten muss man zweimal drucken um danach eine geeignete „Tasche“ zum Belichten basteln zu können. Zweifacher Ausdruck deshalb, da im ersten Versuch die Belichtung schlecht war, dass heißt der Kontrast zwischen Leiterbahnen und dem Rest war nicht stark genug. Zwei Folien pro Seite minimieren die Fehler beim Belichten, die Leiterplatte wird dabei an den Ecken in die Tasche geklebt um Verrutschen beim Wechsel von Ober- auf Unterseite zu verhindern. Ideale Belichtungszeit beträgt ca. 8min bei Verwendung des fotolackvorbeschichteten Rohmaterials von Conrad.

Nachdem Entwickeln wurde die Leiterplatte im Ätzbad ca. 25 – 30min behandelt, den genauen Zeitpunkt für das Entnehmen aus dem Ätzbad muss man gegen Ende ständig kontrollieren. Sobald alle Leiterbahnen optimal erkennbar sind, d.h. es gibt keine Kurzschlüsse zwischen verschiedenen Leiterbahnen oder Flächen, wird die Leiterplatte entnommen und abgespült. Danach wurden alle Durchgangslöcher mit einem $\varnothing 0,9\text{mm}$ Bohrer gebohrt, für die Klemmen und die Spulenanschlüsse musste ein $\varnothing 1\text{mm}$ Bohrer verwendet werden.

Abschließend zur Leiterplattenfertigung konnten beide Seiten hintereinander mit Lötack besprüht werden und danach je 40min pro Seite im Ofen trocknen. Nun war die Leiterplatte für die Bestückung und anschließende Tests vorbereitet. Die Bestückung wurde in mehreren Schritten durchgeführt um die Komponenten in der Leiterplatte testen zu können. Abschließend musste die PIC-Software in der fertigen Platine durchgetestet und erweitert.

