



Entwicklung eines Konzepts zum Betrieb eines Einplatinencomputers mit selbst erzeugter Windenergie

Frankfurt University of Applied Sciences

Fachbereich 2- Studiengang International Business Information Systems

Bachelorthesis

Zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science

Vorgelegt von

Oliver Schicktanz

Geboren am 06.07.1989

Matrikelnummer 989707


Erstprüfer: Prof. Dr. Christian Baun

Zweitprüfer: Prof. Dr. Matthias Deegener

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, als solche kenntlich gemacht habe. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Datum: 08.04.2019

Unterschrift: 

A. Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik (Recherche und Analyse)	2
2.1. Themenbezogene Veröffentlichungen	2
2.1.1. Projekt Curacao	3
2.1.2. Selbstgebaute, Elektrizität produzierende Windturbine	4
2.2. Klassifizierung der Anforderungen	4
2.3. Grundlagen	5
2.3.1. Elektrizitätslehre	5
2.3.1.1. Volt	6
2.3.1.2. Ampere	6
2.3.1.3. Elektrischer Widerstand (Ohm)	6
2.3.1.4. Watt	7
2.3.2. Einplatinencomputer	7
2.3.2.1. Reed-Schalter	8
2.3.2.2. INA219	9
2.3.3. Batterie	9
2.3.4. Wind	10
2.3.4.1. Energie im Wind	10
2.3.4.2. Einzelne Einheiten der Energieberechnung in einem Windsystem	11
2.3.4.2.1. Luftdichte (ρ)	12
2.3.4.2.2. Kollektorfläche (A)	12
2.3.4.2.3. Betz Grenze (cp)	13
2.3.4.2.4. Windgeschwindigkeit	14
2.3.5. Windrad	15
2.3.5.1. Standort	17
2.3.5.2. Ausrichtung der Windturbine	17

2.3.5.3.	Generator	18
2.3.5.4.	Rotor	19
2.3.5.5.	Schnelllaufzahl (Tip Speed Ratio)	21
2.3.5.6.	Turmhöhe	22
2.3.5.7.	Windrichtungsgeber	24
2.3.5.8.	Laderegler.....	24
3.	Design (Prototypischer Aufbau).....	25
3.1.	Liste der Komponenten	26
3.2.	Energiebedarf des Systems	27
3.3.	Batteriekapazität	28
3.4.	Generator Datenblatt.....	29
3.5.	Berechnung der möglichen Windenergie	33
3.6.	Konstruktion des Windrads	36
3.7.	Nabe.....	39
3.8.	Das konstruierte Windrad	41
4.	Kopflose Installation Raspberry Pi	41
4.1.	Schaltplan - Raspberry und INA219	43
4.2.	Schaltplan - Raspberry und Reed-Schalter	45
5.	Ergebnisse	48
6.	Zusammenfassende Bewertung	49
7.	Ausblick	51
8.	Anhang	VIII

B. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Blockdiagramm Projekt Curacao der verschiedenen Subsysteme	3
Abbildung 2: Verschiedene Raspberry Pi Modelle mit Spezifikationen	8
Abbildung 3: Reed-Schalter	8
Abbildung 4: Rotorblätter, die beim Rotieren eine kreisrunde Fläche bilden	13
Abbildung 5: typische Leistungskurve eines Superwind-Generators	15
Abbildung 6: Aufbau eines Windrads in Einzelheiten	16
Abbildung 7: Schaubild einer induzierten Spannung durch Magnete.....	19
Abbildung 8: Zusammenhang der Schnelllaufzahl mit unterschiedlicher Anzahl Rotorblätter	22
Abbildung 9: Höhe des Turms in Korrelation steigender Windenergie.....	23
Abbildung 10: Ausgesuchter Motor: Sanyo Denki 103H7124-1145	30
Abbildung 11: Schema der Verkabelung vom Generator zu 2 Brückengleichrichtern und einem Voltmeter zum Testen der Ausgangsstromstärke	33
Abbildung 12: Durchschnittliche Wind- und Böengeschwindigkeit im Raum Südafrika, Stellenbosch	35
Abbildung 13: Querschnitt eines Rotorblattes	37
Abbildung 14: Eigene Rotorblattschablone	38
Abbildung 15: Motornabe am Generator mit einem Blatt	39
Abbildung 16: Seitenansicht Prototyp.....	41
Abbildung 17: Schaltplan der Verbindungen zwischen Raspberry Pi und dem Generator	44
Abbildung 18: Verbindung Reed-Schalter mit dem Raspberry	45

C. Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Zu erwartende Leistung bei unterschiedlichen Rotorflächen und Windgeschwindigkeiten	34
Diagramm 2: RPM in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit	40

D. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Potenzielle Energie im Wind bei Verdopplung der Geschwindigkeit	14
Tabelle 2: Ergebnis der überprüften Aderpaare mit zugehörigen Widerstände	32

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich einen besonderen Dank an meine Wegbegleiterin ausdrücken, die mich in der ganzen Zeit meines Studiums unterstützt hat. Des Weiteren Danke ich Herrn Leidorf, der die Anmeldung dieser Bachelorarbeit für mich übernommen hat. Zu guter Letzt Danke ich meinen Eltern, die in meinem Namen diese Arbeit dem Prüfungsamt übergeben haben.

Zusammenfassung

In dieser Bachelorthesis wird untersucht, ob ein Einplatinencomputer, respektive Raspberry Pi B+, ausschließlich mit selbst erzeugter Windenergie betrieben werden kann. Das Themengebiet der Windenergie umfasst ein großes Spektrum an theoretischem Wissen, welches für die Konstruktion einer geeigneten Windkraftanlage notwendig ist.

Der Raspberry Pi wird dazu eingesetzt, vorangestellte Thesen über die mögliche Energiegewinnung mit einem selbst gebauten Windrad, zu überprüfen. In diesem Zusammenhang wird das Modul INA219 verwendet, welches die Leistung der Windturbine dokumentiert und einem Reed-Schalter, der Aufschluss über die Windgeschwindigkeiten und der Umdrehungen des Rotors geben wird.

Es werden Grundlagen in Elektronik, Physik, Informatik und handwerkliches Geschick vorausgesetzt.

Abstract

This Bachelor thesis examines whether a single board computer, respectively Raspberry Pi B+, can be operated exclusively with self-generated wind energy. The field of wind energy covers a large spectrum of theoretical knowledge, which is necessary for the construction of a suitable wind turbine.

The Raspberry Pi is used to check the theses about the possible energy production with a self-built wind turbine. In this context the module INA219 is used, which documents the performance of the wind turbine and a reed switch, which will give information about the wind speeds and the rotations of the rotor.

Basic knowledge in electronics, physics, computer science and craftsmanship is required.

1. Einleitung

„Die Nutzung der Windenergie ist keine neue Technologie, sie ist die Wiederentdeckung einer traditionsreichen Technik.“¹

Bereits vor Beginn der modernen Zeitrechnung wurden Windmühlen im arabischen Raum eingesetzt. Jedoch erreichte die Nutzung von Windenergie erst in den letzten Jahrhunderten eine breitere Akzeptanz in der Gesellschaft.

Schon vor Jahrhunderten ermöglichte Windenergie das Mahlen von Getreide, wodurch der Name der „Windmühle“ entstand. Aber auch das Pumpen von Wasser, beispielsweise aus einem Brunnen, stellte eine weitere Nutzungsmöglichkeit dar.

Die Entwicklung von modernen Windanlagen zur Stromerzeugung begann circa 1900 in Dänemark. Das Ziel war die Stromversorgung der ländlichen Bevölkerung. Bedingt durch die erstaunliche Zuverlässigkeit der Windräder wurde Dänemark zum Vorreiter in dieser Technologie. Die Energiekrise von 1973/74, die zur vermehrten Errichtung von Atomkraftwerken führte um die Abhängigkeit vom Erdöl zu reduzieren, war auch für die Förderung der Windenergie ein Meilenstein. Die erste Windkraftanlage wurde im Jahre 1976 in Dänemark mit dem Stromnetz verbunden und das Windrad wurde zum Symbol der Anti-Atom-Bewegung.²

Jedoch führte erst die Ölkrise in den 1980er Jahren in den USA zur kommerziellen Nutzung von Windenergie. Für Deutschland markiert erst die Atomkatastrophe von Tschernobyl 1986 den Startpunkt der Energiegewinnung durch Wind.³ Durch die Nuklearkatastrophe in Fukushima in 2011 nahm die deutsche Regierung alte Bestrebungen um den Ausstieg aus der Atomenergie wieder auf und verabschiedete das 13. Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes. Es bestimmt für Deutschland einen stufenweisen Ausstieg aus der Nutzung von Atomenergie bis zum Jahre 2022.⁴ Im Dezember 2015 einigten sich die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen in ihrem Pariser Übereinkommen, den

¹ Hau, Erich, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, S. 1.

² IG Windkraft, Geschichte der Windkraft, [https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY\[0\]=1045](https://www.igwindkraft.at/?xmlval_ID_KEY[0]=1045), zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

³ IG Windkraft, Windmarkt, <https://www.windbranche.de/windenergie-ausbau>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

⁴ FAZ, Bundestag billigt Energiewende : Gabriel: „Das ist unser Ausstieg“, 30.06.2011, <https://www.faz.net/aktuell/politik/energiepolitik/bundestag-billigt-energiewende-gabriel-das-ist-unser-ausstieg-16606.html>, zuletzt eingesehen am 31.03.2019.

Anstieg der globalen Mitteltemperatur zu begrenzen.⁵ Auch das Pariser Klimaübereinkommen legt einen Schwerpunkt in die Gewinnung von Windenergie. Das Umweltprogramm der Vereinten Nationen nennt den Ausbau von Wind- und Solarenergie als einer der wichtigsten Faktoren, um die dort gesetzten Klimaziele zu erreichen.⁶

Anfang dieses Jahres (2019) hat eine von der deutschen Regierung gebildete Kommission den Ausstieg aus der Kohleenergie bis spätestens 2038 beschlossen.⁷

Somit ist es unbestreitbar, dass das Thema der Energiegewinnung mittels Wind ein äußerst aktuelles Thema ist.

Zusätzlich bietet Windenergie den Vorteil, dass diese mit relativ einfachen Mitteln unabhängig von einem öffentlichen Stromnetz genutzt werden kann. Selbstversorger, Bewohner von abgelegenen Gebieten oder Länder im Entwicklungsstatus können lokal Energie gewinnen und Strom nutzen, ohne auf eine Anbindung zu einem Kraftwerk angewiesen zu sein. Somit verringert die Energiegewinnung mittels Wind nicht nur Auswirkungen auf die Umwelt, sondern ist kostengünstig und kann die Zuverlässigkeit der Energieversorgung fördern.⁸

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist zu prüfen, ob ein Einplatinencomputer ausschließlich mit Windenergien betrieben werden kann, um diesen „off-the-grid“ nutzen zu können.

2. Stand der Technik (Recherche und Analyse)

In Deutschland gibt es 29,844 Windenergieanlagen die zusammengekommen eine Leistung von 56,154 Megawatt erreichen. Knapp ein Fünftel (18,8%) der deutschen Stromproduktion stammt von Windkraftanlagen.⁹

2.1. Themenbezogene Veröffentlichungen

Um die Anforderungen an das zu bauende System zu erarbeiten, ist es lohnenswert, zwei Veröffentlichungen näher zu betrachten.

⁵ Umweltbundesamt, Klimarahmenkonvention, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimarahmenkonvention>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁶ UNEP, The Emissions Gap Report 2017 – A UN Environment Synthesis Report, S. XIV, https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/22070/EGR_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁷ Bollmann, Ralph, „Deutschland soll Energie-Vorzeigeland werden“, FAZ, 26.01.2019, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/kohleausstieg-deutschland-soll-energie-vorzeigeland-werden-16009810.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸ Woofenden, Ian, Wind Power For Dummies, Seite 9.

⁹ Bundesverband für Windenergie, Zahlen und Fakten, <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

2.1.1. Projekt Curacao

Curacao ist eine Insel in der Karibik auf der ein mit Sensoren bestückter Raspberry Pi zur Aufzeichnung der Umwelteinflüsse eingesetzt wurde. Ziel des Projekts war die Messung von Umwelteinflüssen mithilfe verschiedener Sensoren. Der benötigte Strom zum Betreiben des Systems stammte aus einer Kombination aus Wind- und Solaranlagen. Das System wurde so konzipiert, dass es ohne Überwachung über 6 Monate hinweg Daten sammeln sollte. Dabei sollte der Raspberry Pi im Idealfall den ganzen Tag laufen, aber mindestens von 3 Stunden vor Sonnenaufgang bis 3 Stunden nach Sonnenuntergang. Bei 8 Stunden Sonnenlicht ergab sich eine Laufzeit von mindestens 14 Stunden am Tag. Zusätzlich sollte der Raspberry Pi über eine Anwendung zum Kontrollieren der gemessenen Daten erreichbar sein.¹⁰ Das folgende Blockdiagramm verdeutlicht die Unterteilung der verschiedenen Systeme:

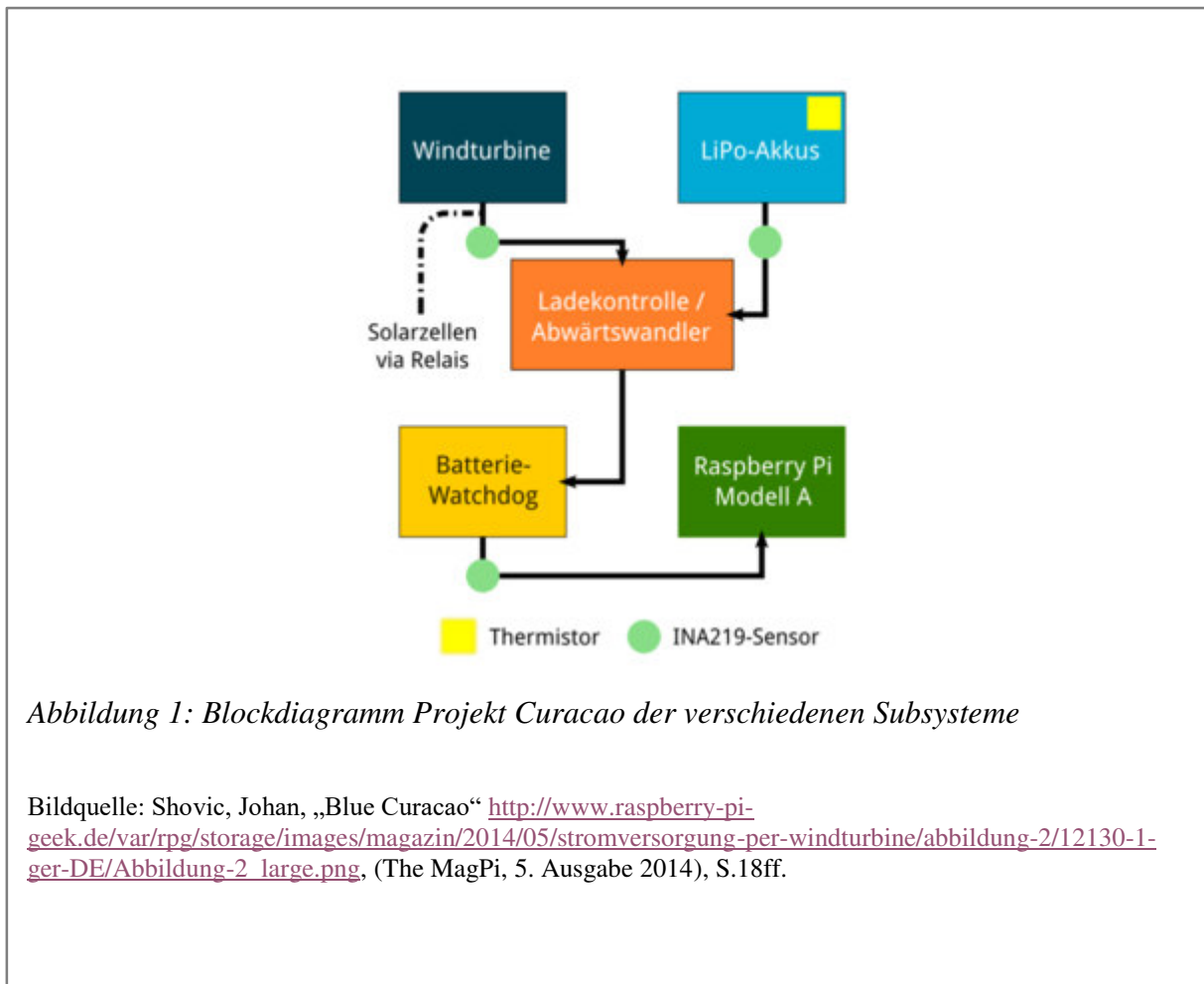


Abbildung 1: Blockdiagramm Projekt Curacao der verschiedenen Subsysteme

Bildquelle: Shovic, Johan, „Blue Curacao“ http://www.raspberry-pi-geek.de/var/rpg/storage/images/magazin/2014/05/stromversorgung-per-windturbine/abbildung-2/12130-1-ger-DE/Abbildung-2_large.png, (The MagPi, 5. Ausgabe 2014), S.18ff.

¹⁰ Shovic, John, „Project Curacao“, <https://www.switchdoc.com/wp-content/uploads/2015/11/The-MagPi-issue-18-en.pdf>, (The MagPi, 18. Ausgabe 2013), Seite 8ff.

Das Schaubild zeigt den prinzipiellen Aufbau der Energieversorgung des Projekts. Ein Arduino überwacht diese und kann bei niedrigem Batteriestand das System herunterfahren. Gleichmaßen kann der Arduino das System wieder starten, sobald genug Strom zur Verfügung stand.

Der Raspberry Pi ist dabei die zentrale Schnittstelle der eingesetzten Sensoren zum Messen der Helligkeit, Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Außerdem ermöglichte eine kleine Kamera eine Liveübertragung der Umgebung.¹¹

2.1.2. Selbstgebaute, Elektrizität produzierende Windturbine

Das Projekt von Mike Davis handelt primär von dem Bau eines Windrades aus kostengünstigen Ersatzteilen. Das Ziel war auf seiner abgelegenen Farm in Arizona Strom mithilfe von Windkraft zu erzeugen um diesen dann in einer Batterie zu speichern. Die Verwendung des erzeugten Stroms beschränkte sich in diesem Projekt auf die Nutzung herkömmliche Elektronikartikel wie beispielsweise einem Laptop, Rasierer oder das Aufladen eines Mobiltelefons.

Dieses Projekt wurde von Davis zur besseren Bearbeitung in 5 Punkte gegliedert:

1. Auswahl des Generators
2. Rotorscheufel und Motornabe
3. Windrichtungsgeber
4. Turm
5. Batterien und elektronisches Kontrollsystem.

Davis beziffert seine Kosten auf \$140.62, jedoch lässt die Kostenaufstellung erkennen, dass er bereits über viele Materialien verfügte, sodass eine realistische Kostenaufstellung großzügiger anzusetzen ist.¹²

2.2. Klassifizierung der Anforderungen

Die präsentierten Projekte im vorangehenden Kapitel zeigen, dass es momentan keine vollständige Lösung zum Betreiben eines Einplatinencomputers mit selbst erzeugter Windenergie gibt. Das Projekt Curacao enthält eine Teillösung, weil in diesem Projekt eine

¹¹ Shovic, John, "Project Curacao", <https://www.switchdoc.com/wp-content/uploads/2015/11/The-MagPi-issue-18-en.pdf>. (The MagPi, 18. Ausgabe 2013), Seite 8ff.

¹² How I home-built an electricity producing Wind turbine, http://www.mdpub.com/Wind_Turbine/, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Kombination aus Wind und Solarenergie zur Gewinnung von Strom genutzt wird. Das Projekt von Davis beinhaltet eine Anleitung zum Bau eines Windrades und ein Entwurf eines möglichen Energieversorgungssystems. Jedoch errichtete Davis sein Windrad auf seiner entlegenen Farm, in der es durchgängig windig ist. Es ist nicht klar, ob dies genauso in einer Wohnsiedlung oder einer urbanen Gegend funktionieren würde.

Basierend auf den vorgestellten Lösungen werden folgende Anforderungen an das eigene System gestellt:

- Die Energieversorgung des Einplatinencomputers muss über eine Batterie erfolgen. Da die Energiegewinnung maßgeblich vom Wind abhängig ist und der mitunter sehr wechselhaft sein kann, muss ein Laderegler eingesetzt werden um die Energiezufuhr zu steuern und zu überwachen. Angestrebt wird eine zuverlässige Stromversorgung von einer Woche.
- Eine Windturbine soll aus recycelten Materialien konstruiert werden und die benötigte Elektrizität generieren können.
- Der Einplatinencomputer dokumentiert mithilfe eines Schalters die Umdrehungen pro Minute und errechnet die Windgeschwindigkeit zum Messzeitpunkt. Außerdem wird mit dem INA219 Chip die generierte Elektrizität gemessen. Dazu wird ein geeignetes Programm in der Programmiersprache Python entwickelt.