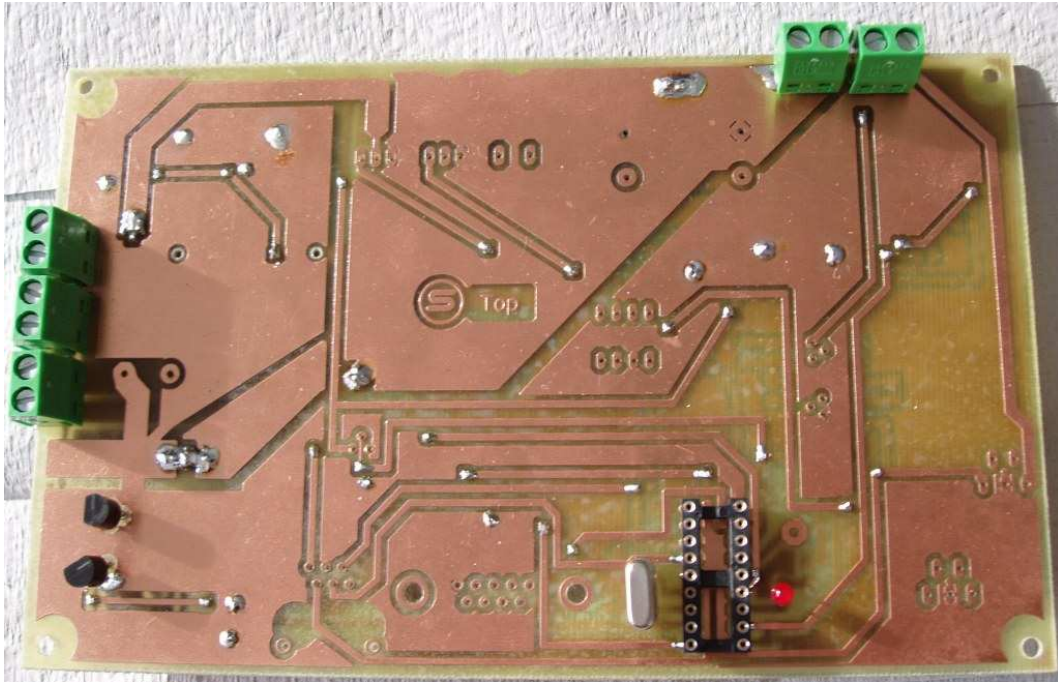


Abb. 42 Platine Top

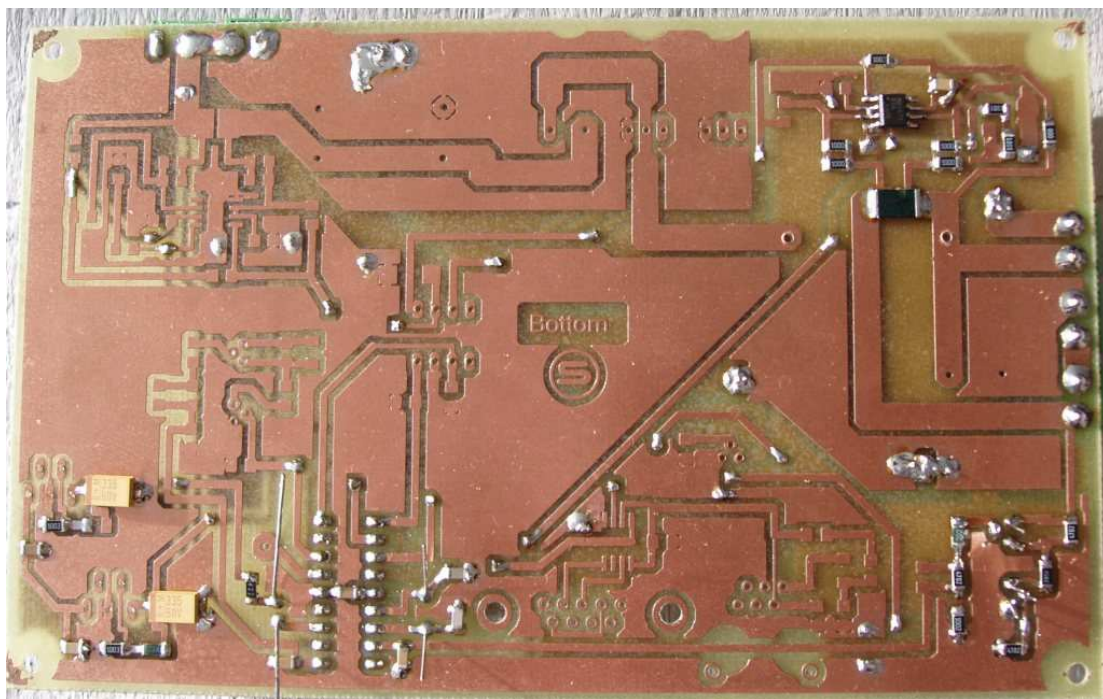


Abb. 43 Platine Bottom

4.4.3 Schrittweise Inbetriebnahme der Leiterplatte

Das Bestücken der fertigen Leiterplatte musste wieder in einzelnen Baugruppen erfolgen um Kontrollen durchführen zu können. Vor dem Einbau von elektrischen Bauteilen konnten alle Durchkontaktierungen mittels Widerstanddraht realisiert werden. Danach wurden zuerst wichtige Komponenten zum Testen wie die 18-Pin PIC-Halterung, der ICD2-Stecker, Quarz und die Betriebsleuchtdiode eingelötet. Danach konnten mit der LED und einfachen PIC-Programmen Teile der Schaltung überprüft werden. Die Kontrolle bestand zuerst aus optischer Kontrolle, das heißt ob auch alle Bauteile sichtbar richtige Kontakte zur Leitebahn hatten und keine kalten Lötstellen vorhanden waren. Weiters mussten Leiterbahnen mit dem Durchgangsprüfgerät kontrolliert werden, um alle zum Test notwendigen Leitungen auch verwenden zu können. Abschließend wurde mit einem PIC-Programm die Betriebs-LED aktiviert und das Debuggen bzw. Programmieren über den schaltungseigenen ICD2-Stecker getestet.

Weitere Schritte waren der Einbau der Spannungsregler für 5V und 12V mit den entsprechenden Einstell-Widerständen und eine Spannungsmesskomponente. Die Spannungsregler mussten konstant die gewünschte Versorgungsspannung am Ausgang liefern können, die Erwärmung auf Grund der Last wurde ebenfalls überprüft. Nachdem erfolgreichen Bestehen des Tests wurde die Spannungsmesseinrichtung am Eingang aktiviert. Die Freischaltung der Messung, welche im Betrieb über einen PIC-Ausgang realisiert wird, musste durch eine passende Drahtbrücke simuliert werden. Danach konnte am gewünschten PIC-Eingang die Messspannung mit dem Multimeter ausgelesen werden. Mit den passenden Ergebnissen konnte die Funktionstüchtigkeit der Spannungsmesskomponente bestätigt werden, ab nun war die Bestückung der zweiten Spannungsmessung am Step-up-Converter Ausgang sinnvoll.

Die nächste Stufe der Bestückung der Leiterplatte beschäftigte sich mit der Strommesskomponente. Dafür mussten eine komplette Beschaltung des MAX472 und der richtige Einbau des BSS89-Transistors auf der Shutdown-Leitung bereits erfolgt sein. Im Test wurde der Messstrom mit dem Netzgerät und einem passenden Widerstand eingestellt, die umgewandelte Ausgangsspannung für den PIC-Eingang konnte wieder über das Multimeter entnommen und ausgewertet werden.

Weiters interessant war der Einbau der RS-232 Schnittstelle mit dem Transceiver-IC DS275. Mit der fertigen Bestückung der seriellen Schnittstelle wurden mit Hilfe des PIC's die gemessenen Strom und Spannungswerte in Hex-Code zum PC übertragen. Nach positiver Auswertung wurde die Leiterplatte abschließend nach Plan fertig bestückt und gelötet.

Nachdem letzte optische Kontrollen an der fertig bestückten Leiterplatte vorgenommen wurden, musste ab nun der Programmablauf der MPPT-Regelung getestet werden. Die Eingangsspannung wurde in der Testphase mit einem Solarpanel simuliert, ansonsten waren alle anderen Leiterplattenkomponenten fertig. Das Solarpanel wurde vom Betreuer DI Martin Meschik zur Verfügung gestellt und hat folgende Kenndaten:

4.5. Programm

4.5.1 Aufgaben

Der PIC-Mikrokontroller hat die Aufgabe den Step-Up-Converter so zu regeln, dass dieser möglichst nahe am Maximum Power Point bleibt, indem er den Schalttransistor mit einer Pulse-Weiten-Modulation (PWM) ansteuert. Das Programm muss dazu feststellen ob eine Veränderung der Einschaltdauer einen positiven oder negativen Effekt in Bezug auf das Leistungsergebnis erzielt. Basierend auf diesem Ergebnis erhöht oder verringert das Programm die Einschaltdauer des Transistors um die Leistung zu maximieren. Da sich der Savoniusrotor nicht innerhalb kürzester Zeit an eine Laständerung anpassen kann, das Programm jedoch sehr schnell abgearbeitet wird darf das Tastverhältnis nicht bei jedem Durchlauf geändert werden. Der Wert wird erst bei jedem 16ten Überlauf des PWM-Timers geändert um dem Rotor mehr Zeit zur Anpassung zu lassen.

Der Step-Up-Converter ist nicht kurzschlussfest, daher muss das Programm dieses Problem berücksichtigen und verhindern. Es darf nur eine Einschaltdauer von 10%-90% zulassen.

Außerdem ist in dem Programm auch eine Routine eingebaut, welche es erlaubt, die Messwerte an den PC zu übertragen um diese anschließend zu analysieren. Da die Versorgung des Pegelwandlers vergleichsweise viel Energie benötigt, darf dies nur geschehen wenn der PC angeschlossen ist und die Messwerte auch anfordert.

4.5.2 Hauptprogramm

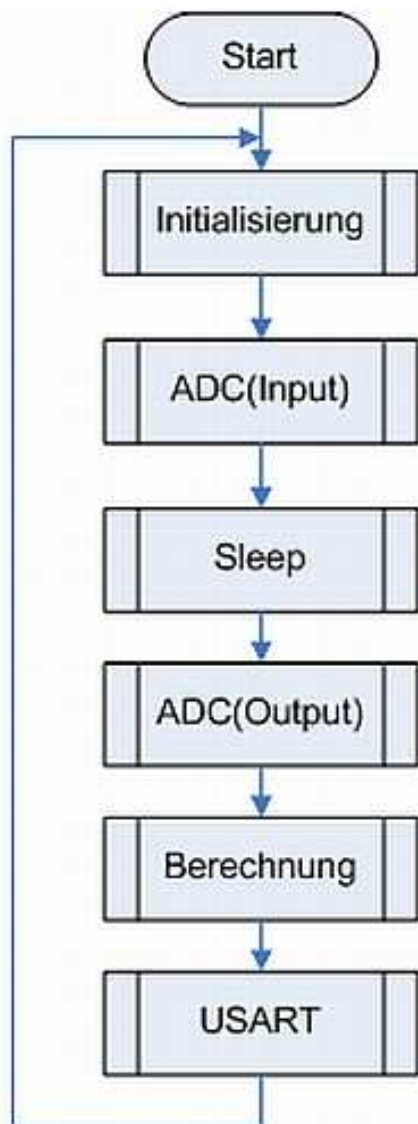


Abb. 44 Flussdiagramm

Das Hauptprogramm läuft in einer einfachen Schleife und ruft dabei ein Unterprogramm nach dem anderen auf welche zur Regelung nötig sind.

Bei der Initialisierung werden alle wichtigen Module konfiguriert, Initialwerte geladen und die PWM gestartet.