2.3. Grundlagen

Für die Umsetzung des geplanten Projekts sind Kenntnisse über die Grundlagen der Elektrizitätslehre und der Windlehre notwendig. Beispielsweise muss berechnet werden, wieviel Strom das angestrebte Projekt zum Betreiben benötigt um eine geeignete Batterie zur Versorgung auszuwählen. Aber auch für den Bau des Windrads ist es unabdingbar zu wissen, wieviel Energie aus dem Wind erschlossen werden kann. Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Gesetze gegeben und diese erläutert.

2.3.1. Elektrizitätslehre

Im Rahmen der Elektrizitätslehre sind die Einheiten Volt, Ampere, Widerstand und Watt von Relevanz. Mit ihnen kann schlussendlich die erforderliche Energiemenge, die zum Betreiben des Systems notwendig ist, berechnet werden.

2.3.1.1. Volt

Eine einfache Analogie von Strom ist Wasser. Sowohl Strom als auch Wasser fließen. Strom besteht dabei aus elektrisch geladenen Teilchen, den Elektronen. Das Fließen des Stroms kann somit als Elektronenfluss bezeichnet werden. Der Druck des Flusses wird dabei maßgeblich von der Geschwindigkeit, mit der sich der Elektronenfluss bewegt, bestimmt. Volt bezeichnet dabei die Maßeinheit für die elektrische Spannung.¹³

$$\text{Volt} = \frac{\text{Watt}}{\text{Ampere}}$$

2.3.1.2. Ampere

Ampere bezeichnet die Einheit der Stromstärke. Es beschreibt die fließende Menge des Stroms. Elektrogeräte besitzen in aller Regel eine Ampere-Zahl die angibt, wieviel Strom an das Gerät durchgelassen werden darf. Ein Gerät, das 1 Ampere zum Betreiben benötigt aber nur mit 0,5 Ampere versorgt wird, funktioniert unter Umständen nur schwach oder gar nicht.¹⁴

$$\text{Ampere} = \frac{\text{Watt}}{\text{Volt}}$$

2.3.1.3. Elektrischer Widerstand (Ohm)

Wasser, das durch einen Fluss fließt, stößt mitunter auf Widerstand in Form von Steinen oder anderen Hindernissen. Strom verhält sich ähnlich. Der elektrische Widerstand eines Materials hat Einfluss auf die Stromstärke und die Spannung. Dieser Widerstand wird in der Einheit Ohm bemessen.¹⁵ Es ergibt sich folgende Formel:

$$\text{Elektrische Spannung} = \text{Elektrischer Widerstand} * \text{Ampere}$$

¹³ Energiemarie, Watt, Volt, Ampere – Stromerhalten einfach erklärt, <https://energiemarie.de/energietipps/watt-volt-ampere>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁴ Energiemarie, Watt, Volt, Ampere – Stromerhalten einfach erklärt, <https://energiemarie.de/energietipps/watt-volt-ampere>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁵ Energiemarie, Watt, Volt, Ampere – Stromerhalten einfach erklärt, <https://energiemarie.de/energietipps/watt-volt-ampere>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

2.3.1.4. Watt

Die elektrische Leistung wird in der Einheit Watt bemessen. Der Druck mit der die Elektronen fließen, gepaart mit der Durchsatzmenge, ergibt die elektrische Leistung.¹⁶ Die Formel zur Berechnung von Watt ist somit:

$$\text{Watt} = \text{Volt} * \text{Ampere}$$

Watt spiegelt allerdings nur den Wert zum Zeitpunkt der Messung wieder. Möchte man beispielsweise den Stromverbrauch eines Gerätes über einen bestimmten Zeitraum berechnen, muss die Wattzahl noch mit der Zeit (in Stunden) multipliziert werden.¹⁷

2.3.2. Einplatinencomputer

Auf dem freien Markt gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Einplatinencomputern, wie zum Beispiel dem Arduino oder dem Raspberry Pi, um die zwei bekanntesten Modelle zu nennen. Beide Varianten sind Kreditkartengroße Computer die mithilfe eines Monitors, Maus und Tastatur als ein vollwertiger, funktionsfähiger Desktop Computer verwendet werden kann. Der Einsatz solcher Einplatinencomputer findet sich vor allem in dem Bereich der Hobby Elektronik wieder.¹⁸

Ein wesentlicher Grund für die Beliebtheit in der Hobby Elektronik ist die verbaute Stiftleiste auf dem Raspberry Pi und Arduino, besser bekannt unter dem Begriff GPIO (General Purpose Input Output). Diese stellen die zentrale Schnittstelle zwischen dem Einplatinencomputer und einer Vielzahl von externen Komponenten wie zum Beispiel Sensoren und elektronischen Messinstrumenten dar.¹⁹ Im Folgenden eine Übersicht der verschiedenen Raspberry Pi Modelle, die im Handel erhältlich sind.

¹⁶ Energiemarie, Watt, Volt, Ampere – Stromerhalten einfach erklärt, <https://energiemarie.de/energietipps/watt-volt-ampere>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁷ Stadtwerke Emmendingen, Wieviel ist eine Kilowattstunde?, <https://swe-emmingen.de/2011/08/10/wieviel-ist-eine-kilowattstunde/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁸ FAQs, What is a Raspberry, <https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/#introduction>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁹ Elektronik Praxis, Fachwissen für Elektronik Professionals, <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/raspberry-pi-alle-modelle-im-ueberblick-a-548795/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

	Raspberry Pi Model A	Raspberry Pi Model B	Raspberry Pi Compute Module	Raspberry Pi Model B+	Raspberry Pi 2 Modell B	Raspberry Pi Zero	Raspberry Pi 3 Model B
Markteinführung	29. 2. 2012	29. 2. 2012	9. 6. 2014	14. 7. 2014	2. 2. 2015	25. 11. 2015	29. 2. 2016
SoC	BCM2835	BCM2835	BCM2835	BCM2835	BCM2836	BCM2835	BCM2837
CPU	ARM 11 700 MHz	ARM 11 700 MHz	ARM 11 700 MHz	ARM 11 700 MHz	4x ARM Cortex-A7 900 MHz	ARM 11 1 GHz	4x ARM Cortex-A53 1,2 GHz
GPU	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 250 MHz	VideoCore IV 400 MHz
RAM	256 MB SDRAM	256 ¹ /512 MB	512 MB SDRAM	512 MB SDRAM	1 GB SDRAM	512 MB SDRAM	1 GB SDRAM
Ethernet	–	10/100 Mbit/s	–	10/100 Mbit/s	10/100 Mbit/s	–	10/100 Mbit/s
Wireless	–	–	–	–	–	–	802.11n + BLE
USB 2.0	1	2	1	4	4	2 (Mikro, OTG)	4
Video-Ausgang	HDMI/Composite	HDMI/Composite	–	HDMI/Composite	HDMI/Composite	HDMI/Composite	HDMI/Composite
Audio-Ausgang	HDMI/Kopfhörer	HDMI/Kopfhörer	–	HDMI/Kopfhörer	HDMI/Kopfhörer	HDMI	HDMI/Kopfhörer
GPIO	40	26	48	40	40	40	40

¹ Bis Ende Oktober 2012 256 MB, ab dann 512 MB SDRAM. – ² auf Träger-Board

Abbildung 2: Verschiedene Raspberry Pi Modelle mit Spezifikationen

Bildquelle: WEKA FACHMEDIEN auf https://cdn.weka-fachmedien.de/thumbs/media_uploads/images/1471507894-270-wor70pj0u.jpg.626x0.jpg

2.3.2.1. Reed-Schalter

Als Analogie für die Funktionsweise eines Schalters bietet sich eine Zugbrücke an. Ist die Brücke geschlossen können Personen oder Fahrzeuge diese überqueren. Analog dazu kann die Brücke nicht passiert werden, wenn sie geöffnet ist. Ein Magnet kann die Brücke in dem Reed-Schalter schließen, sodass die Brücke wieder passierbar ist. Schließt sich der Schalter, schließt sich auch der Stromkreis und der Strom kann fließen.²⁰



²⁰ Woodford, Chris, Reed switches, <https://www.explainthatstuff.com/howreedswitcheswork.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

2.3.2.2. INA219

Das Modul kann zur Leistungsüberwachung (Stromstärke und Spannung) eingesetzt werden.²¹ Es Ersetzt eine manuelle Überwachung mittels Multimeter. Die Reichweite der Messungen über die Leistung betragen dabei maximal 32 Volt und 3,2 Ampere.²²

2.3.3. Batterie

Um ein System autonom vom Stromnetz betreiben zu können, bedarf es einer Batterie. Andernfalls würde sich der Einplatinencomputer stets abschalten, sobald der Wind nicht mehr vorhanden ist.²³

Zurzeit gibt es keine Batterien, die speziell für kleine Windsysteme entwickelt wurden, da die Nachfrage der erforderlichen Batterien zu klein und nischenhaft sind. Stattdessen werden im Bereich der Windanlagen hauptsächlich Batterien aus anderen Segmenten, wie elektrische Golfwagen oder Gabelstapler, verwendet.²⁴

Die meisten Windenergieanlagen nutzen sogenannte „zyklenfähige Batterien“. Sie wurden für stetig auftretende Entladung konzipiert und können in wenigen Stunden wieder aufgeladen werden.

Es ist davon abzuraten, herkömmliche Autobatterien zu werden. Diese sind nicht darauf ausgelegt, stark entladen zu werden. Grund dafür ist die innere Struktur der Batterie, die einem Schwamm ähnelt. Tiefenentladungen führen zum Zusammenbruch der inneren Struktur nach nur 30 bis 150 Tiefenzyklen.²⁵

Die Batteriekapazität wird in aller Regel in Ampere-Stunden angegeben. Zum Berechnen der Kapazität kann folglich die Berechnung von Ampere aus dem übergeordneten Abschnitt verwendet werden. Es empfiehlt sich eine 30% größere Batteriekapazität für den Einsatz zu wählen um einen zusätzlichen Puffer zu erhalten. Temperatur und Betriebsdauer lassen eine Batterie unter Umständen nicht mehr so viel Energie aufnehmen oder abgeben.

²¹ HENRY'S BENCH, a place for the electronic hobbyist. <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-current-measurements/ina219-arduino-current-sensor-voltmeter-tutorial-quick-start/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

²² Adafruit, INA219 High Side DC Current Sensor Breakout – 26V 3.2A max, <https://www.adafruit.com/product/904>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

²³ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.338.

²⁴ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.338-340.

²⁵ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.338-340.

Es empfiehlt sich, folgende Formel bei der Berechnung zu verwenden:

$$\text{Kapazität in Ampere Stunden} = \text{Ampere} * 1,3 * \text{Stunden}$$

Der Sicherheitsfaktor beträgt in diesem Fall 30%.²⁶

2.3.4. Wind

Als nächstes gilt es, die Eigenschaften von Wind zu verstehen. Wind kann man in drei grundlegende Arten unterteilen. Diese sind:

- Verzögerungsfrei / unmittelbar
- Spitzenwert / Höchstwert
- Durchschnittlich

Dabei stellt der verzögerungsfreie/unmittelbare Wind die ungünstigste Variante dar, weil sich die Geschwindigkeit des Windes dauerhaft verändert. Wind hat keine feste Größe, er ist immer unterschiedlich stark.

Der Höchstwert des Windes ist der interessanteste Wert. Ein Windrad muss enorme Windgeschwindigkeiten standhalten können. Je stärker der Wind, desto höher die Belastung. Daher sollte man sinnvollerweise von den stärksten Böen ausgehen, die jemals an dem geplanten Standort gemessen wurden. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass eine entsprechend massive Konstruktion, die Windgeschwindigkeiten von 50+ Metern pro Sekunde aushalten, dementsprechend kostenintensiver sind. Bei einer solchen Konstruktion werden die Materialkosten signifikant ansteigen.

Der wichtigste Wert für ein Windsystem ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit in dem geplanten Standort. Mit diesem können Vorhersagen über die mögliche Stromerzeugung getroffen werden.²⁷

2.3.4.1. Energie im Wind

Wind besteht aus bewegten Luftmolekülen, die eine Masse besitzen. Jedes Objekt mit einer Masse, das in Bewegung ist, enthält kinetische Energie, welche durch die folgende Formel beschrieben werden kann:

²⁶ Kapazitätsrechner – Batteriekapazität ermitteln, <https://ladegeraet-vergleich.de/kapazitaetsrechner-batteriekapazitaet-berechnen/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

²⁷ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.81.

$$\text{Kinetische Energie} = 0,5 * \text{Masse} * \text{Windgeschwindigkeit}^2$$

In der Formel wird die Masse in Kilogramm, die Geschwindigkeit²⁸ (v) in Metern pro Sekunde zum Quadrat und die kinetische Energie in Joules gemessen.

Da die Dichte der Luft²⁹ (ρ) bekannt ist ($\sim 1,23 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C Temperatur) lässt sich die Masse des Windes, die sekundlich auf eine Kollektorfläche trifft, mit der folgenden Formel berechnen:

$$\text{Kilogramm pro Sekunde}^{30} = \text{Windgeschwindigkeit} * \text{Kollektorfläche} * \text{Luftdichte}$$

Dabei wird die Kollektorfläche³¹ in Quadratmetern und die Luftdichte in Kilogramm pro Kubikmetern gemessen.

Die Energie in Watt lässt sich nun mit der folgenden Formel berechnen:

$$\text{Energie (Watt)}^{32} = 0,5 * \text{Kollektorfläche} * \text{Luftdichte} * \text{Windgeschwindigkeit}^3$$

In dieser Berechnung wird die gesamte Energie im Wind berechnet,³³ jedoch muss bei der Gewinnung von Windenergie auch noch stets die sogenannte Betz Grenze (Energiekoeffizient) berücksichtigt werden.³⁴

Fügt man der obenstehenden Formel den Energiekoeffizienten (cp) hinzu, so ergibt sich die zentrale Formel im Bereich der Windenergie wie folgt:

$$\text{Energie (Watt)}^{35} = \frac{1}{2} * cp * A * v^3 * \rho$$

2.3.4.2. Einzelne Einheiten der Energieberechnung in einem Windsystem

Um die obenstehenden Einheiten im Rahmen des Designs des Windsystems angemessen berücksichtigen zu können, bedarf es einer genaueren, einzelnen Betrachtung der Einheiten.

²⁸ Siehe näher unter 2.3.4.2.4.

²⁹ Siehe näher unter 2.3.4.2.1.

³⁰ Hau, Erich, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, S.82.

³¹ Siehe näher unter 2.3.4.2.2.

³² Hau, Erich, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, S.82.

³³ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/calculation-of-wind-power/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

³⁴ Die Betz Grenze wird unter 2.3.4.2.3 näher erläutert.

³⁵ Wind & Wet, Wind turbine power calculator, http://www.windandwet.com/windturbine/power_calc/index.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

2.3.4.2.1. Luftdichte (ρ)

Luft besitzt eine Dichte, genau wie Feststoffe und Flüssigkeiten und diese besitzen eine Masse, gemessen in Kilogramm pro Volumen (kg/m^3).

Auf Meereshöhe und mit einer Temperatur von 15 Grad Celsius hat Luft eine Dichte von $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Die Dichtigkeit der Luft hat großen Einfluss auf die Wirksamkeit des Windrads. Luftmoleküle die eine höhere Dichte haben bringen mehr Kraft auf die Rotorblätter auf. Höhere Dichte bedeutet also mehr Energie. Alle 300 Meter über dem Meeresspiegel verringert sich die potenzielle Energie im Wind um 3%. Daraus lässt sich schließen, je näher eine Windturbine auf der Höhe des Meeresspiegels steht, desto mehr Windenergie steht ihr zur Verfügung.

Zusätzlich wird die Luftdichte auch von der Temperatur beeinflusst. Umso kälter die Luft ist, desto näher liegen die Moleküle beieinander. Daher hat kalte Luft eine höhere Dichte als warme Luft und somit auch mehr potentielle Energie.³⁶

2.3.4.2.2. Kollektorfläche (A)

Ein weiterer wichtiger Leistungsfaktor der Windturbine ist die Fläche, die die Rotorblätter beim Rotieren bilden. Die Kollektorfläche, auf die der Wind trifft, wird in Quadratmetern angegeben und ist eine kreisrunde Fläche.³⁷

³⁶ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.83.

³⁷ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.84-85.

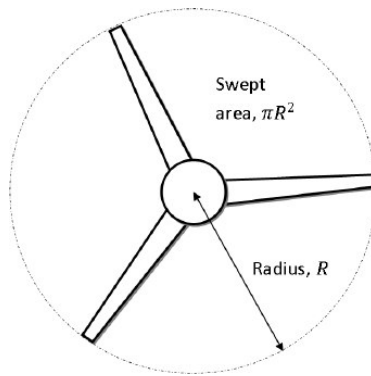


Abbildung 4: Rotorblätter, die beim Rotieren eine kreisrunde Fläche bilden

Bildquelle: Kamarudin, Muhammed Nizam/ Husain, Abdul Rashid, u.a., auf https://www.researchgate.net/profile/Muhammad_Nizam_Kamarudin/publication/275893581/figure/fig2/AS:294598053253132@1447249057853/Turbine-swept-area.png

Die Oberfläche des Kollektors wird folgender Formel berechnet:

$$\text{Oberfläche eines Kreises}^{38} = \pi * \text{Radius}^2$$

Aus der Formel ergibt sich, dass eine Verdopplung der Rotorlänge die Oberfläche, auf die der Wind trifft, vervierfacht. Je größer die Oberfläche, desto mehr Energie kann geerntet werden. Die Formel zeigt das der Zusammenhang exponentiell ist. Dies erklärt auch die stetige Vergrößerung kommerzieller Windkraftanlagen.³⁹

2.3.4.2.3. Betz Grenze (cp)

Albert Betz bewies im Jahre 1919, dass keine Windkraftanlage mehr als 16/27 (59,3%) der kinetischen Energie des Windes in mechanische Energie umwandeln kann. Diese Grenze steht nicht in einem Zusammenhang zu Verlusten im Generator oder anderen mechanischen Teilen in der Windkraftanlage, sondern erklärt sich durch die Konstruktionsweise der Windkraftanlagen selbst.

Berücksichtigt man zudem noch die technischen Anforderungen an eine Windkraftanlage, insbesondere den Verschleiß und benötigte Stabilität, so liegt das reale Limit deutlich unter dem Betz-Grenzwert mit Werten von 35-45%. Werden auch noch Verluste in Form von Wärme,

³⁸ Mathepower.com, Matheaufgaben einfach – online lösen – Kreise, <https://www.mathepower.com/kreis.php>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

³⁹ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.84-85.

durch Reibung in der Kraftübertragung berücksichtigt bleiben zwischen 10-40% der möglichen Energiegewinnung übrig die in nutzbaren Strom umgewandelt werden können.⁴⁰

2.3.4.2.4. Windgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit mit der der Wind auf die Rotorblätter trifft bewirkt die größte Veränderung in der möglichen Leistung. Dies ist an dem Term v^3 ($v \cdot v \cdot v$) zu erkennen.

Bei einer Verdopplung der Windgeschwindigkeit steigt die potenzielle Energie um das Achtfache.