Im nächsten Schritt werden mittels des Unterprogramms ADC(Input) die Strom- und Spannungswerte an der Eingangsseite des Step-Up-Converters mit dem Analog-Digital-Modul eingelesen.

Anschließend wird überprüft ob ein Betrieb des MPPT sinnvoll ist. Ist dies nicht der Fall wird der PIC in den stromsparenden Sleep-Mode versetzt und nach dem Ablauf einer kurzen Wartezeit durch den Watch-Dog-Timer (WDT) wieder geweckt und zum Programmstart gesprungen.

Nun werden auch die Strom- und Spannungswerte der Ausgangsseite in der Routine ADC(Output) eingelesen.

In dem Unterprogramm Berechnung wird die Leistung berechnet und mit dieser ein Wert für das neue Tastverhältnis der PWM festgelegt.

Zuletzt wird das Unterprogramm zur seriellen Datenübertragung aufgerufen. Es übermittelt die Messdaten an den PC, falls dieser sie anfordert.

Nach jedem 16ten Überlauf der PWM wird ein Interrupt ausgelöst. In der Interrupt-Service-Routine wird das Tastverhältnis (CCPR1L-Wert) aktualisiert.

4.5.3 Unterprogramme

ADC

Im Unterprogramm der Analog-Digital-Wandlung wird auf Grund der vom Hauptprogramm übergebenen Parameter der gewünschte Analogwert (Eingangs-/Ausgangswerte) eingelesen. Zuerst die Steuerleitung für die Messungen auf High gesetzt, welche die Transistoren zur Spannungsmessung durchschaltet und den MAX472 aktiviert. Anschließend wird der Analog-Channel festgelegt und die Wandlung eingeleitet. Ist die Wandlung abgeschlossen, wird das Ergebnis an das Hauptprogramm zurückgegeben und die Steuerleitung wieder auf Low gesetzt.

Sleep

Bei der Sleep-Überprüfung wird getestet, ob die Eingangsspannung einen sinnvollen Grenzwert überschreitet. Ist dies der Fall läuft das Programm normal weiter. Liegt die Spannung jedoch unter dem festgelegten Vergleichswert wird der Watch-Dog-Timer (WDT) aktiviert und der Prozessor in den stromsparenden Sleep-Mode versetzt. Läuft der WDT über, wird der Prozessor wieder aufgeweckt und springt nochmals zum Einlesen der Eingangsspannung. So entsteht ein ständiger Vergleich in einer langsamen Schleife bis die nötige Spannung für den Betrieb vorhanden ist

Berechnung

In diesem Unterprogramm werden der Leistungswert durch multiplizieren der Strom- und Spannungswerte errechnet. Um festzustellen, ob die aktuelle Leistung geringer ist als der zuletzt gespeicherte Wert wird die Differenz aus diesen beiden Werten gebildet und überprüft ob sie negativ ist. Ist dies der Fall, wird das PWM-Tastverhältnis nicht weiter vergrößert sondern verkleinert bzw. umgekehrt.

USART

Im USART Unterprogramm wird zuerst festgestellt, ob Daten gesendet werden sollen indem das entsprechende Register (looper-Reg.) abgefragt wird ob es größer als eins ist. Ist also das Register mit einem Wert größer als Null geladen, werden Daten übertragen und der looper um eins reduziert. Falls das Register den Wert Null hat wird überprüft ob ein Zeichen empfangen wurde, also der PC Messwerte anfordert. Wurde ein Zeichen empfangen wird ein in der Initialisierungsroutine festgelegter Wert in das looper-Register geladen, um in den nächsten Schleifendurchläufen Daten zu senden.

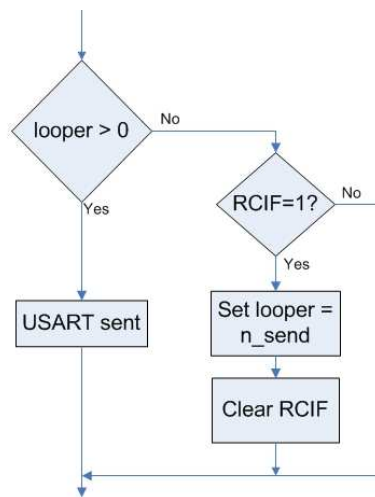


Abb. 45 Flussdiagramm: USART on Demand

Interrupt

In der Interrupt Service Routine wird das Tastverhältnis der PWM (CCPR1L-Wert) aktualisiert. Sie wird nur bei jedem 16ten Überlauf des PWM-Timers aufgerufen, um so den Änderungen Zeit für Auswirkungen zu geben. Zusätzlich wird der zuletzt gespeicherte Leistungswert durch den aktuellen Leistungswert überschrieben.

5. Verzeichnisse

5.1. Quellenverzeichnis

- [Grotmaack1978] Henry Grotmaack, Messung der technischen Daten von Vertikalachsen-Windrotoren, März 1978
- [Roloff] Roloff/Matek, Maschinenelemente Tabellen, 15. Auflage
- [Schulz2005] Heinz Schulz, Der Savonius-Rotor. 8. Auflage 2005
- [Schmidt2003] Schaltnetzteile von Heinz Schmidt-Walter
http://www.user.fh-stralsund.de/~emasch/1024x768/Dokumentenframe/Kompendium/Schaltnetzteile/Frame_Schaltnetzteile.htm
- [Sprut2000] Schaltregler-Grundlagen von
<http://www.sprut.de/electronic/switch/schalt.html>

5.2. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Das konstruierte Gestell.....	10
Abb. 3	Der Rotor in ProE konstruiert.....	12
Abb. 4	Prinzip der Windleitschaufeln.....	13
Abb. 5	Windleitschaufeln vor dem Biegen.....	14
Abb. 6	Modell in der Ansicht von oben.....	14
Abb. 7	Das gesamte Modell nach der Planung	15
Abb. 8	ProE Zeichnung der Teller	18
Abb. 9	ProE Zeichnung der Steifigkeitsscheiben	19
Abb. 10	Stelling (http://bill-dart.de/images/billard/253501.jpg)	19
Abb. 11	ProE Zeichnung der Lagerplatten	20
Abb. 12	Die gesamte Anlage in ProE gezeichnet.....	21
Abb. 13	Wind bläst auf die projizierte Fläche des Rotors.....	22
Abb. 14	Prinzip des Widerstandläufers	22
Abb. 15	Luftwiderstandsbeiwert bei rechteckiger Fläche; rechte Spalte: links das Verhältnis von h zu b, rechts der dazugehörige c_W - Wert	23
Abb. 16	Einwirkung des Windes und der Gewichtskraft und die Auflagerreaktionen. Um das System besser darstellen zu können wurde es um 90° gekippt dargestellt.	23
Abb. 17	Kräfteverlauf auf dem belastetem Wellenstück.....	27
Abb. 18	Momentenverlauf auf dem belastetem Wellenstück.....	27
Abb. 19 und 20	Bearbeitung der Steifigkeitsscheiben	29
Abb. 21 und 22	Plasmaschneider und Gestänge	30
Abb. 23	Biegen der Rotorbleche an der automatischen Walze	31
Abb. 24	Die verwendete Messuhr	33
Abb. 25 und 26	Zuschneiden des Gestells an der Bandsäge.....	34
Abb. 27	Gestell_1.....	34
Abb. 28	Gestell_2.....	35
Abb. 29	Gestell_3.....	35
Abb. 30	Auseinanderbiegen der Stützen mit Hilfe der Winde.....	36
Abb. 31	Erste Inbetriebnahme des Savoniusrotors	37
Abb. 32	Stanzen der Verkleidungsbleche	38
Abb. 33	Umdrehungs-Leistungsdiagramm mit MPP: zeigt den Verlauf bei fixer Windstärke	39
Abb. 34	Step Up Converter Prinzip	41
Abb. 35	Strom und Spannungsverlauf	42
Abb. 36	Energiebetrachtung.....	42
Abb. 37	Step-Up-Converter Schaltung.....	44
Abb. 38	Blockdiagramm	47

Abb. 39	Spannungsteiler	51
Abb. 40	Layout Top	55
Abb. 41	Layout Bottom	56
Abb. 42	Platine Top	57
Abb. 43	Platine Bottom	57
Abb. 44	Flussdiagramm	61
Abb. 45	Flussdiagramm: USART on Demand	63

5.3. Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Berechnung des Versatzes	12
--------	--------------------------------	----

ANHANG

Anhang A: Genehmigung der Diplomarbeit

Anhang B: Terminplan

Anhang C: Projektkosten

Anhang D: Konstruktionszeichnungen

Anhang E: Schaltplan

Anhang F: Platinenlayout

Layoutfertigungstipps

Da während der Layoutentwicklung viele Fehler durch Unwissen und Unachtsamkeiten auftreten könnten, sollen die weiteren Beschreibungen als Tipps und Hinweise einen Überblick schaffen.