Die folgende Tabelle verdeutlicht den Zusammenhang:

Windgeschwindigkeit in m/s	Berechnung	Potenzielle Energie in Watt
1	$1^3 = 1 \cdot 1 \cdot 1$	1
2	$2^3 = 2 \cdot 2 \cdot 2$	8
4	$4^3 = 4 \cdot 4 \cdot 4$	64
8	$8^3 = 8 \cdot 8 \cdot 8$	512

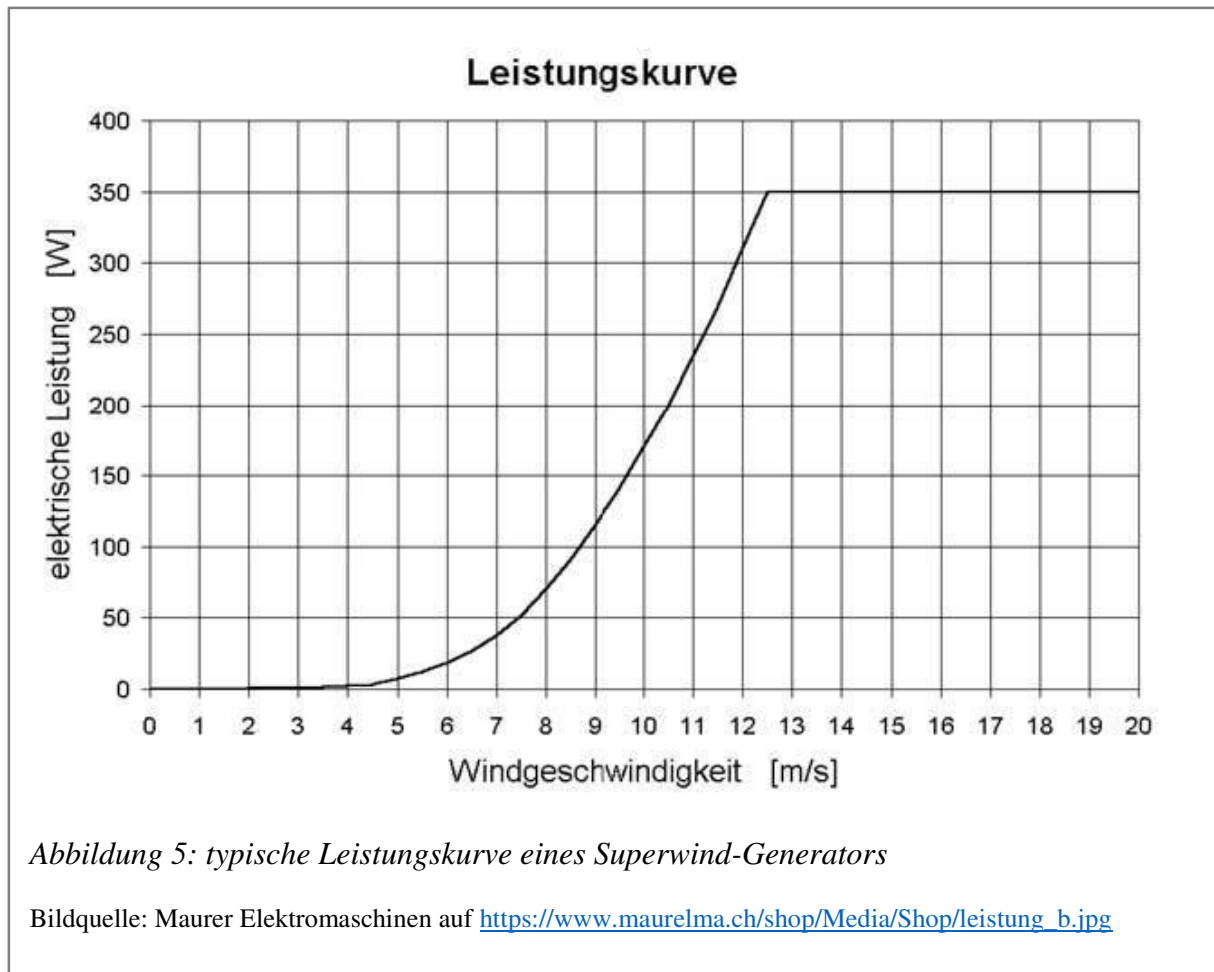
Tabelle 1: Potenzielle Energie im Wind bei Verdopplung der Geschwindigkeit

Quelle: eigenes Werk

Anhand dieser Tabelle ist zu erkennen, wie bereits geringe Veränderungen in der Windgeschwindigkeit immense Auswirkungen auf die potentielle Energie haben.⁴¹

⁴⁰ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/betz-limit/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

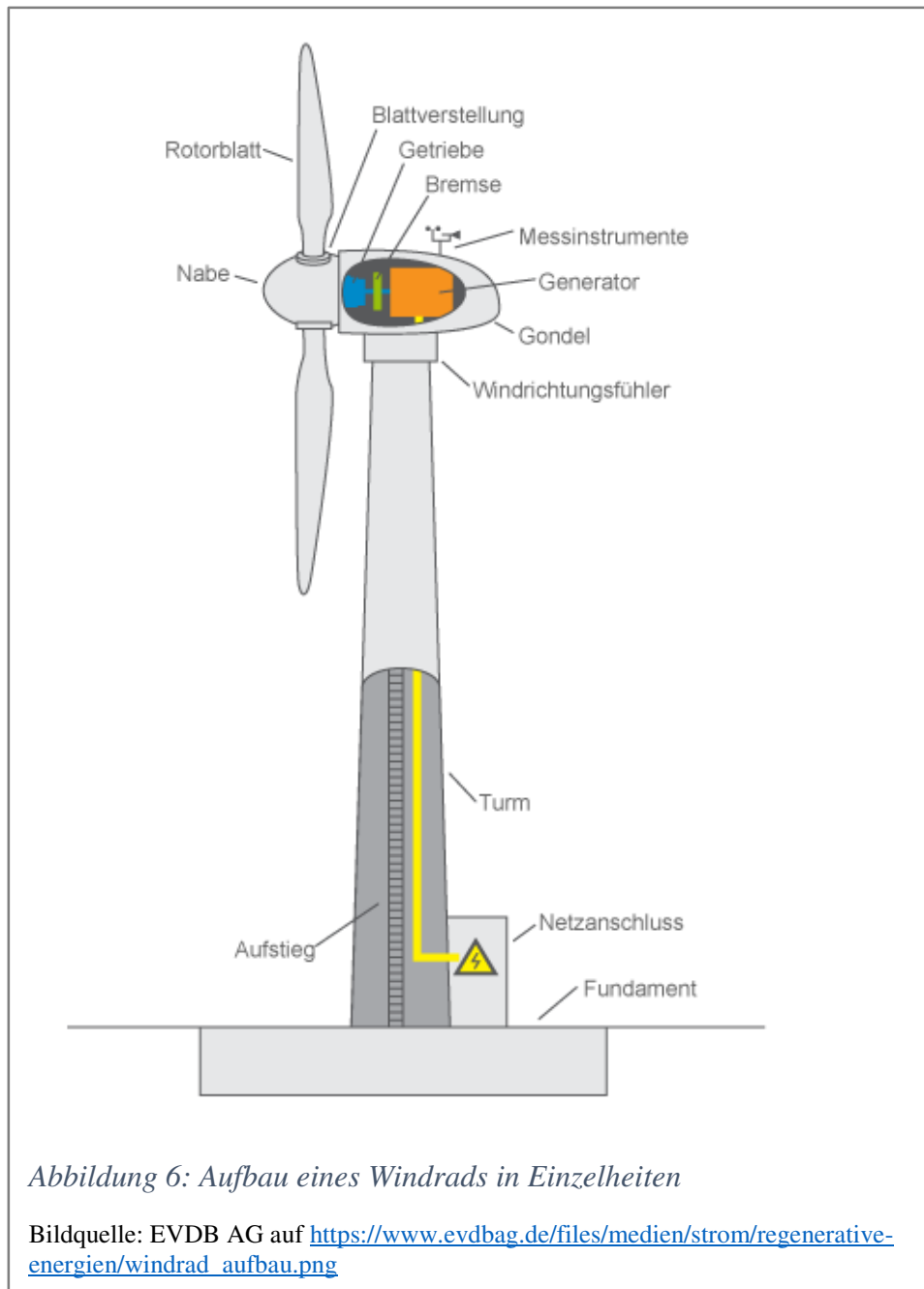
⁴¹ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.85-86.



Das Diagramm zeigt eine Leistungskurve eines Generators. Ab einem Wind von mehr als 4 Metern pro Sekunde fängt der Generator an Elektrizität zu generieren. Der Generator erreicht seine maximale Leistung von 350 Watt bei ca. 12,5 m/s.

2.3.5. Windrad

Eine Vielzahl von Faktoren und Komponenten müssen bei der Konzipierung eines Windrads berücksichtigt werden, dass diese erfolgreich Energie gewinnen kann. In dem folgenden Abschnitt wird grundlegendes Wissen, dass für den Bau eines Windrads benötigt wird, dargestellt.



Die Kernelemente einer kleinen Windkraftanlage sind Rotorblätter, Turm, Kabel für Stromverteilung, Windrichtungsgeber, Wechselrichter, Laderegler, Ablenklast und eine Batteriebank.⁴²

⁴² Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.25.

2.3.5.1. Standort

Die richtige Standortwahl ist essenziell für die Leistung und Langlebigkeit der Windkraftanlage. Ein schlechter Standort kann neben schlechter Leistung auch zu Wartungsproblemen und höheren Kosten führen. Ein geeigneter Standort muss zwei grundlegende Voraussetzungen erfüllen. Als erstes muss es an dem Ort eine hohe (ab ~5 Metern pro Sekunde) durchschnittliche Windgeschwindigkeit geben. Denn das wichtigste Element, um die Leistung zu maximieren, ist die Windgeschwindigkeit.⁴³

Die zweite Anforderung an den Standort ist, dass dieser möglichst geringe Windturbulenzen aufweisen sollte. Turbulenzen belasten den Windgenerator und die Rotorblätter. Daher kann umso effizienter Energie gewonnen werden, desto geringer die Windturbulenzen sind.⁴⁴

Neben der durchschnittlichen jährlichen Windgeschwindigkeit sollten bei der Standortwahl auch topographische Gegebenheiten berücksichtigt werden. Grundsätzlich ist ein Standort auf einem Hügel besser als ein Standort im Tal, jedoch kann unter bestimmten Umständen auch der höchste verfügbare Punkt nicht der beste Standort sein. Ein sehr hoher Standort könnte schwer erreichbar sein, in zu großer Distanz von dem Ort an dem die Energie benötigt wird. Weiterhin sollte das Windrad auf einer möglichst freien Fläche stehen. Durch Barrieren, beispielsweise Gebäude oder Bäume, können Soge oder Wirbel entstehen. Diese können weit in die Luft ragen und die Windturbine beschädigen.

Abschließend sollte das Gelände idealerweise auch eine glatte Oberfläche, ohne Hindernisse wie Bäume, bieten. Hierdurch verringert sich die Reibung durch die Luftbewegung und der Wind kann sich schneller ausbreiten.

Die American Wind Energy Association, empfiehlt Standorte mit jährlich durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten von 5 m/s für netzgekoppelte Anwendungen. Für netzferne Anwendungen wie beispielsweise Batterieladegeräte oder im Rahmen dieser Arbeit der Raspberry Pi, können schon von 3 bis 4 m/s ausreichend sein.⁴⁵

2.3.5.2. Ausrichtung der Windturbine

Einer der grundlegendsten Entscheidung bei der Konzipierung einer Windkraftanlage ist die Ausrichtung die Rotorachse. Es existieren Windkraftanlagen mit horizontalen und mit

⁴³ Siehe oben, 2.3.4.2.4.

⁴⁴ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.132.

⁴⁵ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.133-135.

vertikalen Rotorachsen. Die meisten modernen Windkraftanlagen weisen eine horizontale Rotorachse auf. Solche horizontalachsigen Windturbinen haben den Vorteil, dass bei einer bestimmten Schnelllaufzahl die Rotorsteifigkeit und somit auch die gesamte Schaufelmasse im Verhältnis zur Kehrfläche geringer ist. Zusätzlich kann die Kehrfläche höher über dem Boden liegen, was sich positiv auf die Produktivität des Systems auswirkt.

Vertikalachsige Windturbinen hingegen haben den Vorteil, dass sie kein Windnachführungssystem benötigen. Das heißt, der Rotor kann aus jeder Richtung Wind aufnehmen. Zusätzlich haben die meisten Rotorschaukeln von Windkraftanlagen mit vertikaler Achse eine konstante Flügeltiefe ohne Wölbung. Dies ermöglicht eine relativ einfache und kostengünstige Herstellung. Ein weiterer Vorteil ist, dass viele Elemente des Antriebsstrangs an dem Mast relativ nahe zu dem Boden angebracht werden können. Dennoch konnte sich diese Konstruktionsweise nicht durchsetzen. Dies mag vor allem daran liegen, dass viele der vertikalachsigen Turbinen, die in den 1970er und 1980er Jahren gebaut wurden, unter Ermüdungsschäden an den Rotorblättern litten. Dieser ist auf die zyklische aerodynamische Spannung auf die Schaufeln zurückzuführen, die durch die Drehungen entsteht und die Ermüdung des Aluminiums, aus dem die Rotorblätter üblicherweise hergestellt wurden.⁴⁶ Daher ist eine horizontale Achse vorzugswürdig im Rahmen dieser Arbeit.⁴⁷

2.3.5.3. Generator

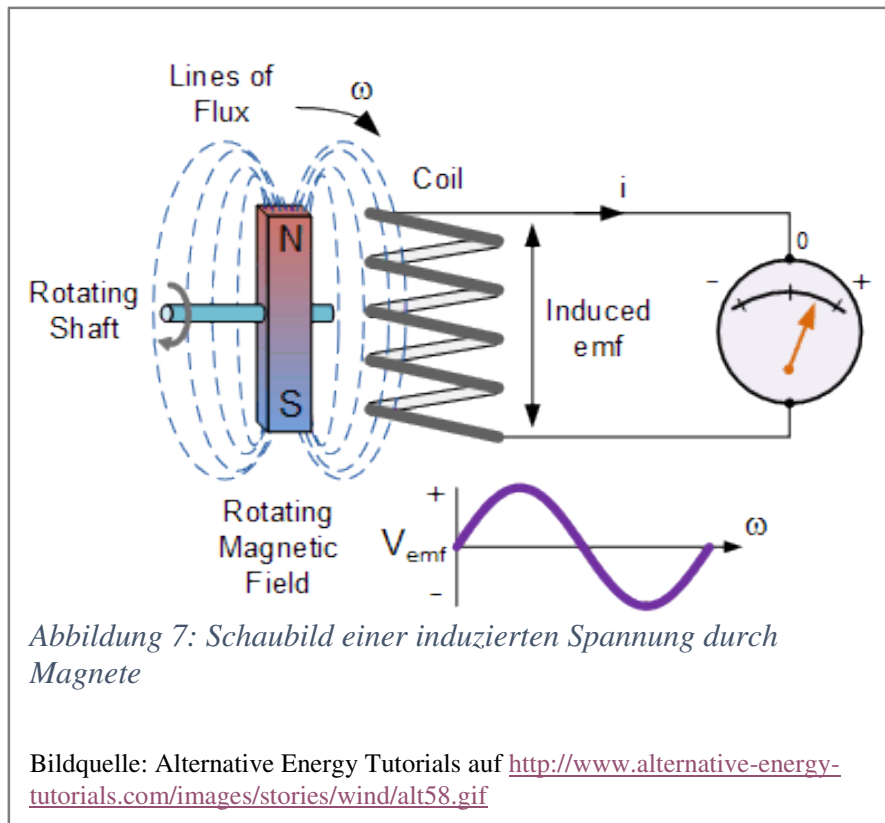
Der Generator in einer Windanlage wandelt die mechanische Energie der rotierenden Blätter in elektrische Energie um. Wenn Wind auf die Rotorschaukeln trifft wird die lineare Bewegung des Windes in Drehbewegung umgewandelt. Das bedeutet, umso stärker der Wind ist, desto mehr Elektrizität kann erzeugt werden.⁴⁸

Gleichstrom (DC) und Wechselstrom (AC) Generatoren werden im Bereich von Windkraftanlagen eingesetzt. Beide funktionieren nach dem Faraday'schen Gesetz, welches besagt, dass das Passieren eines magnetischen Feldes an einer elektrischen Spule oder Drahtspule einen Elektronenfluss hervorruft.

⁴⁶ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S.316-317.

⁴⁷ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S.316-317.

⁴⁸ Alternative Energy Tutorials, Home of Alternative and Renewable Energy Tutorials, <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-generator.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.



Angetrieben von der mechanischen Energie der Rotorscheufeln rotiert der Rotor (Rotating Shaft) um eine Drahtspule (Coil). Das rotierende Magnetfeld (Rotating Magnetic Field) durchläuft mit seinen Magnetfeldlinien (Lines of Flux) eine Spule und induziert damit eine elektrische Spannung. Dieser Prozess ist reversibel, deshalb kann ein Motor als Generator und ein Generator als Motor verwendet werden.

Welcher Generator für das System geeignet ist, richtet sich nach dessen Anforderungen. Von einem Dynamo erzeugter Gleichstrom kann beispielsweise ohne größeren Aufwand zum Laden von Batterien verwendet werden. Im Gegensatz hierzu kann Wechselstrom ohne weiteres direkt an das lokale Stromnetz geschlossen werden.⁴⁹

2.3.5.4. Rotor

Der Rotor befindet sich vor der Turbine und ist oft deren auffallendstes Element. Er besteht aus Rotorblättern, die einem Propeller oder Ventilator ähneln. Jedoch sind diese in einer speziellen Art geformt, um die Aerodynamik für die Energiegewinnung zu maximieren.

⁴⁹ Alternative Energy Tutorials, Induction Generator, <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Rotoren haben in der Regel zwei der drei Blätter, die an einer Narbenplatte befestigt ist. Die Narbenplatte wird oft noch mit einer Nasenabdeckung geschützt.

Die ersten Rotoren wurden aus Holzstäben und Stofftüchern, gleich einem Segel, gebaut. Bei zu hohem Wind konnten die Stofftücher eingerollt werden und die Windmühle so vor Schäden geschützt werden. Später wurden die Rotorblätter aus Holz gefertigt und das Tragflächendesign war durch die Flugzeugindustrie beeinflusst. Danach folgten Rotorblätter aus Metall, die Ende des 19. Und im 20. Jahrhundert genutzt wurden. Diese waren zwar äußerst langlebig, aber auch sehr schwer und konnten sich nur langsam drehen, wodurch die Energieerzeugung negativ beeinflusst wurde. Aluminium stellt zwar eine leichte Materialalternative da, jedoch weist es auch schneller Ermüdungserscheinungen auf. Zusätzlich können Metallblätter Fernsehen, Satellitenfernsehen und drahtlose Internetsignale stören. Daher werden heutzutage keine Rotorblätter aus Metall hergestellt.

Die meisten Rotorblätter werden heutzutage aus geformten Kunststoffen mit Glasfaser- oder Kohlefaserverbundwerkstoffen hergestellt. Sie sind hohlförmig oder weisen einen Schaumstoffkern auf. Solche Rotorblätter aus Verbundwerkstoff haben den Vorteil, dass sie preiswert und sehr robust sind. Zum Teil werden sie kritisiert, nicht „grün“ zu sein. Dennoch ist zu beachten, dass sie eine Lebensdauer von bis zu 20 Jahren haben und kaum gewartet werden müssen, wodurch sich letztendlich doch eine geringe Umweltbelastung ergibt.

Solche Rotorblätter sind grundsätzlich breiter und steifer in der Nähe des Rotors, wo sie die größte Festigkeit benötigen. Zur Spitze hin werden sie konisch. Die Vorderseite der Tragfläche ist abgerundet und der hintere Teil eine gerade Linie. Um dem Wind einen Angriffswinkel bieten zu können, sind Rotorblätter in einem Winkel von drei bis neun Grad geformt. Bei einigen Modellen sind die Blätter schräg an der Nabe befestigt um einen Winkel zu erzeugen.

Auch eine Drehung in der Blattform kann nützlich sein, da eine größere Neigung an der Blattbefestigung die Inbetriebnahme des Windrads und dessen Effizienz verbessert. Eine geringere Neigung an den Spitzen hingegen verbessert die Hochgeschwindigkeitsleistung. In dem der Wind auf die verschiedenen Abschnitte der Vorderkante in verschiedenen Winkeln trifft, entwickelt sich eine gewisse Drehung. Daher haben viele Rotorblätter eine Neigung von zehn Grad an der Nabenplatte und fünf Grad an der Spitze.⁵⁰

⁵⁰ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.241-247.

Es gibt leichte Variationen im Design der Rotorblätter bei verschiedenen Herstellern, jedoch ist nicht wissenschaftlich belegt, dass ein bestimmtes Design den anderen überlegen ist. Umso größer die Rotorblätter sind, desto mehr Energie können sie gewinnen, jedoch werden sie mit wachsender Größe auch schwerer. Zudem unterliegen auch alle Bestandteile einer maximalen Belastungsgrenze, sodass die Leistung und die Widerstandsfähigkeit der Windmühle stets in einen angemessenen Ausgleich gebracht werden müssen. Ein Trieren der Rotorblätter sorgt für minimierte Vibrationen und Verschleiß.

Die nächste Frage, die sich stellt, ist, über wie viele Blätter der Rotor verfügen sollte. In Theorie wäre das eine unendliche Anzahl an Blättern, die unendlich dünn sind. So würde die gesamte Energie des Windes erschlossen werden können.

In Realität behindern zu viele Rotorblätter den Winddurchfluss, wodurch sich auch die Menge der gewonnenen Energie verringert. Daher empfehlen einige Ingenieure lediglich eine oder zwei Blätter. Ein solches Modell ist aber schwer auszubalancieren und zusätzlich auch wartungsintensiver. Große zyklische Kräfte führen zu "Gierprellen" und Ermüdungserscheinungen. Dem kann mittels eines Gierdämpfungssystems oder einer Wippe entgegengewirkt werden, jedoch ist eine solche Lösung zu kostspielig für eine kleine Windkraftanlage.

Daher hat sich im Laufe der Zeit ein Rotor mit drei Blättern als Kompromiss aus Stabilität, Zuverlässigkeit und Energiegewinnung etabliert.⁵¹

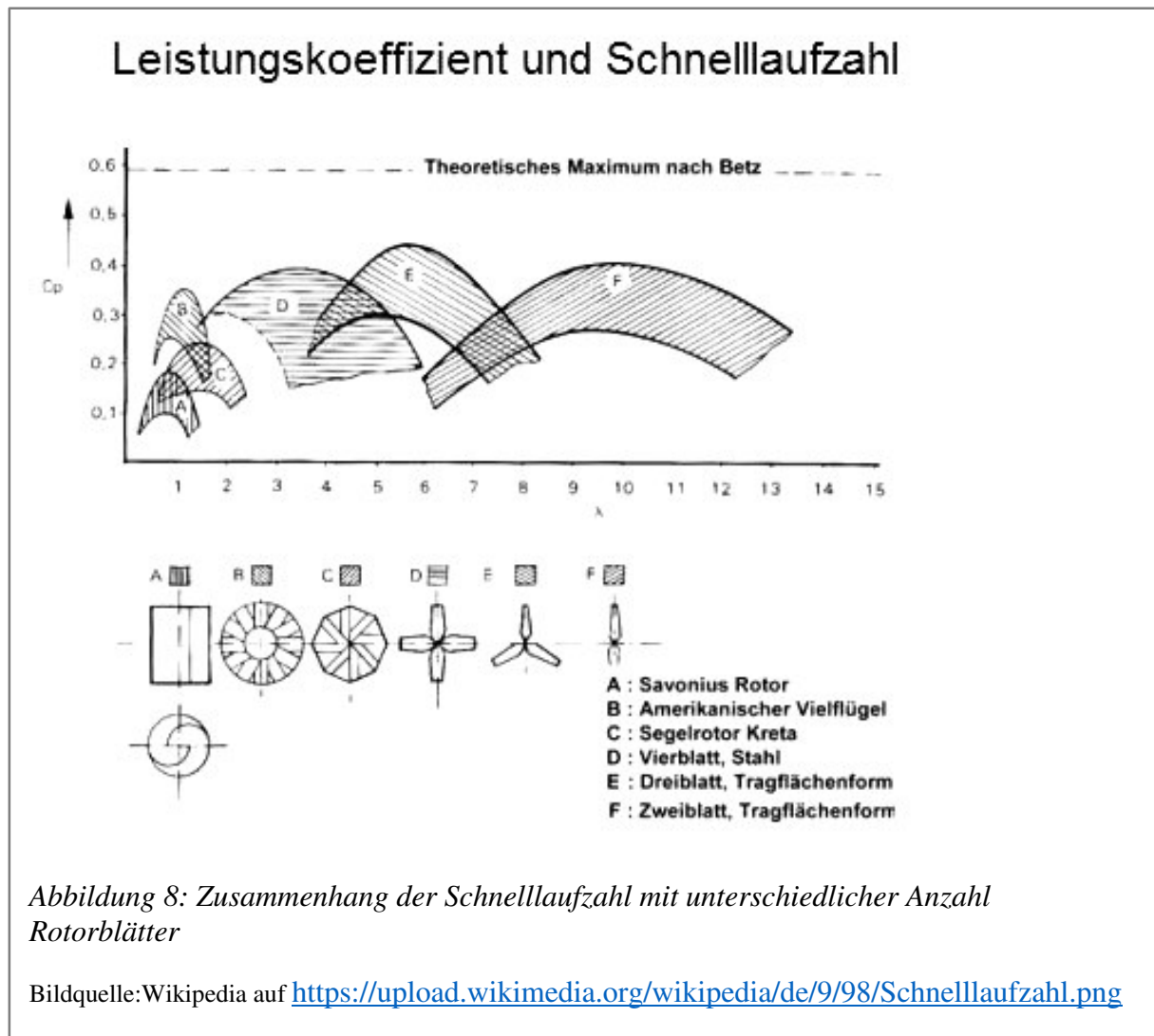
2.3.5.5. Schnelllaufzahl (Tip Speed Ratio)

Rotorblätter sollen unter Berücksichtigung der möglichen Windgeschwindigkeiten konzipiert werden. Die Geschwindigkeit mit der sich die Blattspitzen relativ zur Windgeschwindigkeit bewegen nennt man Schnelllaufzahl. Es gibt Rotorblatt-Designs, die eine 10-fach erhöhte Geschwindigkeit der Blattspitzen im Verhältnis zur Windgeschwindigkeit aufweisen.⁵²

⁵¹ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.241-247.

⁵² Piggott, Hugh, A Wind Turbine Recipe Book – The Axial Flux Windmill Plans, S.11.

Zur Auswahl der optimalen Schnelllaufzahl bei verschiedener Blattzahl kann folgende Abbildung zu Rate gezogen werden:



Aus dem Diagramm ergibt sich, dass bei einem Design mit drei Rotorblättern mit einer Schnelllaufzahl von 5-6 zu bevorzugen ist.

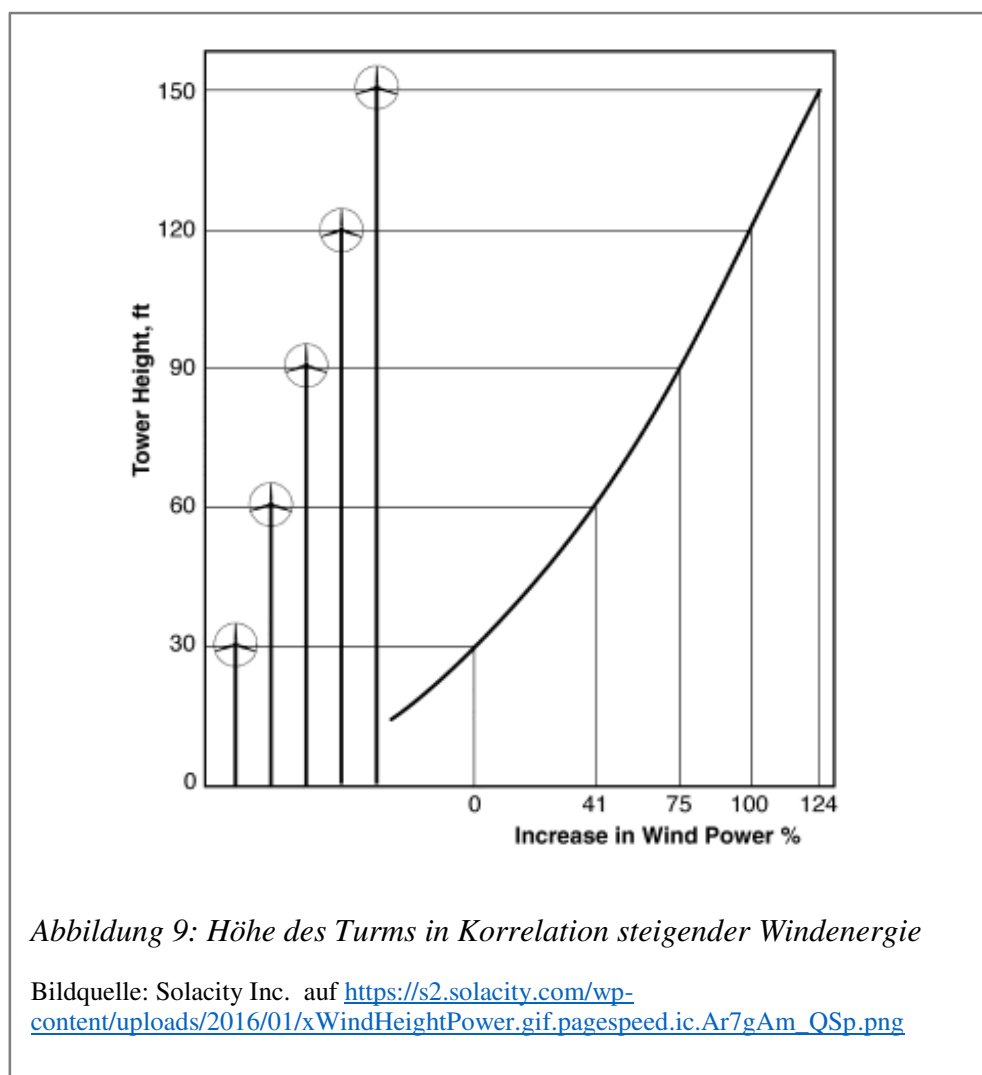
2.3.5.6. Turmhöhe

Die Höhe des Turms inkludiert das tragende Fundament auf dem er gebaut ist. Es gibt unter anderem freistehende Ausführung mit Stahlrohren, Gitter- oder Gerüsttürme oder Betontürme. Für kleinere Turbinen werden teilweise auch Abspannmasten verwendet. Grundsätzlich entspricht die Höhe des Turms dem ein bis eineinhalbfachen Rotordurchmesser, sollte aber in der Regel mindestens 20 Meter betragen.

Welche Ausführung letztendlich genutzt werden sollte, hängt von den Eigenschaften des Standorts ab. Die Steifigkeit des Turms ist eine wichtige Eigenschaft des Windkraftanlagensystems, da es kombinierten Schwingungen zwischen Rotor und Turm ausgesetzt ist.

Bei Turbinen mit Rotoren auf der windabgewandten Seite, muss die Wirkung des Windschattens (der Sog des Windes, der durch Strömungen entsteht und um den Turm fließt) durch den Rotorturm berücksichtigt werden. Ein solcher hat Auswirkungen auf die Dynamik der Turbine und führt zu Leistungsschwankungen und Geräuschentwicklung.

Daher sind windabgewandte Rotoren lauter als ihre Wind zugewandten Gegenstücke.⁵³



Die Höhe des Turms beeinflusst maßgeblich die Windgeschwindigkeit als auch die Windkraft.

⁵³ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S.6.

Eine Verdoppelung der Höhe führt zu einer Steigerung der Windgeschwindigkeit um bis zu 10%, wodurch die verfügbare Windenergie wiederum um bis zu 25% steigt. Somit führt eine Vervierfachung der Turmhöhe zu einer Verdopplung der verfügbaren Windkraft. Diese steigt folglich 200% an.⁵⁴

2.3.5.7. Windrichtungsgeber

Moderne Anlagen benutzen Stellmotoren für die die Windrichtungsnachführung. Hierbei wird die Windrichtung mittels Sensoren ermittelt, die sogenannten Windrichtungsgeber.

Die Windanlagen sind grundsätzlich Schwingungen um die Turmachse ausgesetzt. Um dies zu vermeiden gibt es mehrere Optionen. Teilweise werden Stellmotoren gegeneinander verspannt oder das gesamte Lager wird mit einer Bremse befestigt, wenn es nicht in Bewegung ist. Auch Gleitlager haben eine natürliche Dämpfung, die zur Stabilisierung eingesetzt werden kann. Der Rotor und das System sind starkem Widerstand bei der Bewegung um die Hochachse ausgesetzt. Für die Windrichtungsnachführung bedeutet das, dass diese langsam und gedämpft zu erfolgen hat.

Ein weiteres Problem ist die elektrische Anbindung der Gondel. Da Schleifkontaktringe durch die Witterung und die hohen Ströme stark belastet werden, wären diese sehr wartungsintensiv. Daher werden fest verbundene Kabel verwendet. Diese würden bei einer unbegrenzten Anzahl von Gondeldrehungen stark verdrehen, daher ist die Anzahl der Gondelumdrehungen auf in der Regel bis zu 5 Umdrehungen beschränkt. Die Position der Gondel wird von einem Verwindungszähler überprüft und bei Bedarf wird die Gondel bei inaktivem Rotor einige Male um die Hochachse gedreht, um so die Kabel zu entwirren.⁵⁵

2.3.5.8. Laderegler

Die Hauptaufgabe eines Ladereglers liegt in der Spannungsüberwachung der eingesetzten Batterie. Die obere und untere Spannungsgrenze ist an einem Regler einstellbar. Diese Funktion schützt die Batterie vor einer Über- oder Unterladung. Die überschüssige Energie wird automatisch an einen Lastwiderstand geleitet. Ohne den Lastwiderstand könnte die Turbine frei rotieren und somit den Generator oder die Windturbine schädigen.⁵⁶

⁵⁴ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.90.

⁵⁵ Sauber in die Zukunft ! Energie-Visions.de, <http://energie-visions.de/lexikon-2/windenergieanlage-windrad/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁵⁶ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.353-354.

Am häufigsten werden sogenannte Parallel-Laderegler im Bereich der Windkraftanlagen verwendet. Die Ausgangsspannung des Generators muss die Batteriespannung erreichen, damit Elektrizität in die Batterie fließen kann.⁵⁷

Heutzutage gibt es aber auch Maximal-Leistungspunkt-Suche (Maximum Power Point Tracking – MPPT) Laderegler für Windkraftanlagen. Diese erhöhen bei geringen Windgeschwindigkeiten, in denen der Generator nicht die erforderliche Batteriespannung erreicht, die Ausgangsspannung des Generators auf die benötigte Batteriespannung.

Als Alternative kann ein Laderegler auch selbst gebaut werden, insofern das erforderliche Wissen vorhanden ist.⁵⁸

Es ist davon abzuraten einen Laderegler zu verwenden, der für Solaranlagen konzipiert wurde. Diesen fehlt die Funktion, bei zu hoher Ausgangsspannung des Generators die Last abzulenken.⁵⁹

3. Design (Prototypischer Aufbau)

Mit Hilfe des aktuellen Stands der Technik, kann nun ein eigenes System zum Betrieb eines Einplatteneinrechners mittels Windenergie konzipiert werden.

Hierbei muss in dem Designkonzept der Windkraftanlage die Lasten berücksichtigt werden, denen die Anlage standhalten soll. Zudem muss eine Vielzahl an mechanischen und elektrischen Komponenten beachtet und in Einklang gebracht werden.⁶⁰

Der Wind, als Ressource, kann zwar bei dem Bau der Anlage nicht beeinflusst werden, jedoch muss bei der Planung berücksichtigt werden, wie man ihn am besten nutzen kann. Die verwendeten Materialien sollten kostengünstig sein, aber auch von geringem Gewicht, sodass die Kosten für die Tragekonstruktion niedrig gehalten werden können. Dabei gilt aber auch zu berücksichtigen, dass die Materialien dennoch widerstandsfähig sein sollten, um gegebenenfalls extreme Witterungsbedingungen auszuhalten und über einen längeren Zeitraum zuverlässig zu funktionieren ohne dass Wartungen anfallen. Gerade die klein gehaltenen Komponenten einer

⁵⁷ Maurer Elektromaschinen GmbH, Wissenswertes Windkraft, <https://www.maurelma.ch/windkraft.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁵⁸ How I home-built an electricity producing Wind turbine, http://www.mdpub.com/Wind_Turbine/index.html, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁵⁹ Maurer Elektromaschinen GmbH, Wissenswertes Windkraft, <https://www.maurelma.ch/windkraft.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁶⁰ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S.311-312.

Windkraftanlage sind hohen Belastungen und unterschiedlichen Spannungen ausgesetzt, die letztendlich zu einer Ermüdung der Materialien führt. Hierdurch entstehen Ausfälle der Anlage oder Reparaturbedarf.

Somit liegt der Schwerpunkt in der Konstruktion einer Windkraftanlage darin, die Anschaffungskosten mit einem geeigneten Aufbau und belastbaren Materialien in Einklang zu bringen.⁶¹

Die Erklärung des Designkonzepts des Prototyps kann gleichermaßen als Bauanleitung für die Errichtung eines eigenen Systems genutzt werden.

3.1. Liste der Komponenten

Es folgt eine Auflistung der verwendeten Komponenten.

Komponente	Kosten
Recycelte PVC-Rohre	0€
Recycelter Motor	0€
Kabel zum Verbinden - Recyclinghof	0€
Kabelbinder	0€
Kleber	2€
3D Druck der Motornabe	10€
Diverse Schrauben und Muttern	10€
INA219	11€
Reed-Schalter	0,63€
Raspberry Pi 3B+ (vorhanden)	0€ (50€)
2 Brückengleichrichter	0,8€

Für die Konstruktion werden noch folgende Werkzeuge/Geräte benötigt.

- Schraubenzieher
- Dremel/Handsäge/Winkelschleifer
- Lötkolben und Lötzinn
- Multimeter

⁶¹ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S.311-312.

3.2. Energiebedarf des Systems

In der vorliegenden Arbeit wird bei dem prototypischen Aufbau des Systems der Raspberry Pi 3B+ eingesetzt. Der Grund hierfür ist, dass bei diesem Modell ein integrierter Wifi-Chip eine Netzwerkverbindung ohne ein zusätzliches Modul ermöglicht. Zudem ist eine der Anforderungen an das System, dass es möglichst kostengünstig errichtet werden soll. Ich verfügte bereits über den Raspberry 3B+ und ein anderes Modell hätte keinerlei funktionale Vorteile bieten können.

Dies ist das leistungsstärkste Modell mit dem höchsten Strombedarf. Die nachfolgenden Berechnungen zum durchschnittlichen Energiebedarf beruhen auf dem Modell 3B+. Soll ein anderes Modell verwendet werden, müssten dementsprechend die Berechnungen angepasst werden. Der durchschnittliche Energiebedarf ist für die Bestimmung der erforderlichen Batterie und der Größe der Windturbine notwendig.

Der eingesetzte Raspberry benötigt eine konstante Spannung von 5,1 Volt und zieht 980 milli Ampere unter Volllast (400% CPU Last). Durch Einsetzen der Werte in die Formel der elektrischen Leistung lässt sich der Strombedarf in Watt berechnen ⁶²:

$$\text{Elektrische Leistung} = 5,1 \text{ Volt} * 0,98 \text{ Ampere} = 4,998 \text{ Watt}$$

Zur besseren Anschaulichkeit und Weiterverwendung wird der Wert auf 5 Watt aufgerundet.

Die offiziellen Produktbeschreibung gibt an, dass es sinnvoll sei ein Netzteil zu benutzen, welches den Raspberry mit maximal 2,5 A versorgen kann.⁶³ In diesem Projekt kommt keinerlei Peripherie wie Maus, Tastatur, USB-Stick oder Monitor zum Einsatz, folglich kann die maximale Amperezahl vernachlässigt werden. Der Bedarf von 5 Watt ist bereits großzügig bemessen, da der Raspberry nicht dauerhaft mit 400% Leistung betrieben werden wird.

⁶² Raspberry Pi Dramble, Drupal 8 on a cluster of Raspberry Pis, Power Consumption Benchmarks, <https://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁶³ Raspberry, Power Supply, <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Mit dem Ergebnis der vorherigen Berechnung (5 Watt), lässt sich durch das Einsetzen der Laufzeit aus den gestellten Anforderungen der Tages- und Wochenbedarf berechnen:

$$5\text{ W} * 24\text{ Stunden} = 120\text{ Wattstunden}$$

Das Ergebnis zeigt, dass der Strombedarf des Raspberry Pi 3B+ bei 120 Wattstunden (Wh) pro Tag liegen wird. Dieses Ergebnis wird zur Berechnung der Batteriekapazität genutzt.

3.3. Batteriekapazität

Es existiert eine große Auswahl an verschiedenen Arten von Batterien. Unabhängig von der Art der Batterien die verwendet werden, ist eine richtige Bestimmung der Größe der Batteriebank nötig.

Gemäß den Anforderungen soll der Raspberry Pi nach Möglichkeit 24 Stunden, 7 Tage die Woche über das ganze Jahr laufen. Demnach muss eine Batterie ausgewählt werden, die genug Kapazität hat den Raspberry für mindestens 1 Woche durchgängig zu versorgen ohne aufgeladen werden zu müssen.