Leitungen: Dicke, Länge, Typ beachten

Die vielleicht wichtigste Grundregel beim Entwurf einer Leiterplatte lautet, alle Leitungen möglichst kurz aber dick auszuführen. Breite kurze Bahnen verursachen nur geringe Leitungswiderstände und erwärmen sich auch bei großen Strömen kaum. Weiters muss man bedenken dass bei einer beidseitig bestückten Platine ein Unterschied zwischen Bauteilseite und Lötseite gemacht werden muss. Alle bedrahteten Bauteile werden auf der Bauteilseite bestückt, die Lötstellen und Anschlüsse werden aber über Bohrungen auf die Gegenüberseite verlegt. Auf der Lötseite platziert man möglichst alle SMD-Bauteile, als Folge daraus befindet sich auf dieser Seite auch der Großteil der Leiterbahnen.

Weitere Design-Regeln beziehen sich hauptsächlich auf die Verlegung verschiedener Leitungstypen. Versorgungsleitungen sollten auf jeden Fall möglichst dick ausgeführt werden, weiters wichtig ist die Verlegung von PWM-Leitungen. Pulsweitenmodulierte (PWM) Signalleitungen müssen möglichst kurz gehalten werden, außerdem dürfen sie

nicht parallel zu analogen Messleitungen verlegt werden und sollten nur wenig bis gar keine Kreuzungen beinhalten. Weiters muss darauf geachtet werden, Messleitungen ebenfalls kurz und störungsfrei zu verlegen um große Messfehler vermeiden zu können.

Leiterplattengröße – Eagle-Versionen

Gleich zu Beginn der Designentwicklung musste die Leiterplattengröße in Eagle eingestellt werden um danach mit dem Platzieren der Bauteile beginnen zu können. Es wurde für unsere Maximum Power Point Tracker - Schaltung eine Europlatine mit den Abmaßen 160mm x 100mm ausgewählt, denn bei dieser Größe konnten alle Leiterbahnen gut verlegt werden und es bleibt Platz für Kühlkörper und große Bauteile wie Spule und Kondensatoren. Um mit Eagle eine Leiterplatte in der Größe einer Europlatine entwerfen zu können, benötigt man bereits den License-Key für die Standard-Edition. Bei Eagle unterscheidet man zwischen mehreren Editionen die je nach Ausführung mehr oder weniger Einschränkungen haben und dadurch für bestimmte Benutzergruppen bestimmt sind. Mit dem Freeware-Key erhält man nach der Installation die Light Edition und ist damit auf eine Platinenfläche von 100mm x 80mm (=halbe Europlatine) beschränkt. Außerdem stehen nur zwei Signal-Layer (Top und Bottom) zur Verfügung und ein Schaltplan kann nur aus einem einzelnen Sheet bestehen. Mit der Standard Edition, welche für das MPPT-Layout benötigt wurde, wird die Platinenfläche auf 160mm x 100mm erhöht (=ganze Europlatine) und es stehen weiters vier Signal-Layer (Top, Route2, Route15 und Bottom) zur Verfügung. Ohne jegliche Beschränkungen kann man mit der Professional Edition von Eagle arbeiten. Für das MPPT-Layout werden zwei Signal-Layer Top und Bottom auf einer Europlatinenfläche verwendet.

Schaltungskomponenten ordnen

Als nächster Schritt wurden alle Bauteile in passenden Gruppen auf der Leiterplatte zugeordnet, um später ein schnelleres Routen der Leiterbahnen zu ermöglichen. Dabei kann man durch Eintippen der Bauteilbezeichnung in der Befehlsleiste von Eagle schnell die passenden Bauteile suchen und so wichtige Baugruppen zuerst platzieren. Zu Beginn wurden alle Komponenten der Strommessungen, der Spannungsmessungen und die Leistungsbauteile zusammen gesucht. Alle Leitungen des Step-up-Converters müssen höhere Ströme und Leistungen aushalten, dass heißt sie sollten dick genug sein um sich nicht zu stark zu erwärmen. Es wurden für das Layout Leiterbahndicken bis zu 4mm Stärke verwendet, weiters soll der Leistungsstromkreis keine unnötigen Umwege beinhalten und daher immer den kürzesten Verbindungsweg verfolgen. Um das spätere Bestücken der Bauteile und eine eventuelle Fehlersuche zu vereinfachen, wurden alle Baugruppen möglichst wie

im Schaltplan eingezeichnet platziert. Die Klemmleisten befinden sich natürlich am Rand, die 220 μ H Spule ist aufgrund der Größe sehr platzaufwendig und es musste ein genügend großer Freiraum eingeplant werden. Ein bedrahteter 1mF Kondensator befindet sich am Eingang des Step-up-Converters, die beiden anderen beim Ausgang. Dazwischen mussten im Layout die Schottky-Diode und die beiden BUZ102-Transistoren so eingebaut werden, dass alle drei Teile im TO-220 Gehäuse an einem gemeinsamen Kühlkörper befestigt werden können.