Im vorherigen Abschnitt⁶⁴ wurde bereits der Strombedarf des Systems pro Tag ermittelt, welcher bei 120 Wattstunden liegt. Unter Annahme einer Autonomie von 7 Tagen, muss folgende Kalkulation erfolgen:

$$120\text{ Wh} * 7\text{ Tage} = 840\text{ Wh}$$

Da die Kapazität der meisten Batterien in Amperestunden (Ah) angegeben werden, muss eine weitere Berechnung folgen. Mit der im Kapitel Grundlagen angeführten Formel⁶⁵ lässt sich nun mühelos die Stromaufnahme des Raspberry Pies über den geplanten Zeitraum berechnen:

$$\text{Stromstärke} = \frac{840\text{ Wh}}{5,1\text{ V}} = 164,7\text{ Ah}$$

Der Raspberry muss somit über den Zeitraum von 7 Tagen circa 164,7 Ampere aufnehmen um funktionieren zu können. An dieser Stelle bietet es sich an, einen Sicherheitsfaktor in die Rechnung aufzunehmen, da die Batterien nie tiefenentladen werden sollten. Wie auch schon in

⁶⁴ Siehe Energiebedarf des Systems, 3.2.

⁶⁵ Siehe unter Ampere, 2.3.1.2.

den Grundlagen angesprochen, empfiehlt sich eine Entladung der Batterien bis maximal 30%.⁶⁶ Es ergibt sich die folgende Berechnung:

$$Q = 164,7 \text{ Ah} * 1,3 = 214,12 \text{ Ah}$$

Anhand dieses Ergebnisses kann nun eine geeignete Batterie gefunden werden. Da in diesem Projekt der Raspberry Pi von der Batterie betrieben werden soll empfiehlt sich eine Batterie mit einer Spannung von 6 Volt. Der Raspberry braucht zum Betreiben eine Spannung von 5,1 Volt, also muss die Spannung der Batterie noch reduziert werden. Hierfür kann ein Spannungswandler benutzt werden. Die Kosten einer Batterie, die die errechneten Voraussetzungen besitzt, betragen circa 400€ im Handel.⁶⁷ Zudem hat Davis mit seiner Windkraftanlage bereits bewiesen, dass eine Batterie mit selbst produzierter Energie aufgeladen werden kann. Aus diesem Grund wird für den prototypischen Aufbau auf eine Batterie verzichtet.

3.4. Generator Datenblatt

Wie in dem Kapitel Generator⁶⁸ beschrieben, müssen verschiedene Aspekte bei der Auswahl des Generators beachtet werden. So kann ein Schrittmotor, der mit maximal 3 Volt betrieben wird, keine 12 Volt generieren, die zum Aufladen einer 12 Volt Batterie notwendig sind. Daher sollte ein Motor mit einer möglichst hohen Betriebsspannung ausgewählt werden. So kann auch bei niedrigen Umdrehungen pro Minute ein nützlicher Spannungswert generiert werden. Ein Motor mit einer Nennspannung von 50 Volt könnte auch bei niedriger Drehzahl eine 12 Volt Batterie laden. Ein 15 Volt Motor hingegen kann nur bei maximalen Umdrehungen die erforderliche Spannung generieren.⁶⁹

Aus diesem Grund wurde in einigen Projekten der Generator selbst hergestellt. Durch die Anzahl der Wicklungen in den Kupferspulen kann sehr genau berechnet werden, welche Leistung von dem Generator zu erwarten ist.⁷⁰ Allerdings würde eine eigene Herstellung den

⁶⁶ Kapazitätsrechner – Batteriekapazität ermitteln, <https://ladegeraet-vergleich.de/kapazitaetsrechner-batteriekapazitaet-berechnen/>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

⁶⁷ Online Batterien, Hoppecke verschlossene Bleibatterie ELA, <https://www.online-batterien.de/shop/Hoppecke-powercom-SB-6V-220-6V-220Ah-C10-Hoppecke-verschlossene-Bleibatterie-ELA>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁶⁸ Siehe unter 2.3.5.3.

⁶⁹ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/stepper-motor-basics/>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

⁷⁰ TheGoofy, instructables, 600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor, <https://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Rahmen dieser Arbeit sprengen, daher wird auf eine kostengünstige Alternative zurückgegriffen: ein Schrittmotor. Diese haben den Vorteil, dass sie sehr leicht zu erwerben sind und nur wenig mechanische Teile enthalten. Hierdurch ist die Lebensdauer höher als bei anderen Motoren.⁷¹

Die Ausgangsspannung der geplanten Batterie gibt die minimale Voltzahl vor, die der Generator generieren muss, damit diese überhaupt aufgeladen werden kann. Batterien existieren in verschiedenen Standardgrößen. Der Raspberry bedarf einer Spannung von 5,1 Volt. Die kleinste Batterie, die dieser Anforderung entspricht, hat eine Ausgangsspannung von 6 Volt. Dies bedeutet, dass der Generator mindestens 6 Volt generieren muss.

Um die Kosten für das System gering zu halten, stammt der Motor von einem Recyclinghof in Stellenbosch, Südafrika. Die Auswahl der verfügbaren Motoren war limitiert. Die beste Wahl spiegelt sich in den folgenden Abbildungen wieder:

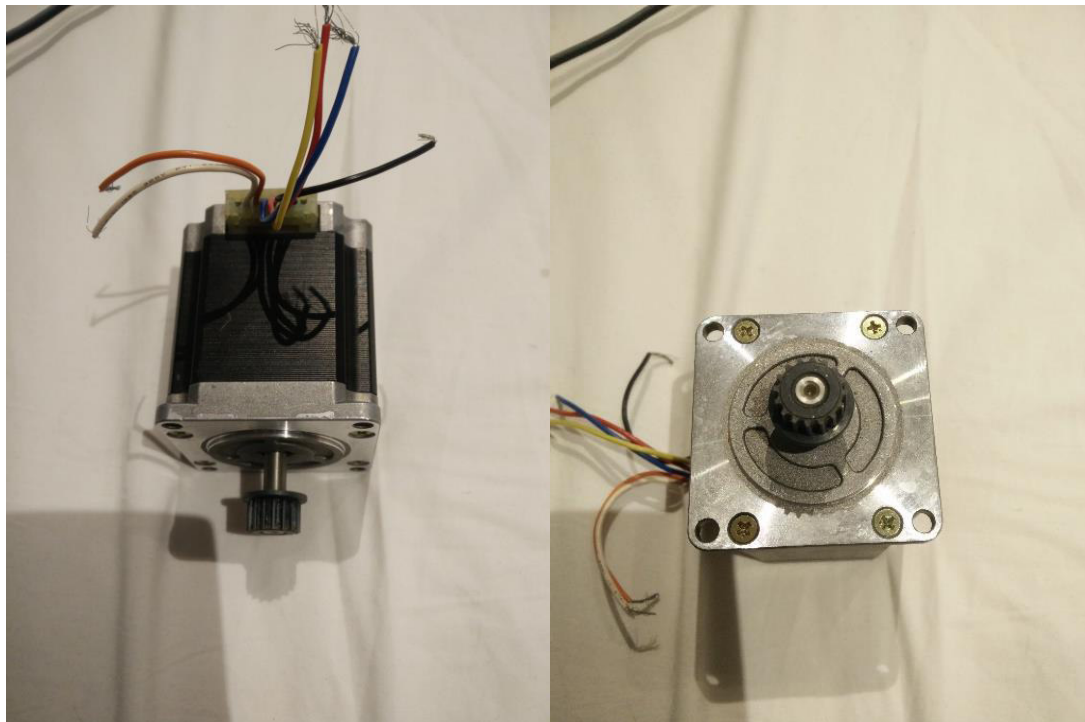


Abbildung 10: Ausgesuchter Motor: Sanyo Denki 103H7124-1145

Bildquelle: eigenes Material

⁷¹ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/electricity-with-stepper-motors/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Dem Datenblatt⁷² können folgende Spezifikationen entnommen werden:

- Schrittgröße 1,80 Grad / Phase
- Anzahl an Kabeln = 6
- Betriebsspannung = 12 - 24 Volt DC
- Stromstärke = 2,4 A / Phase
- Gewicht = 1000 Gramm

Mit einer Betriebsspannung von 24 Volt und 2,4 Ampere pro Phase ergibt sich eine Leistung von:

$$24 \text{ Volt} * 2,4 \text{ Ampere} = 57,6 \text{ Watt}$$

Da es sich hierbei um einen Permanentmagnetmotor handelt, ist eine Energieumwandlung mit einer Effizienz von 50-80% Effizienz zu erwarten, wenn der Motor als Generator genutzt wird. Es ist also anzunehmen, dass gewählte Generator zwischen 28,8 Watt und 46,08 Watt generieren wird:

$$57,6 \text{ Watt} * 50\% = 28,8 \text{ Watt}$$

$$57,6 \text{ Watt} * 80\% = 46,08 \text{ Watt}^{73}$$

Allerdings ist der Motor nicht als Generator ausgelegt, somit gibt es keine konkrete Auskunft, wieviel Leistung er tatsächlich generieren kann.

Der eingesetzte Schrittmotor wird aufgrund seiner inneren Struktur Wechselspannung erzeugen. Um diese zum Laden einer Batterie zu nutzen, bedarf es zwei Brückengleichrichters, die den Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln. Diese können entweder erworben oder mittels Schottky Dioden selbst konstruiert werden. Um eine Überhitzung der Dioden, und damit resultierenden Verlust von Energie in Wärme im Brückengleichrichter vorzubeugen sollte ein entsprechend leistungsstarkes Bauteil verwendet werden. Laut Datenblatt des eingesetzten

⁷² KlinikRobot.com, Work, don't play!, <http://klinikrobot.com/product/nema23-stepper-motor/sanyo-denki-103h7124-1145.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁷³ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.300.

Schrittmotors ist eine Stromstärke von bis zu 2,4 Ampere pro Phase zu erwarten. Demnach sollten die Dioden zur Sicherheit Stromstärken von 5 Ampere oder mehr aushalten können.⁷⁴

Zum Testen des Prototyps werden in dieser Arbeit zwei Brückengleichrichter vom Typ 2W10⁷⁵ eingesetzt, die laut Datenblatt für eine Stromstärke von 2.0 Ampere ausgelegt sind. Somit sind sie für den realen Betrieb optimal geeignet, allerdings reichen sie zum Testen des Prototyps aus.

Vor der Verkabelung der Ausgänge vom Schrittmotor mit einem Brückengleichrichter, muss eine Prüfung der Widerstände zwischen den verschiedenen Aderpaaren erfolgen. Somit kann gleichzeitig herausgefunden werden, ob der geplante Motor eventuelle Kurzschlüsse hat. Die Spulen sollten nahezu identische Widerstandswerte haben, sonst würde der Motor im Normalbetrieb nicht richtig funktionieren. Das Messen der Widerstände erfolgt mit einem Multimeter. Ein Drahtpaar, welches eine Spule verbindet, wird einen doppelt so hohen Widerstand aufweisen, wie ein Drahtpaar, welches keine Verbindung hat.⁷⁶

Farbkombination der Kabel	Gemessener Widerstand
Rot-Gelb	1,9 ohm
Schwarz-Gelb	1,1 ohm
Schwarz-Rot	1,1 ohm
Blau-Orange	1,9 ohm
Blau-Weiß	1
Orange-Weiß	1

Tabelle 2: Ergebnis der überprüften Aderpaare mit zugehörigen Widerstände

Quelle: eigenes Material

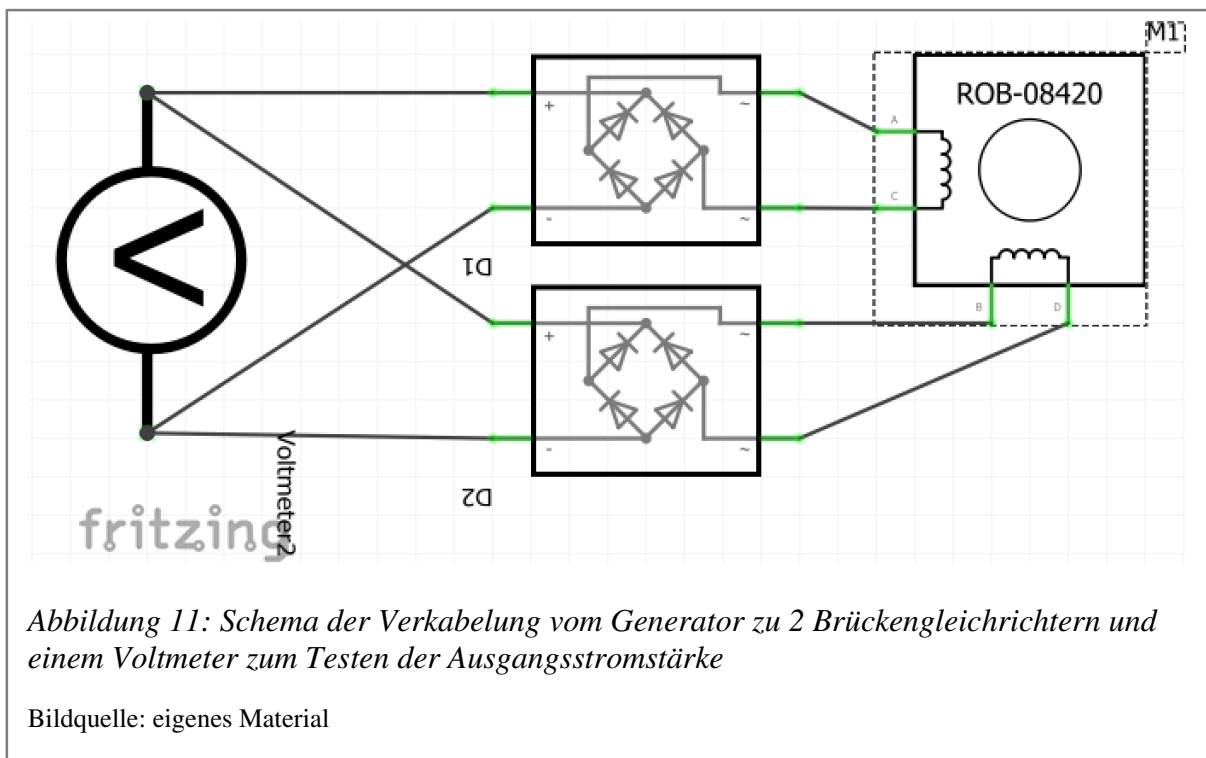
Aus den gemessenen Widerständen ergibt sich, dass die Farbkombinationen aus Rot-Gelb und Blau-Orange die gesuchten Paare sind, die zum darauffolgenden Anschluss an den Brückengleichrichter notwendig sind. Das schwarze und weiße Kabel sind für den Anschluss

⁷⁴ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/stepper-motor-basics/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁷⁵ ALLDATASHEET.COM, Electronic Components Datasheet Search, <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/33902/WTE/2W10.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁷⁶ Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/stepper-motor-basics/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

irrelevant und können vernachlässigt werden. Es ist sinnvoll, die gefundenen Verbindungen zu beschriften. Das folgende Schema soll den Anschluss verdeutlichen:



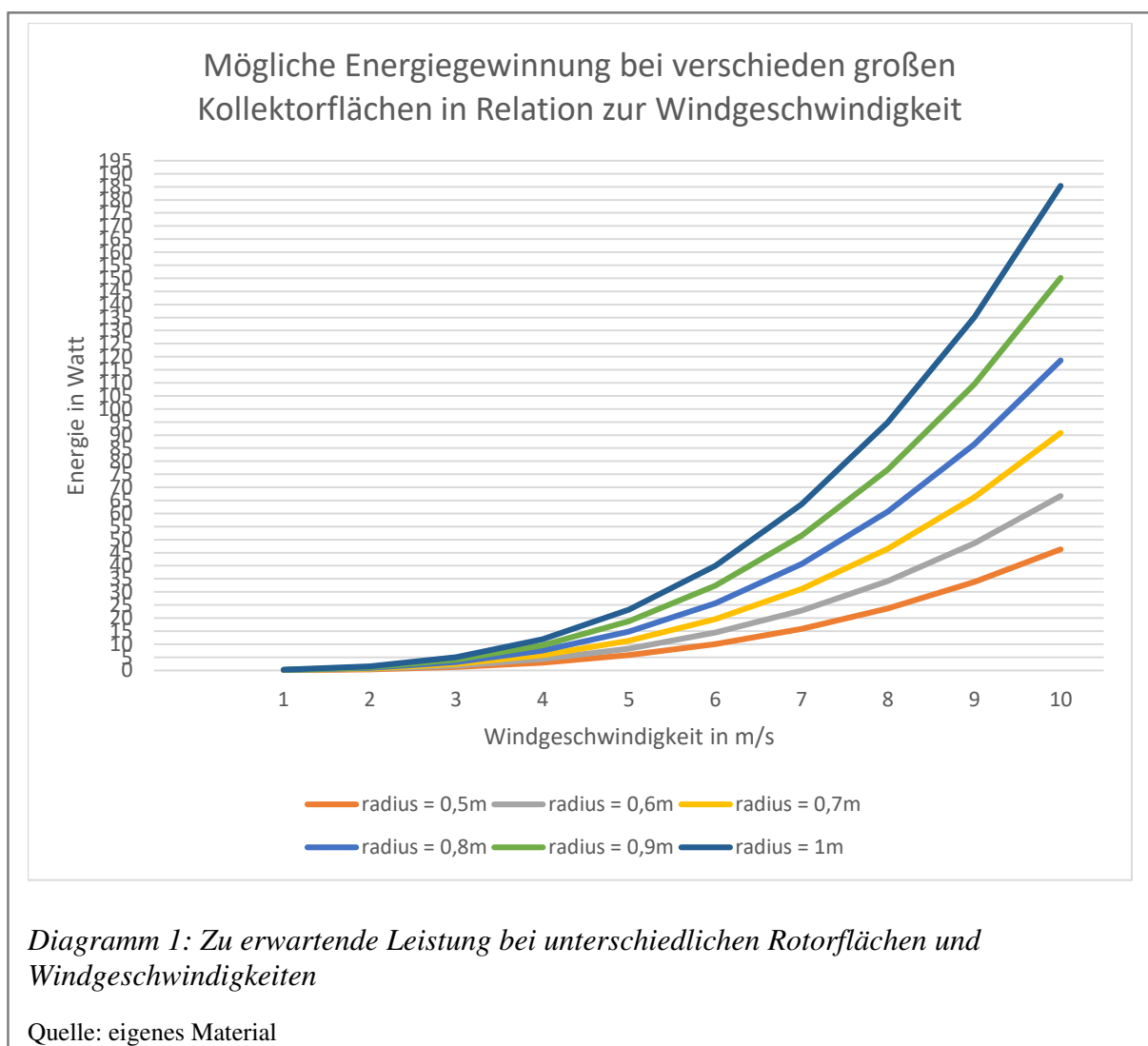
Je nach Anwendungsbedarf können die Ausgänge der Brückengleichrichter in Parallel- oder Reihenschaltung verbunden werden. Die vorliegende Abbildung x zeigt eine Parallelschaltung. Ein Aufbau in Reihenschaltung verdoppelt die elektrische Spannung und halbiert die Stromstärke. Diese Variante ist nützlich, wenn eine höhere Voltzahl erreicht werden soll, beispielsweise, bei Nutzung einer stärkeren Batterie. Da die geplante Batterie nur 6 Volt hat, ist eine Erhöhung der Voltzahl nicht notwendig.

3.5. Berechnung der möglichen Windenergie

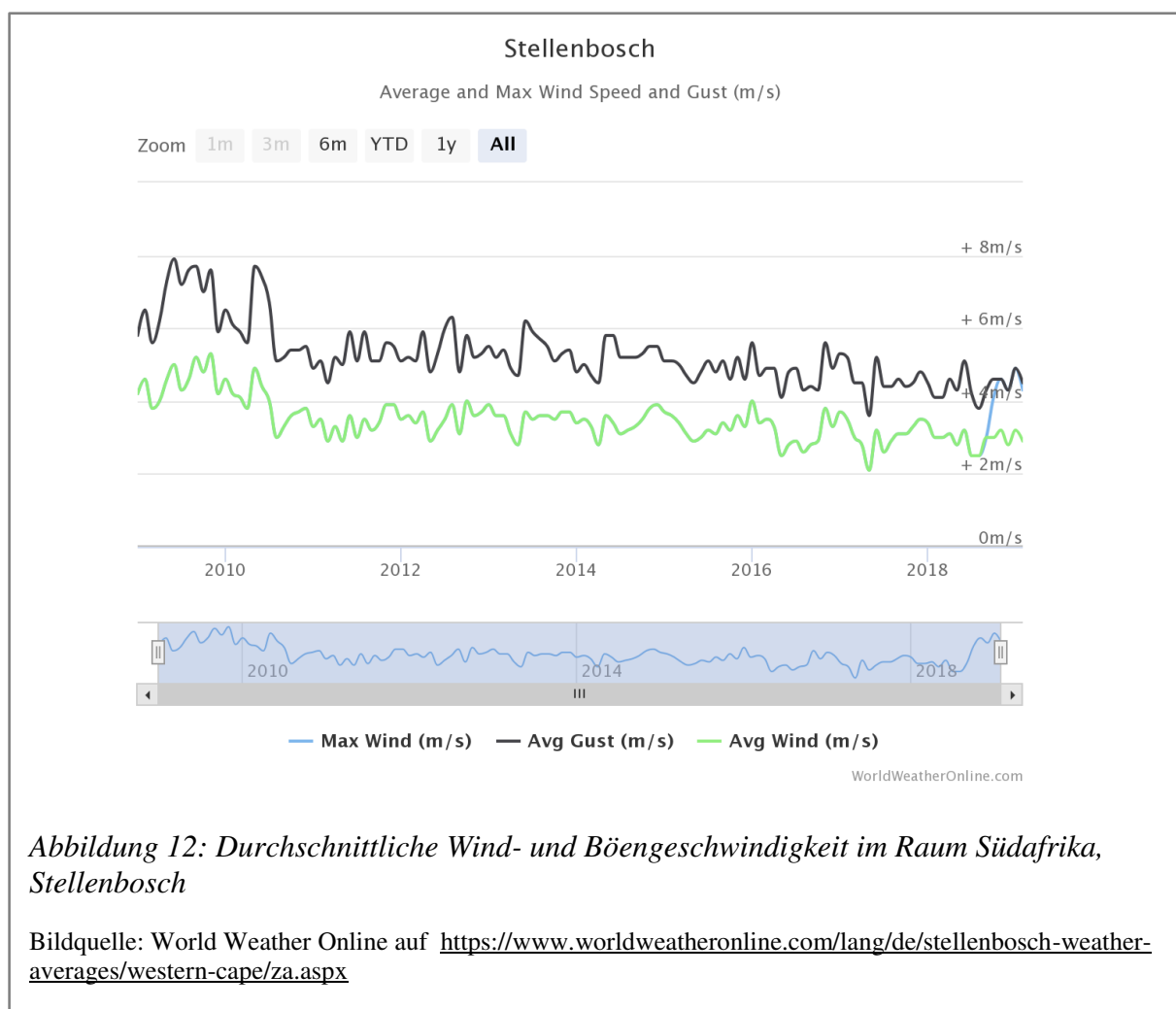
Es wurde bereits berechnet, dass das geplante System 120 Watt am Tag benötigen wird. Mithilfe der vorgestellten Formeln aus dem Kapitel der Windlehre können weitere Annahmen über die erforderliche Größe der Windturbine getroffen werden. Der Zusammenhang zwischen Rotorfläche im Bezug der Windgeschwindigkeit wurde bereits erläutert. Recherche über den Standort in dem die Windturbine getestet wird hat ergeben, dass Stellenbosch⁷⁷ ca. 107 Meter

⁷⁷ Trojanfans, Altitude & Density Chart, <https://www.trojanfans.com/altidens.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

über dem Meeresspiegel liegt und einen durchschnittlichen Luftdruck von $1,18 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C aufweist. Der Energiekoeffizient wird mit einem Wert von 10% bemessen. Laut Betz kann keine Windkraftanlage mehr als 59,3% aus dem Wind ernten. Piggott schreibt in seinem Buch das selbst hergestellte Rotorblätter nur ca. 15% der kinetischen Energie in mechanische umwandeln können. Hinzu kommt, dass es keine Herstellerangaben über die Effizienz des Motors gibt, wenn dieser als Generator eingesetzt wird. Deshalb sollte auch hier eine vorsichtige Einschätzung der möglichen Energieausbeute erfolgen. Angenommen wird, dass der Generator ca. 50% der Betriebsleistung erbringen könnte. Durch die Gleichrichtung des Wechselstroms mithilfe der Brückengleichrichter wird auch noch etwas Leistung in Form von Wärme abgegeben. Aus diesen Gründen wurde mit Absicht ein niedriger Energiekoeffizient gewählt. Mit den angenommenen Werten lässt sich ein Diagramm zeichnen, das die zu erwartende Energiemenge im Bezug zur Rotorfläche bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten darstellt.



Das Diagramm zeigt, dass ab einer Windgeschwindigkeit von 2 m/s Energie geerntet werden kann. Die erwartete Energiemenge in diesem Bereich ist allerdings sehr gering. Es muss ein Kompromiss zwischen der Länge der Rotorblätter und der zu erwartenden Energie gefunden werden. Klar ist, je länger das Rotorblatt ist, desto mehr Energie kann erwartet werden. Das System soll allerdings klein gehalten werden, sodass der Prototyp getestet werden kann. Die Entscheidung über die Rotorblattlänge hängt im Wesentlichen von der zu erwartenden Windgeschwindigkeit in dem geplanten Standort ab. Die nächste Abbildung zeigt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit im Raum Stellenbosch für den Zeitraum 2010-2018. Diese Wetteraufzeichnungen sollen bei der Entscheidung helfen.



Zur besseren Anschaulichkeit werden nochmal alle Durchschnittswerte der jeweiligen Monate für das gesamte Jahr 2018 mit anschließender Berechnung der Windgeschwindigkeit für das gesamte Jahr berechnet.

$$\bar{\varnothing}_{\text{Windgeschwindigkeit}} = \frac{2,8 + 3,4 + 3 + 3 + 3,1 + 2,8 + 3,2 + 2,5 + 2,5 + 3 + 3 + 3,2}{12} = \frac{35,5}{12} = 2,95 \text{ m/s}$$

An dieser Stelle ist abzusehen, dass der Raum Stellenbosch ungeeignet für den Einsatz eines Windrades ist. Unter der Voraussetzung, dass das Windrad erst bei Windgeschwindigkeiten von 2-3 Metern pro Sekunde Elektrizität generiert, wird die Ausbeute an dem gegebenen Standort sehr gering sein wird.

Um diese These zu bestätigen oder zu widerlegen wird ein Prototyp angefertigt. Zum Testen soll das Windrad nicht unnötig groß konstruiert werden aber dennoch verwertbare Messergebnisse erzielen können. Deshalb wird eine Rotorlänge von 0,7 Meter gewählt. Ein Vergleich der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit und der angesprochenen Rotorlänge ergibt, dass 2,5 Watt Energie in diesem Bereich zu erwarten ist. Diesen Wert gilt es nachzuweisen.

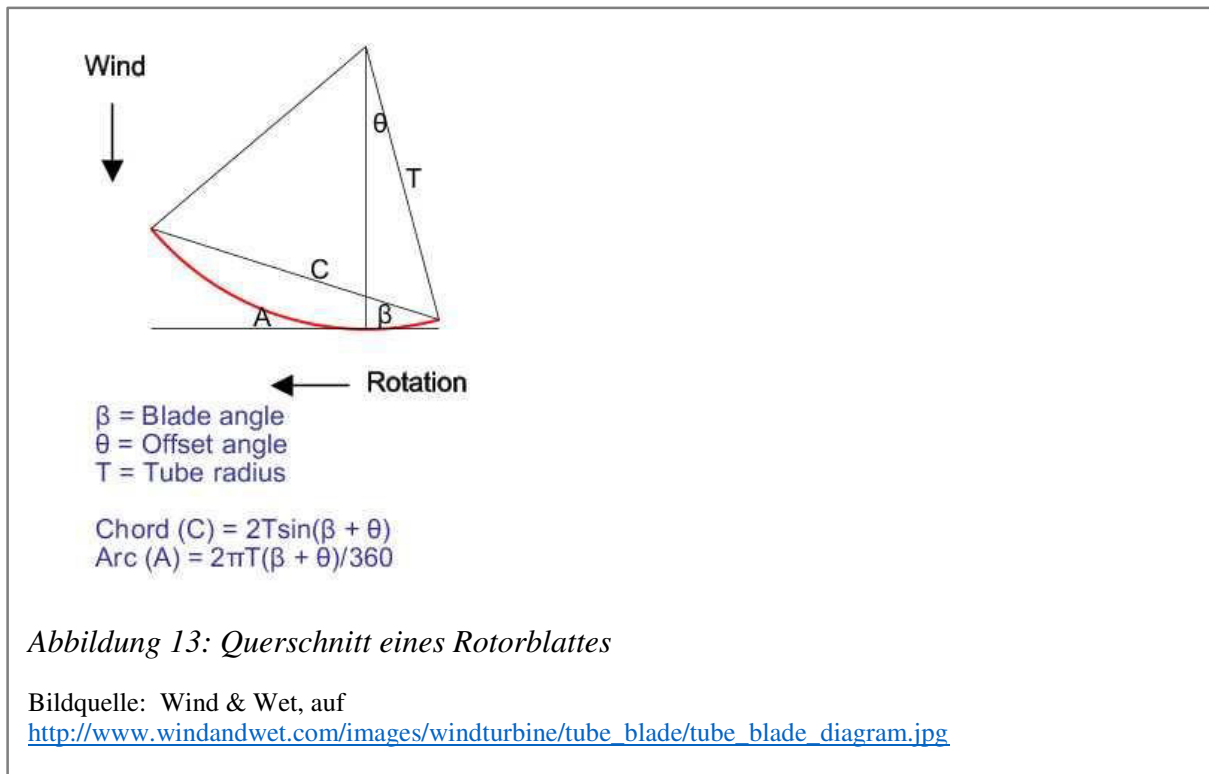
3.6. Konstruktion des Windrads

Ein selbstgebautes Windrad ähnelt in den Grundzügen den industriellen Windrädern. Da es sich in dieser Arbeit um eine wesentlich kleinere Version handelt, werden auch weniger Bauteile benötigt. Zum Beispiel werden die Rotorblätter in dieser Arbeit aus PVC-Rohren geschnitten und der Turm wird ebenfalls aus recycelten PVC-Rohren entstehen. Die Nabe an dem die Rotorblätter befestigt werden wurde speziell für den wiederverwendeten Generator entwickelt und per 3D Druck erstellt. Damit ist ein Direktantrieb über die Antriebswelle des Generators angestrebt.

Die Herstellung der Rotorblätter erfolgt in Handarbeit. Das Design der Rotorblätter stammt von einer Internetplattform⁷⁸ die mithilfe bekannter Parameter eine Schablone erstellt die auf ein PVC-Rohr geklebt werden kann um das Ausschneiden zu erleichtern.

Die einzutragenden Parameter setzen sich aus der gewünschten Rotorlänge, dem Durchmesser des PVC-Rohrs, der gewünschten Schnelllaufzahl, Anstell-, Versatzwinkel, Anzahl der Blätter und dem Koeffizienten des Auftriebs zusammen. Die folgende Abbildung zeigt einen Querschnitt eines Rotorblattes um den Aufbau eines Rotorblattes etwas verständlicher zu machen.

⁷⁸ Wind & Wet, Wind turbine pipe blade design, Designing the blades, http://www.windandwet.com/windturbine/tube_blade/design.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.



Die Rotorlänge von 0,7 Metern wurde bereits im vorherigen Kapitel festgelegt. Der Durchmesser des besorgten PVC-Rohrs beträgt 0,11 Meter und die Anzahl der Blätter beläuft sich auf 3. Auch wenn eine Schnelllaufzahl von 5-6⁷⁹ für ein Dreiblatt als Optimum angegeben ist, wurde hier eine Zahl von 4,5 gewählt. Für Auftriebskoeffizient, Anstell- und Versatzwinkel wurde der vorgegebene Wert übernommen. Die fertige Schablone ist dem Anhang zu entnehmen.

Der Ausdruck besteht aus 4 Teilen, welche noch zugeschnitten und zusammengeklebt werden müssen. Die rote gepunktete Linie verläuft senkrecht zur Achse des Blattes. Diese dient als Hilfslinie um die notwendigen Löcher für die Befestigung der Rotorblätter an der Nabe zu bohren. Die durchgezogene rote Linie ist der bogenförmige Bereich des Blattes. Die blaue Linie ist die Spannweite. Die Wurzel des Blattes ist zu groß, deshalb muss noch zusätzlich ein Bogen von der Wurzel des Blattes zur roten Linie gezogen. Das kann einfach nach Augenmaß geschehen. Zum Vergleich hier ein Bild mit per Hand eingezeichneter Linie.

⁷⁹ Vergleich Kapitel 2.3.5.4.1 Schnelllaufzahl.

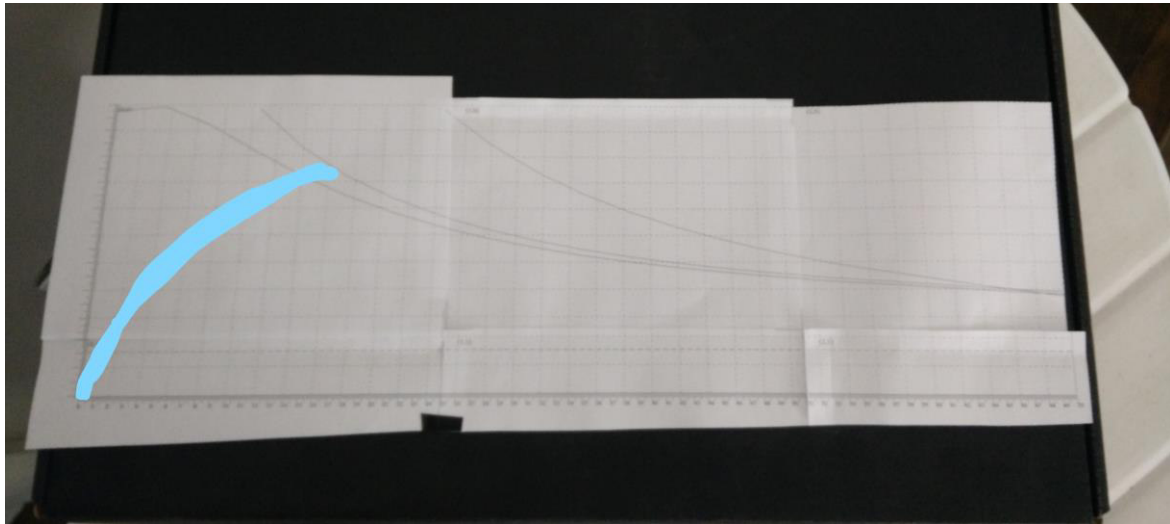


Abbildung 14: Eigene Rotorblattschablone

Bildquelle: eigenes Material

Nach dem Ausschneiden und Zusammensetzen ist es möglich die Schablone auf das PVC-Rohr zu kleben und mit einem Stift Markierungen auf dem PVC zu zeichnen. Die Schablone sollte für alle Blätter gleichermaßen verwendet werden. Es muss darauf geachtet werden, dass die Schablone immer mit derselben Seite aufgelegt wird, sodass alle Blätter in dieselbe Richtung rotieren können. Außerdem sollte kein bereits ausgeschnittenes Blatt als Schablone verwendet werden, da die darauffolgenden mit großer Wahrscheinlichkeit kleiner ausfallen werden, als das Ursprüngliche.⁸⁰

Die Löcher für die Schrauben, die später die Blätter an der Nabe halten, müssen natürlich an die Motornabe angepasst werden. Das kann je nach Nabe unterschiedlich sein, deshalb wird hier nicht speziell auf die Lochgröße der Schrauben oder die Abstände eingegangen.

Zu Letzt soll noch erwähnt werden, dass in dem Prototyp auf die Installation eines Windrichtungsgebers verzichtet wird, da dieser für die gewünschten Messergebnisse nicht erforderlich ist.

⁸⁰ Wind & Wet, Wind turbine pipe blade construction, http://www.windandwet.com/windturbine/tube_blade/construction.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

3.7. Nabe

Um die Rotorblätter an dem Generator befestigen zu können musste eine entsprechende Nabe konstruiert werden. In aller Regel werden diese aus festen Materialien (Metall) entworfen, weil dieses Bauteil enormen Fliehkräften ausgesetzt werden wird. Für den Prototyp erschien es allerdings am einfachsten das benötigte Bauteil drucken zu lassen. Aus diesem Grund wurde speziell für den eingesetzten Generator eine Nabe entwickelt. Für das Design wurde die Plattform von Tinkercad⁸¹ benutzt. Die entsprechenden Pläne wurden dazu auf Thingiverse⁸² veröffentlicht.

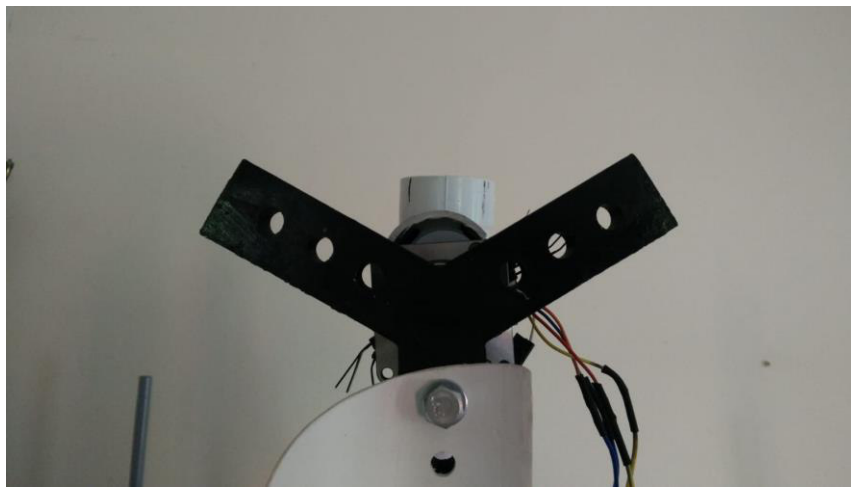


Abbildung 15: Motornabe am Generator mit einem Blatt

Bildquelle: eigenes Material

Der 3D Druck wurde von einem Studenten der Universität von Stellenbosch angefertigt. Da das Design, durch Messfehler, nicht richtig gepasst hat, musste mit der Hand der Zahnradaufsatz nachgebessert werden.

Mit der Formel zur Berechnung der zu erwartenden Umdrehungen pro Minute lässt sich folgendes Diagramm erstellen:

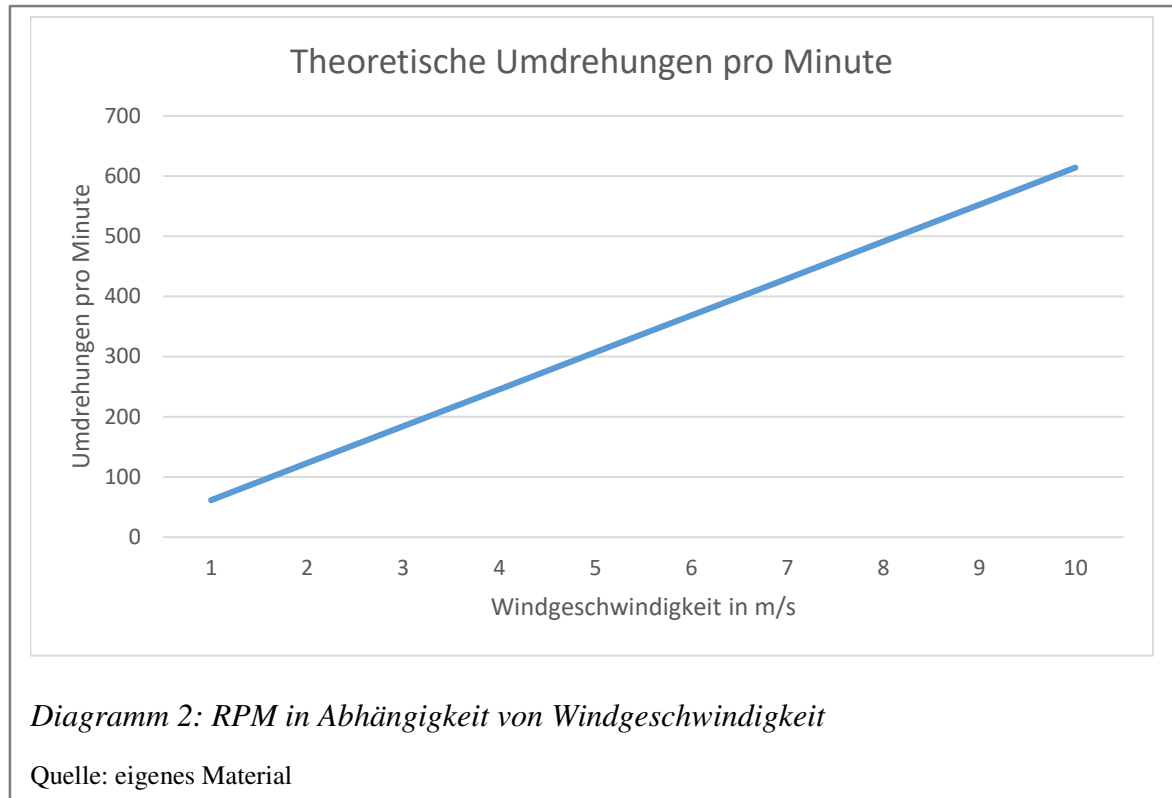
$$RPM^{83} = \frac{TSR * v * 60}{1,4 * \pi}$$

⁸¹ Autodesk Tinkercad, <https://www.tinkercad.com/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸² Lemmiwinks89, Thingiverse, Generator Hub for Sanyo Denki 103H7124-1145, <https://www.thingiverse.com/thing:3542534>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸³ Piggott, Hugh, A Wind Turbine Recipe Book – The Axial Flux Windmill Plans, S.11.