Im nächsten Schritt wurden die Strom- und Spannungsmessung am Schaltungseingang eingeplant. Am wichtigsten und besonders aufwendig ist dabei das richtige Design der Strommessung mit allen Widerständen und Kondensatoren rund um den IC MAX472. Ein 5m Ω Messwiderstand wird im Stromkreis des Step-up-Converters eingebaut. Vom Messwiderstand führen zwei kurze und unbedingt gleichlange (!!) Leitungen über die Vorwiderstände direkt zu den Messeingängen des IC's. Weiters wichtig ist eine eigene dicke Verbindungsleitung vom Aufwärtswandler-Eingang zum IC, welche für den MAX472 als Versorgungsleitung benötigt wird. Aufzupassen ist bei der Position des Entkoppelkondensators an der Versorgungsleitung eines jeden IC's, dieser muss immer sehr nahe am Bauteil platziert werden. Da das Layout sowohl für den MAX472 (Strommessungen bis 10A) als auch für den MAX471 (Strommessungen bis 3A) ausgelegt wurde, befinden sich noch weitere Widerstände im Umfeld des IC, welche aber je nach Bauteilauswahl verschiedene Werte besitzen (teilweise 0 Ω -Widerstände oder manche Pads werden nicht bestückt). Das Design der Spannungsmesseinheit, mit den beiden Transistoren zum gezielten Ein- und Ausschalten der Messung, ist nicht so empfindlich. Daher wurde nur eine korrekte und Platz sparende Anordnung im Leiterplattenlayout angepeilt, wobei sich die beiden Transistoren in einem TO-92 Gehäuse befinden, bedrahtet sind und daher auf der Bauteilseite eingebaut werden.

Einbau des Mikroprozessors

Nun musste der Mikroprozessor PIC16F88 auf der Bauteilseite der Platine eingebaut werden. Es wurde darauf geachtet, den PIC eher zentral einzuplanen um seine Anschlussleitungen in alle Richtungen weg verlegen zu können. Wichtigste Regel nach dem Einbau des PIC ist die sofortige nahe Anordnung des passenden Entkoppelkondensators. Außerdem musste noch je ein Entkoppelkondensator bei den richtigen Eingängen des PIC von den beiden Spannungsmessungen angebracht werden. Direkt neben dem PIC musste auch der 10MHz Quarz mit seinen beiden 22pF Kondensatoren Platz finden. Als letztes wurde neben dem PIC die Betriebsleuchtdiode mit geeignetem Vorwiderstand eingebaut, danach konnten alle Anschlussleitungen vom PIC der Wichtigkeit nach verlegt werden.

Der Treiberbaustein TC4427A zur Ansteuerung der beiden BUZ102-Transistoren wurde möglichst nahe oberhalb des PIC platziert. Vom Mikroprozessor führen zwei Ausgangsleitungen zum TC4427A, welche beide PWM-Signale übertragen, das heißt die Leitungen sollen kurz und kreuzungsfrei verlegt werden. Zunächst mussten daher die PWM-Leitungen vom PIC zum Treiberbaustein und weiters direkt zu den beiden Transistoren des Typ BUZ102 verbunden werden. Weiters wurden die Ausgänge der Strom- und Spannungsmessungen zum Mikrokontroller gelegt, dabei wurde der Bereich um die PWM-Leitungen gemieden um die Störungen sehr gering zu halten. Es fehlt noch die Shutdown-Leitung zu den Messkomponenten für Ströme und Spannungen, außerdem müssen die Schnittstellen und die Spannungsregler auf der Leiterplatte eingeplant werden.

Es werden zwei gleiche einstellbare Spannungsregler vom Typ LT1129 von Linear Technologies verwendet. Die Außenbeschaltung besteht aus zwei Kondensatoren und zwei Widerständen zur Spannungseinstellung, welche für 5V und 12V passende Werte besitzen müssen. Die Spannungsregler befinden sich in einem TO-220 Gehäuse mit 5 Anschlüssen und wurden im rechten unteren Eck der Leiterplatte rechts neben dem PIC eingebaut. Die Ausgangsleitungen sind möglichst dick zu allen Bauteilen verlegt worden, abschließend mussten noch die beiden Schnittstellen RS-232 und ICD2 am unteren Rand der Platine platziert werden. ICD2 benötigt nur wenige Bauteile in der Nähe, bei RS-232 wurde der Transceiver-Baustein DS275 neben der Schnittstelle eingeplant. Der Pegelkonverter-Chip braucht weiters nur einen Entkoppelkondensator, das heißt die restlichen Designanforderungen aufgrund der Schnittstellen sind nicht hoch und können bei der Layoutplanung zum Schluss erfüllt werden.