Es wurde ein Design mit einer Schnelllaufzahl von 4,5 gewählt und der Durchmesser der Rotorlänge beträgt 1,4 Meter. V entspricht der Windgeschwindigkeit. In dem Diagramm sind Werte von 1 bis 10 Metern pro Sekunde dargestellt.



Laut den Umweltdaten sollte eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 3 m/s in Stellenbosch auftreten. Die Umdrehungen können entweder anhand der Tabelle abgelesen werden oder man setzt diese nochmals in die vorgegebene Formel ein.

$$RPM = \frac{4,5 * 3 * 60}{1,4 * \pi} = 184,2$$

Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Rotoren 184 Umdrehungen pro Minute bei einer Windgeschwindigkeit von 3 Metern pro Sekunde erreichen werden.

3.8. Das konstruierte Windrad

Der Prototyp besteht aus nur 7 Teilen größeren Bauteilen. Darunter fallen 3 Rotorblätter, 1 Motornabe, 1 PVC-Verbindungsstück (Durchmesser 5cm), 1 PVC-Rohr (Länge 50cm, Durchmesser 5cm) und dem Generator. Hinzu kommen noch kleine Bauteile wie 6 Schrauben (8x30 Millimeter), 6 Muttern und 12 Unterlegscheiben. Das verwendete PVC-Verbindungsstück erlaubt noch eine Modifizierung, sodass wahlweise ein Windrichtungsgeber eingesteckt werden könnte. Zum Testen wird hier allerdings darauf verzichtet.

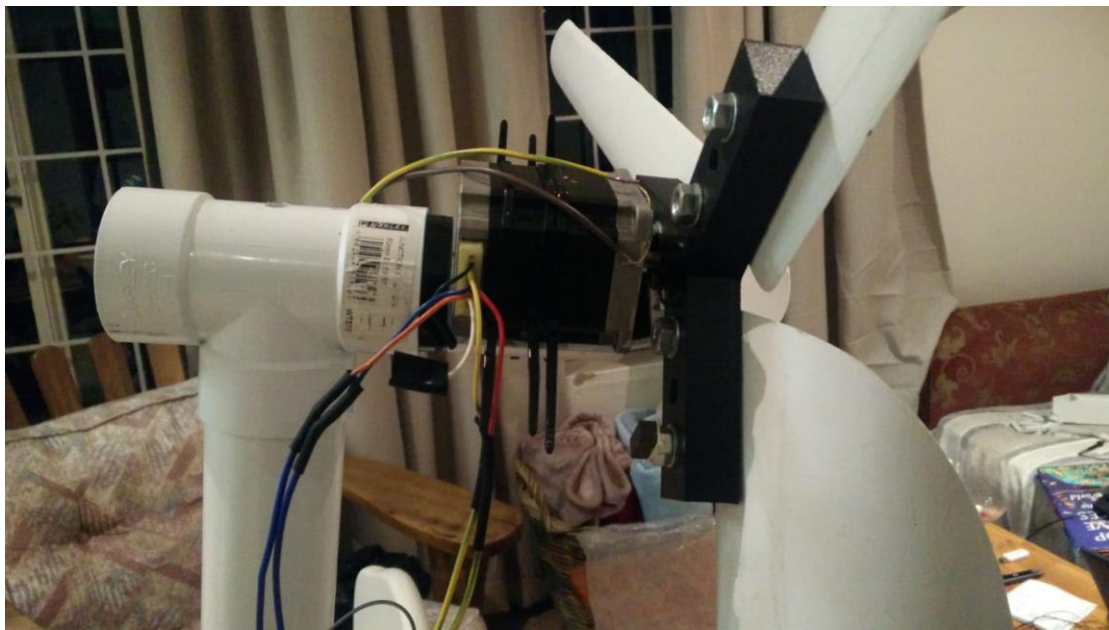


Abbildung 16: Seitenansicht Prototyp

Quelle: eigenes Material

4. Kopflose Installation Raspberry Pi

Im Folgenden wird eine Variante für eine kopflose Installation des Betriebssystems für den Raspberry Pi beschrieben. Zum Herunterladen des benötigten Betriebssystems wurde ein Laptop mit Windows 10 benutzt. Jede Konfiguration am Raspberry wird über Putty⁸⁴ mit dem Netzwerkprotokoll SSH⁸⁵ (Secure Shell) realisiert.

⁸⁴ Download PuTTY, <https://www.putty.org/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸⁵ Ubuntuusers, fragen ist menschlich!, <https://wiki.ubuntuusers.de/SSH/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Der Raspberry Pi benötigt ein Betriebssystem um damit interagieren zu können. Auf der offiziellen Internetplattform der Raspberry Pi Stiftung kann die neuste Version von „Noobs“ kostenlos heruntergeladen werden.⁸⁶ Noobs ist ein Installationsassistent der das Betriebssystem automatisch installieren kann. In dieser Arbeit wird die Version 3.0.0 von Noobs verwendet. Das benötigte Programm⁸⁷ zum Formatieren der digitalen Speicherkarte (SD-Karte) wird ebenfalls von der Stiftung in der Installationsanleitung⁸⁸ empfohlen.

Nach dem Herunterladen von Noobs, muss im nächsten Schritt die SD-Karte formatiert werden. Laut Anleitung ist es nötig das Laufwerk in „boot“ umzubenennen. Sobald die Formatierung abgeschlossen ist müssen die heruntergeladenen Dateien (Noobs) auf die SD-Karte extrahiert werden. Eine Navigation in den Ordner „os“ zeigt die verschiedenen Betriebssysteme, die installiert werden können. Da es sich hier um eine kopflose Installation handelt muss bereits jetzt ein zu installierendes Betriebssystem ausgesucht werden. Hier wurde sich für „Raspbian“ entschieden. Dass dieses Betriebssystem automatisch beim Starten installiert wird, müssen alle anderen Dateien, außer dem gewünschten Betriebssystem, in dem Ordner gelöscht werden.⁸⁹ Im Anschluss müssen 2 Dateien mit einem Editor⁹⁰ erstellt werden, die bei der kopflosen Installation unabdingbar sind:

1. wpa_supplicant.conf⁹¹
2. ssh (ohne Endung)

Die erste Datei erlaubt die Drahtlosverbindung zum Router. Im Anhang findet sich die der Quellcode der in die Datei eingetragen werden muss. Diese muss noch an die eigenen Netzwerkeinstellungen angepasst werden. Die zweite Datei muss ohne eine Dateiendung erstellt werden. Damit wird die Verbindungsmöglichkeit zum Raspberry aktiviert, die normalerweise erst nach der Installation angeschaltet werden kann.⁹² Beide Dateien müssen in der „boot“ Partition der SD-Karte verschoben werden. Danach kann das Speichermedium aus

⁸⁶ Raspberry, Noobs, <https://www.raspberrypi.org/downloads/noobs/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸⁷ SD Association, SD Memory Card Formatter for Windows Download, https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/eula_windows/index.html, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸⁸ Setting up your Raspberry Pi, <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/raspberry-pi-setting-up/3>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁸⁹ Github, How to Automatically Install an OS, <https://github.com/raspberrypi/noobs/blob/master/README.md#advanced-usage-for-experts-and-teachers>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁹⁰ Windows 10 Editor oder vergleichbares Programm zum Erstellen von Textdateien.

⁹¹ Siehe Anhang wpa_supplicant.conf.

⁹² Mackenzie, James, Headless Raspberry Pi Setup, <https://hackernoon.com/raspberry-pi-headless-install-462ccabd75d0>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

dem PC entfernt und in den Raspberry gesteckt werden. Beim ersten Starten installiert sich Raspbian automatisch und nach erfolgreicher Installation wird sich der Raspberry direkt mit dem Netzwerk verbinden.

Um die Internet Protokoll (IP) Adresse des Raspberry Pis herauszufinden bietet es sich an im Router nachzusehen. Falls dies nicht möglich ist, kann in der Kommandozeile der Befehl *ping raspberrypi.local* eingegeben werden.⁹³ Nachdem die IP-Adresse herausgefunden wurde ist eine Verbindung mit einem Programm wie zum Beispiel Putty möglich. Die Zugangsdaten für das einmalige Anmelden lauten:

Username: pi // Passwort: raspberry

Der erste Schritt nach erfolgreicher Anmeldung sollte eine Softwareaktualisierung des Systems sein. Dazu einfach in der Kommandozeile *sudo apt-get update* und anschließend *sudo apt-get dist-upgrade* eingeben.⁹⁴

Danach bietet es sich an eine Änderung des Passworts durchführen. Im Terminal muss dazu *sudo raspi-config* eingegeben werden.⁹⁵ Hier können gleich mehrere Einstellungen vorgenommen werden, wie zum Beispiel das vergeben einer statischen IP-Adresse, eine Sprachänderung oder eine Erweiterung des Dateisystem auf die gesamte Speicherkarte. In dieser Konfigurationsoberfläche kann außerdem die Kommunikation des I²C Kanals aktiviert werden, die für die Verwendung des INA219 nötig ist. Der Raspberry ist nun betriebsbereit.

4.1. Schaltplan - Raspberry und INA219

Das Modul INA219 hat die Aufgabe die Energie zu messen, die der Generator produziert. Dazu muss das Modul mit dem Raspberry verbunden werden. Es folgt eine Anleitung wie das Modul mit dem Raspberry und dem Generator anzuschließen ist.

Als erstes werden die Verbindungen von den Brückengleichrichtern an den INA219 erklärt. Der positive Ausgang des Brückengleichrichters muss in den *Vin+* Eingang des INA219. Für den prototypischen Aufbau wurde als Last ein beliebiger Widerstand gewählt. Es kann hier genauso gut eine Lampe verwendet werden. Der gewählte Widerstand wird mit einem Ende in

⁹³ Raspberry, IP Address, <https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/ip-address.md>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁹⁴ Elektronik Kompendium, Raspberry Pi: Erste Schritte bei der Konfiguration, <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/raspberry-pi/1906291.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

⁹⁵ Elektronik Kompendium, Raspberry Pi: Erste Schritte bei der Konfiguration, <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/raspberry-pi/1906291.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

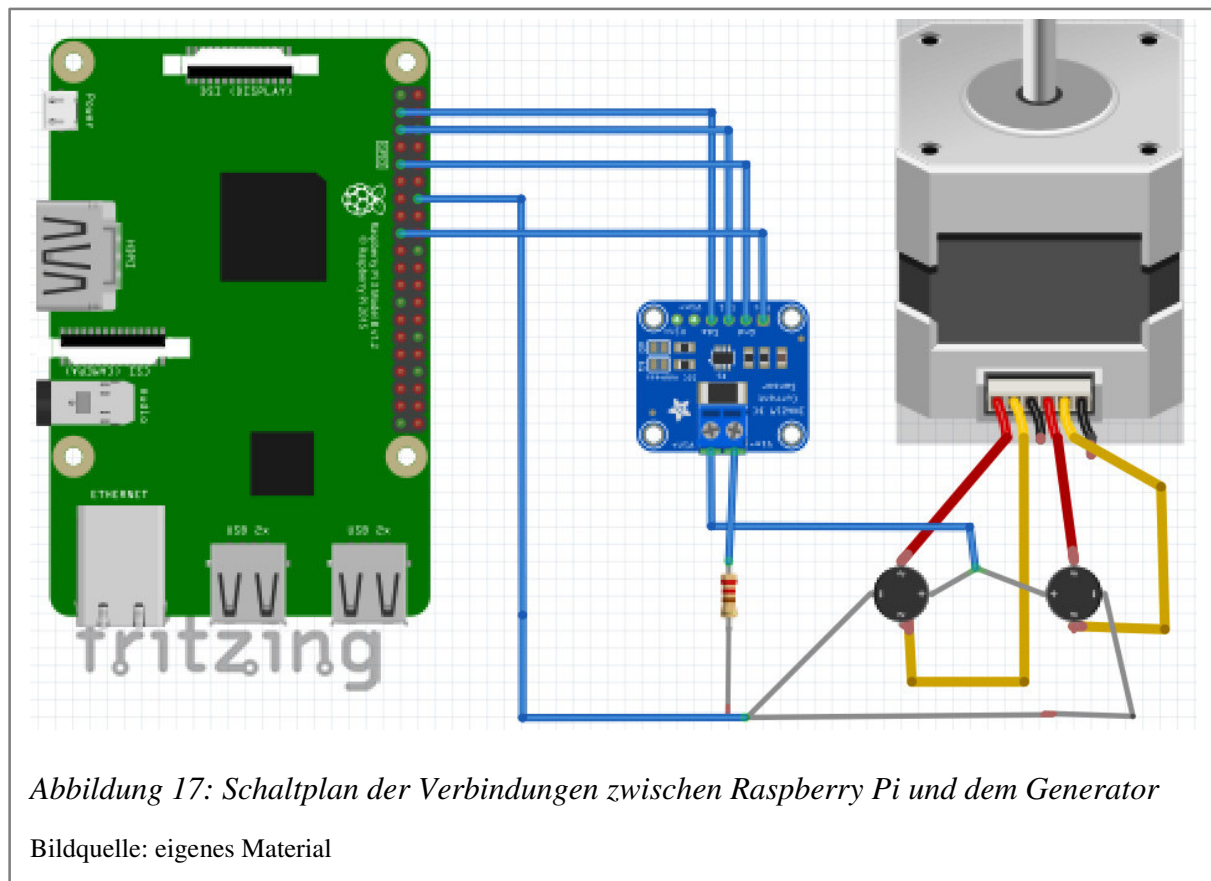
den *Vin*- Eingang gesteckt und das freie Ende des Widerstands wird mit dem negativen Ausgang des Brückengleichrichters verbunden. Diese negative Leitung muss außerdem auf eine Erdung der Stiftleiste des Raspberry Pis gesteckt werden. Die gemeinsame Erdung der Komponenten ist wichtig für die richtige Funktionsweise des INA219.⁹⁶

Die Verbindungen zum Raspberry lauten wie folgt:

Vcc -> Pin 17, Gnd -> Pin 9, Scl -> Pin 5, Sda -> Pin 3

Dabei ist zu beachten, dass hier von der physikalischen Nummerierung der Pins gesprochen wird und nicht von der GPIO-Nummerierung.

Die Abbildung zeigt das Verbindungsschema für ein besseres Verständnis.



Damit ist die Verkabelung der Komponenten abgeschlossen. Mit dem Befehl `sudo i2cdetect -y 1` kann überprüft werden ob das Modul vom Raspberry erkannt wird. Die Ausgabe dieser

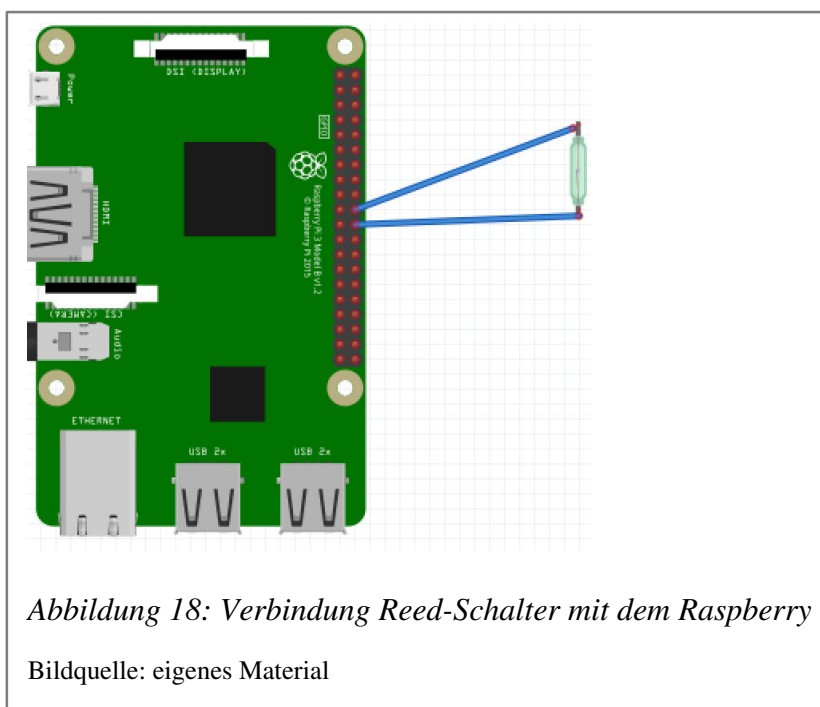
⁹⁶ Rototron 2004, Raspberry Pi INA219 Tutorial, <https://www.rototron.info/raspberry-pi-ina219-tutorial/>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

Eingabe ist eine Tabelle, welche die standardmäßige Hexadezimal-Adresse des INA219 anzeigt.⁹⁷

Laut der Anleitung⁹⁸, die in dieser Arbeit verfolgt wurde, ist die Python Bibliothek von ChrisB2⁹⁹ die am einfachsten zum bedienende. Die Bibliothek ist angeblich bereits standardmäßig auf den neueren Versionen der Betriebssysteme bereitgestellt, es sollte trotzdem eine Aktualisierung durchgeführt werden. Dazu den Befehl `sudo pip install git+git://github.com/chrisb2/pi_ina219.git` in der Kommandozeile eingeben. Der verwendete Quellcode zur Spannungsmessung kann dem Anhang entnommen werden.

4.2. Schaltplan - Raspberry und Reed-Schalter

Mit der Programmiersprache Python können die Ein- und Ausgabe Pins des Raspberry Pis nun angesprochen werden. Im weiteren Verlauf wird das Programm zur Berechnung der Umdrehungen und der daraus resultierenden Windgeschwindigkeit erklärt. Vorher noch ein eine Abbildung des Verbindungsschemas von dem Reed-Schalter mit dem Raspberry Pi.



⁹⁷ Rototron 2004, Raspberry Pi INA219 Tutorial, <https://www.rototron.info/raspberry-pi-ina219-tutorial/>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

⁹⁸ Rototron 2004, Raspberry Pi INA219 Tutorial, <https://www.rototron.info/raspberry-pi-ina219-tutorial/>, zuletzt eingesehen 08.04.2019.

⁹⁹ Github, chrisb2 / pi_ina219, https://github.com/chrisb2/pi_ina219, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Die Abbildung zeigt eine unkomplizierte Verbindung des Schalters mit dem Raspberry. Prinzipiell kann jeder Stift verwendet werden der 3,3 Volt liefert. Gleiches gilt für die Auswahl der Masse. In dieser Arbeit wurden Stift 20 und 22 gewählt.

Das angefertigte Python-Programm kann dem Anhang entnommen werden. Es beinhaltet eine Kombination aus der Strommessung mit dem INA219 und der Geschwindigkeitsmessung mit dem Reed-Schalter. Hier wird in kurzer Form die Funktionsweise des Programms in Bezug auf die Geschwindigkeitsmessung erläutert.

Abgesehen von den importierten Bibliotheken, die für einige Funktionen wie „sleep()“ oder der Zahl π vorausgesetzt werden, müssen noch einige globale Variablen deklariert werden. Die zwei erwähnenswertesten Variablen sind „sensor“ (Reed-Schalter), dem der numerische Wert des angeschlossenen GPIO-Pins zugewiesen wird, und der „start_timer“, dem die aktuelle Systemzeit zugewiesen wird.

Die „main“ Funktion ruft als erstes die Funktion „init_GPIO()“ auf. In dieser wird der Modus festgelegt, wie die Pins angesprochen werden. In der angesprochenen Funktion wird der Pin des Sensors auf „up“ gestellt, weil dieser sonst keine Veränderung am Zustand wahrnehmen könnte.