Probleme mit dem Autorouter

Der Entwurf des Leiterplattenlayouts erfolgte für das Projekt nach den bisher beschriebenen Arbeitsschritten, allerdings kann man beim Layout entwickeln nicht mit der ersten Lösung die Fertigung beginnen. Durch die farbige Darstellung des Schalplans am PC Bildschirm können manche Fehler schneller als auf Papier gefunden werden, wirkliche Probleme wie zu dünne Leitungen oder Kurzschlüsse kann man aber besser auf einem 1:1 Ausdruck erkennen. Das heißt nachdem Designentwurf erfolgt der erste Ausdruck auf Papier um danach allgemeine Designfehler auf der Leiterplatte erkennen zu können. Im nächsten Schritt kann man dann relativ leicht Fehler wie z.B. zu dünne Leitungen oder Durchkontaktierungen korrigieren. Ein großes Problem an den ersten Layoutlösungen war vor allem die Verwendung des Autorouters in Eagle, da dieser keine Leitungsartenunterschiede kennt. Um ein gutes Layout mit einem Autorouter entwerfen zu können, müssten Einstellungen für alle Verbindungen einzeln getroffen werden. Denn es muss

beispielsweise zwischen PWM-Leitungen und Versorgungsleitungen bei der Bahndicke und Länge unterschieden werden. Der Eagle-Autorouter kann aber nicht so detaillierte Einstellungen verarbeiten, es sind nur Einstellungen zu Mindestbahndicke, Bahnabständen, Durchmesser von Durchkontaktierungen (Vias) und ähnlichem möglich. Spezifikationen für einzelne Leitungen sind in Eagle nicht einstellbar, dazu muss man auf professionellere Layoutsoftware zurückgreifen. Für die Realisierung des Maximum Power Point Tracker - Layout wurde daher letztendlich gar kein Eagle Autorouter verwendet. Alle Leitungen wurden manuell nach den beschriebenen Voraussetzungen verlegt, die Leiterbahnen haben großteils eine Dicke von $0,04\text{inch} = 1,016\text{mm}$, nur die Verbindungen weg von den Bauteilen in den SO-8 Gehäusen (MAX472, DS275) sind noch dünner mit $0,016\text{inch} = 0,4064\text{mm}$. Durch die besonders dünnen Leitungen können Kurzschlüsse zwischen den Pins der kleinen Bauteile verhindert werden. Alle Verbindungen im Leistungsteil der Platine, dem Step-up-Converter, sind $0,15\text{inch} = 3,81\text{mm}$ dick um Strömen von bis zu 10A mit relativ geringer Erwärmung standzuhalten. Bei der Verlegung von Masseleitungen (GND) ist darauf zu achten, dass nie GND-Anschlüsse der IC's direkt mit Masse des Leistungsteils verbunden werden. Dadurch könnten unbemerkt Kriechströme von den Leistungsbauteilen zu den IC's oder Mikrokontrollern fließen und so den Programmablauf stören oder elektrische Bauteile nicht erlaubter Weise aus dem Sleep-Modus erwecken. Dann kann die komplette Schaltung und Regelung außer Kontrolle geraten und weitere Schäden verursachen.

Als Abschluss des Layouts werden GND-Flächen mit dem „Polygon“-Befehl in Eagle verlegt. Dazu muss man in der Befehlszeile „poly gnd“ eintippen und danach den gewünschten Bereich auf der Leiterplatte markieren. Die Fläche wird unter Einhaltung der eingestellten Design-Regeln (Leiterbahndicke, Abstände, ...) durch Anklicken des „Ratsnest“-Befehl passend gezeichnet. Das heißt alle großen leeren Bereiche zwischen den Leiterbahnen werden zu Kupferflächen, welche mit Masse verbunden sind. Es musste ebenfalls darauf geachtet werden, dass nicht eine GND-Fläche vom Leistungsteil bis zu den IC's reicht. Am Layout wurden daher mehrere GND-Flächenbereiche für die Leistungsteile und die IC's separat erstellt und nur durch einzelne Verbindungen am GND-Sternpunkt am Eingangskondensator miteinander verbunden.

Nach der Verlegung aller Leiterbahnen und dem Erzeugen von brauchbaren GND-Flächen wird das Layout auf Papier gedruckt um nochmals Fehler im Review zu entdecken. Danach wurden mehrmals die Designentwürfe überarbeitet und optimiert um beispielsweise Leitungslängen zu kürzen und die Dicke von Bahnen weiter zu erhöhen

Anhang G: Datenblätter

Anhang H: Programmlisting

Anhang I: Bauteillisten

Anhang J: Glossar

Anhang K: Erweiterungsüberlegungen

Anhang L: Sponsoren