Danach wird die Funktion „init_interrupt()“ aufgerufen, die für die Erkennung der Zustandsveränderung des angesprochenen Pins zuständig ist. Diese Funktion läuft parallel zu der „while“-Schleife und erkennt, wenn der Pin den Zustand verändert. Die „bouncetime“ in der Funktion gibt an, wieviel Millisekunden gewartet werden muss bevor ein weiteres Ereignis berücksichtigt werden soll. Die Intention dahinter ist die Vermeidung von doppelten Zählungen. Tritt eine Zustandsänderung auf wird mit einem „callback“ die Funktion „calculate_elapse“ aufgerufen. In dieser Funktion wird ein Zähler inkrementiert, der eine vollständigen Umdrehung repräsentiert. Auf die Variable „elapse“ wird die Zeit gespeichert, die für eine Umdrehung benötigt wurde. Dazu wird die gespeicherte Systemzeit von der aktuellen Zeit abgezogen. Das Ergebnis ist die Zeit, die für eine Umdrehung benötigt wurde. Dem „start_timer“ wird im Anschluss wieder die aktuelle Systemzeit zugewiesen, sodass bei der nächsten Umdrehung wieder die Zeit für eine Umdrehung berechnet werden kann. Die „while“-Schleife läuft unendlich, bis sie abgebrochen wird. In dieser wird die Funktion „calculate_speed(3)“ aufgerufen. Die Zahl 3 entspricht dabei dem Radius in Zentimetern, welche der angesprochenen Funktion als Berechnungsgrundlage übergeben wird. Hier muss der Abstand des Reed-Schalter zum Mittelpunkt eingetragen werden. Eine „if“-Abfrage in der

Funktion verhindert die Division mit 0. Insofern die Bedingung nicht 0 lautet, wird eine Berechnung der Umdrehung pro Minute durchgeführt. Gefolgt von einer Berechnung des Umfangs des Kreises mit dem übergebenen Wert. Der Umfang wird im Anschluss in Kilometer umgewandelt. Diese Umwandlung wird genutzt um die Geschwindigkeit in Kilometer pro Sekunde, Kilometer pro Stunde und Meter pro Sekunde angeben zu können.

Mit der allgemeinen Formel¹⁰⁰

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Entfernung}}{\text{Zeit}}$$

lässt sich die Geschwindigkeit eines Objekts berechnen. Die zurückgelegte Entfernung ist in diesem Fall der Umfang (circ_cm) der kreisrunden Fläche geteilt durch die benötigte Zeitspanne (elapsed). Der berechnete Wert von Metern pro Sekunde wird am Ende zurückgegeben. Es erscheint eine Ausgabe auf dem Bildschirm mit den Umdrehungen pro Minute, Metern pro Sekunde und der Anzahl der Umdrehungen. Diese Werte werden zudem in eine Textdatei (messdaten.txt) angehängt. Bevor die Schleife erneut durchlaufen wird, gibt es eine kurze Pause von einer Millisekunde.

Dieses Python Programm basiert in den Grundzügen auf einen Lösungsansatz der auf Stackoverflow¹⁰¹ gefunden wurde. Es wurde an die eigenen Bedürfnisse angepasst.

¹⁰⁰ Build your own weather station, <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/build-your-own-weather-station/6>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

¹⁰¹ Stack overflow, How to use Python to measure speed of bike like a digital speedometer, using a Raspberry Pi?, <https://stackoverflow.com/questions/40738776/how-to-use-python-to-measure-speed-of-bike-like-a-digital-speedometer-using-a-r>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019

5. Ergebnisse

Wie schon die grundlegende Forschung gezeigt hat, ist die Wahl des Standortes für ein Windrad von besonders großer Bedeutung. Ohne einen stetigen Wind von mindestens 5 Metern pro Sekunde ist es kaum möglich genug Elektrizität zum Wiederaufladen der Batterie zu ernten. Stellenbosch ist mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 3 Metern pro Sekunde somit als Standort für ein Windrad in der entworfenen Größe ungeeignet.

Daher produzierte das erstellte Programm zur Überprüfung der Windgeschwindigkeit und der Messung der generierten Elektrizität kaum verwertbare Ergebnisse. Die dokumentierten Ergebnisse beruhen fast ausschließlich auf manuellem Drehen des Rotors, da in der Testphase kaum Wind zu verzeichnen war.

Abgesehen von der problematischen Windsituation waren die eingesetzten Materialien nicht optimal. Die Verwendung von recycelten Gegenständen, wie dem ausgeschlachteten Generator, limitierte die Auswahlmöglichkeiten. Ein anderer, effizienterer Generator, der aber mit (unter Umständen hohen) Kosten verbunden gewesen wäre, hätte die mechanische Energie des Rotors besser in Elektrizität umwandeln können. Zusätzlich war der für die Berechnung der Geschwindigkeit eingesetzte Reed-Schalter von äußerst schlechter Qualität. Bereits kleinste Vibrationen haben bei der Messung doppelte oder dreifache Signale registrieren lassen. Dies führte zu einer Verfälschung der dokumentierten Umdrehungszahlen und Geschwindigkeitswerten. Letztendlich gingen 2 Reed-Schalter, bedingt durch ihre schlechte Qualität, zu Bruch, sodass weitere Messungen in dem Feld unmöglich waren.

Dennoch kann das Projekt auch einige positive Teilerkenntnisse aufweisen. Als noch keine Messungen stattgefunden haben, wurde das Windrad testweise in mäßigen Wind gehalten. Dabei hat der Rotor eine Geschwindigkeit aufgenommen, die anzunehmen lies, dass eine Batterie damit phasenweise aufgeladen werden könnte.

Unter Beachtung des angesammelten theoretischen Wissens lässt sich zusammenfassend festhalten, dass es prinzipiell möglich ist, mittels einer selbst gebauten Windkraftanlage einen Einplatinencomputer zu betreiben. Dies hängt jedoch stark von den Umständen des Einzelfalls, wie den eingesetzten Mitteln und des Standorts, ab.

6. Zusammenfassende Bewertung

Die obenstehenden Ergebnisse zeigen sowohl positive als auch negative Resultate.

Die negativen Resultate sind vor allem auf den Standort, den Generator und den Reed-Schalter zurückzuführen.

Wie bereits mehrfach angeführt, ist der richtige Standort essenziell für den Einsatz einer Windkraftanlage. Hierbei gilt es, die Umgebung mit Rücksicht auf den auftretenden Wind genau zu beobachten. In der einschlägigen Fachliteratur¹⁰² wird empfohlen, vor dem Bau einer solchen Anlage seine Umgebung für mindestens ein Jahr zu überwachen. Nur so kann sichergestellt werden, ob an den geplanten Standort eine ausreichende und stetige Windgeschwindigkeit vorhanden ist. Sollte dies nicht der Fall sein, ist von dem Vorhaben abzuraten.

Ein erforschter Generator, der für den Einsatz von Windkraftanlagen konzipiert wurde, hätte bei ausreichender Windgeschwindigkeit die erforderliche Energie generieren können. Jedoch müsste bei einem anderen Generator die komplette Konstruktion, bis hin zum Turm, neugestaltet werden. Hierbei gilt auch zu berücksichtigen, dass die vorliegende Konstruktion lediglich ein Prototyp ist. Möchte man eine Anlage ernsthaft betreiben, so sollte man den Generator selbst bauen oder ein Modell kaufen, das den Anforderungen gerecht wird.

Zur Gewinnung von aussagekräftigen Ergebnissen bezüglich der Umdrehungen des Rotors und dessen Geschwindigkeit, ist ein Tachometer dem Reed-Schalter vorzuziehen. Mit ersterem sind genauere Ergebnisse zu erzielen.

Positiv ist die Erkenntnis, dass es trotzdem gelang, streckenweise einen Stromfluss zu messen auch wenn dieser nicht zum Aufladen einer Batterie gelangt hat. Das entwickelte Programm zählt die Umdrehungen des Rotors, berechnet hiermit die Windgeschwindigkeit und auch die Leistungsmessung mit dem INA219 konnte nachgewiesen werden. Auch das Design des Windrads ist als Erfolg zu werten, da es mit einfachen Materialien hergestellt werden konnte und seinen Zweck als Prototyp erfüllte.

Für einen Nachbau, der tatsächlich dauerhaft dazu genutzt werden soll, einen Einplatinencomputer zu betreiben, ist zu beachten, dass eine alternative Energieversorgung in Form von einer Batterie in dem System einbezogen werden muss. Ansonsten würde sich der

¹⁰² Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.430.

Computer bei jeder Windstille abschalten. Diese Konfiguration zieht ebenso den Einsatz eines Ladereglers mit sich. Ohne diesen ist das Betreiben des Systems zu fehleranfällig. Bei einem Heim-System müssen auch weitere Faktoren, wie beispielsweise die Höhe des Turms, mit einbezogen werden. Bei einer empfohlenen Höhe von mindestens 20 Metern muss vor dem Bau eine Baugenehmigung¹⁰³ eingeholt werden. Dies könnte aufgrund verschiedener Faktoren, gerade in einem dicht besiedelten Wohngebiet, sehr schwer zu erlangen sein.

Für den Nachbau eines Windrads als Mittel zur Energiegewinnung ist neben handwerklichem Geschick vor allem die Qualität der Materialien ausschlaggebend. Das Windrad ist starken Wetterbedingungen ausgesetzt und bei minderer Beschaffenheit würden diese innerhalb kurzer Zeit ermüden und Wartungen erfordern. Selbst unter Einsatz der qualitativ hochwertigsten Mittel erfordern Windräder aufgrund der Vielzahl an mechanischen Komponenten mehr Wartung im Vergleich zu anderen Erzeugern von erneuerbaren Energien, beispielsweise Solaranlagen.¹⁰⁴ Die Energiegewinnung mittels Wind sollte gut überlegt sein, da selbst unter Beachtung des richtigen Standorts, der richtigen Materialien und der richtigen Größe, die wichtigste Komponente, der Wind, stets ein unstetiger Faktor bleiben wird.

¹⁰³ Manwell, James .F. / McGowan, Jon.G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application, S. 423.

¹⁰⁴ Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, S.263.

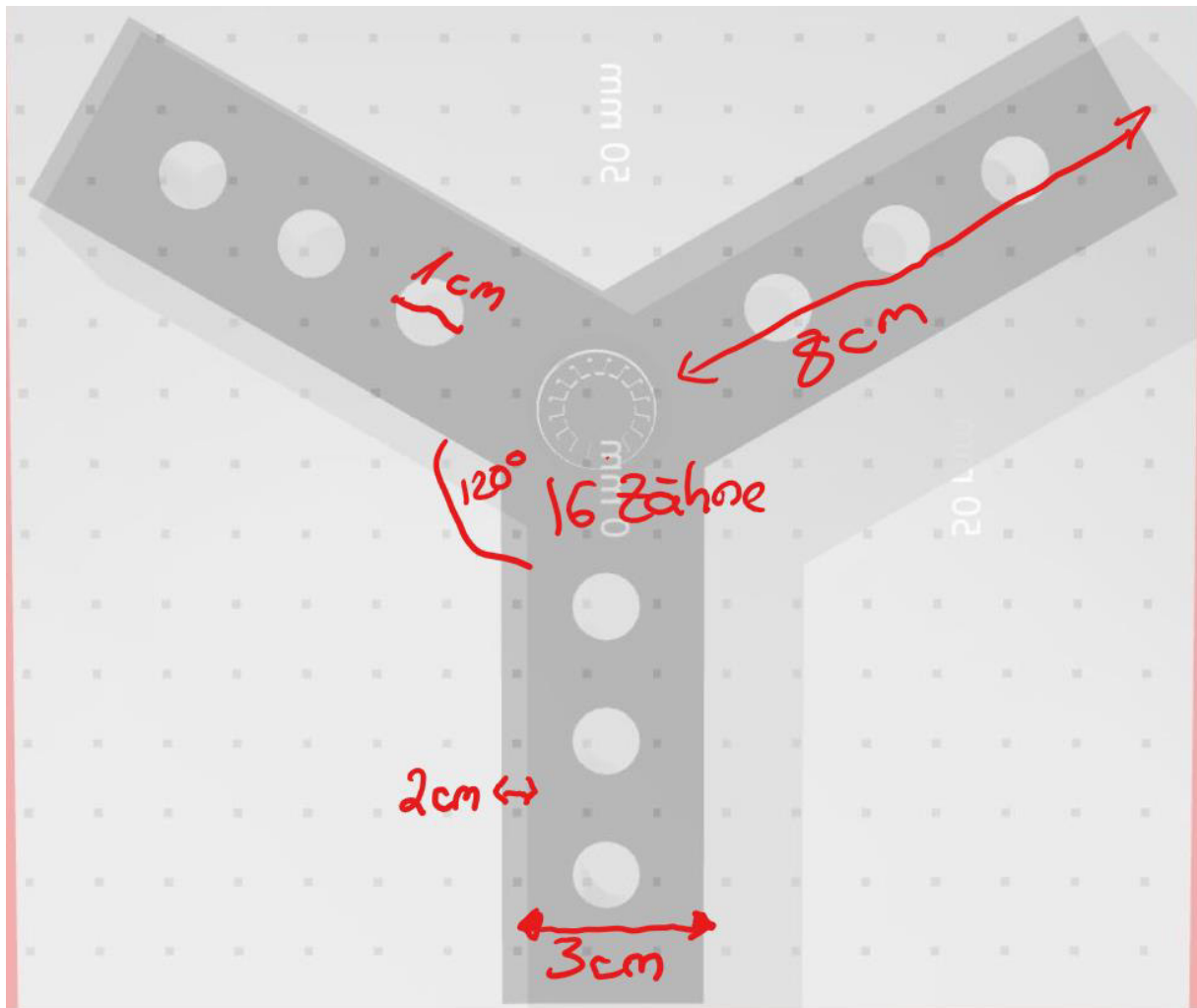
7. Ausblick

Der Einsatz von kleinen Windkraftanlagen für die Energiegewinnung ist gerade in Entwicklungsländern interessant. Es gibt noch viele Orte, die keinen Anschluss an ein Stromnetz haben. In solchen Gebieten könnte diese Art der Energieversorgung wirklich eine alternative darstellen, da der Bau mit wenigen Mitteln zu bewerkstelligen ist. Lediglich die Voraussetzungen in Form von ausreichendem Wind müssen gegeben sein.

Allerdings hat diese Bachelorthesis gezeigt, dass der Einsatz dieser Systeme nicht immer sinnvoll ist. Gerade weil der Wind eine un stetige Ressource ist kann davon ausgegangen werden, dass die Energiegewinnung an manchen Tagen die Batteriekapazitäten deutlich übersteigt. Daraus resultiert eine erhebliche Menge von Energie, die nicht genutzt wird. Andere Tage erwirtschaften eventuell nur so wenig Energie, dass eine Nutzung nicht gewährleistet sein kann. Vor allem an solchen Tagen kann sich der Betrieb eines Einplatinencomputers trotz des geringen Energiebedarfs als schwierig erweisen. Eine mögliche Lösung für dieses Problem besteht in der Kombination von Wind- und Solarenergie. Zudem könnte ein ausgeklügeltes Energieversorgungssystem den Einplatinencomputer mit hoher Wahrscheinlichkeit dauerhaft betreiben. Im Idealfall bestünde ein System, welches ausschließlich von erneuerbaren Energien betrieben wird aus 2 Batterien, von der eine das System betreibt, während die andere aufgeladen werden kann.

8. Anhang

8.1. Motornabe mit Maßeinheiten¹⁰⁵



¹⁰⁵ Siehe stl Datei auf Thingiverse für genaue Daten

8.2. Rotorblatt aus PVC-Rohr, 07 Meter



8.3. wpa_supplicant.conf

```
1. country=ZA #ISO/IEC alpha 2 Ländzuordnung, in dem das Gerät betrieben wird
2. update_config=1 #Aktualisierungsrechte für das wpa_cli Interface
3. ctrl_interface=/var/run/wpa_supplicant
4.
5. network={
6.   ssid="NAME DES NETZWERKS"
7.   psk="PASSWORT DES NETZWERKS"
8.   proto=RSN
9.   key_mgmt=WPA-PSK #Verschlüsselungsart des Netzwerks
10. pairwise=CCMP
11. auth_alg=OPEN
12. }
```

8.4. ina_reed.py

```
1. #!/usr/bin/python3
2. import RPi.GPIO as GPIO
3. from ina219 import INA219, DeviceRangeError
4. import time, math
5. from time import sleep
6.
7. #INA Variablen
8. SHUNT_OHMS = 0.1 #shunt widerstand
9. MAX_EXPECTED_AMPS = 2.1 #erwartete maximale stromstaerke
10. ina = INA219(SHUNT_OHMS, MAX_EXPECTED_AMPS)
11. #ina.configure(ina.RANGE_16V) #16-32V Messweite
12.
13. #Reed-Schalter Variablen
14. dist_meas = 0.00
15. km_per_hour = 0
16. rpm = 0 #umdrehungen pro minute
17. elapse = 0 #verstrichene zeit in sekunden fuer 1 umdrehung
18. sensor = 40 #pin auf dem der reed angeschlossen ist
19. pulse = 0 #unterbrechungszaehler
20. start_timer = time.time() #aktuelle zeit
21. meter_pro_sekunde = 0 #geschwindigkeit in m/s
22.
23. def init_GPIO(): # initialisierung der pins
24.     GPIO.setmode(GPIO.BOARD) # pin beschreibung, nicht gpio
25.     GPIO.setwarnings(False)
26.     GPIO.setup(sensor,GPIO.IN,GPIO.PUD_UP) #setze pin hoch
27.
28. def calculate_elapse(channel): # callback funktion
29.     global pulse, start_timer, elapse
30.     pulse+=1 # inkrementiere pulse wann immer eine unterbrechung stattfindet
31.
32.     elapse = time.time() - start_timer # zeit wie lang eine umdrehung gedauert
33.     start_timer = time.time() # start_timer = aktuelle systemzeit für die naechste berechnung
34.
35. def calculate_speed(r_cm):
36.     global pulse,elapse,rpm,dist_km,dist_meas,km_per_sec,km_per_hour,meter_pro_sekunde
37.     if elapse !=0: # wenn _nicht_ 0 dann berechne:
38.         rpm = 1/elapse * 60
39.         circ_cm = (2*math.pi)*r_cm # calculate wheel circumference in CM
40.         dist_km = circ_cm/100000 # convert cm to km
41.         km_per_sec = dist_km / elapse # Berechnung in KM/sek
42.         km_per_hour = km_per_sec * 3600 # Berechnung in KM/h
43.         meter_pro_sekunde = (km_per_hour * 1000) / 3600
44.         #return km_per_hour
45.         return meter_pro_sekunde
46.
47. def init_interrupt():
48.     GPIO.add_event_detect(sensor, GPIO.FALLING, callback = calculate_elapse, bouncetime = 500)
49.     #callback = aufruf der funktion parallel zum programmablauf,#
50.     #immer wenn ein ereignis registriert wird#
51.     #ereignis hier = wenn ein magnet den reed-schalter passiert#
52.     #bouncetime = die zeit in der ein zweiter druck ignoriert wird in milliseks#
53.
54. def read_ina219():
55.     try:
56.         f= open("messdaten.txt","a") # oeffne txt und haenge an
57.         f.write('Bus Voltage: {0:0.2f}V '.format(ina.voltage()))
58.         f.write('Bus Current: {0:0.2f}mA '.format(ina.current()))
59.         f.write('Power: {0:0.2f}mW '.format(ina.power()))
60.         f.write('Shunt Voltage: {0:0.2f}mV\n'.format(ina.shunt_voltage()))
61.         #f.close()
```



```

61.         except DeviceRangeError as e: # Stromstaerke ausserhalb der messbaren Werte
62.
63. if __name__ == '__main__':
64.     init_GPIO()
65.     init_interrupt()
66.     while True:
67.         calculate_speed(3) # funktionsaufruf mit radius in cm als parameter zum uebergeben
68.         print('rpm:{0:.0f}-RPM Meter pro Sekunde:{1:0.2f}-m/s pulse:{2}'.format(rpm,meter_pro_sekunde,pulse))
69.         f= open("messdaten.txt","a+")
70.         f.write('rpm:{0:.0f}-RPM meter pro sekunde:{1:0.2f}-m/s pulse:{2}\n'.format(rpm,meter_pro_sekunde,pulse))
71.         #f.close()
72.         read_ina219()
73.         sleep(0.1)

```

8.5. ina.py

```
1. from ina219 import INA219, DeviceRangeError
2. from time import sleep
3.
4. SHUNT_OHMS = 0.1
5. MAX_EXPECTED_AMPS = 2.0
6. ina = INA219(SHUNT_OHMS, MAX_EXPECTED_AMPS)
7. ina.configure(ina.RANGE_16V)
8.
9. def read_ina219():
10.     try:
11.         print('Bus Voltage: {0:0.2f}V'.format(ina.voltage()))
12.         print('Bus Current: {0:0.2f}mA'.format(ina.current()))
13.         print('Power: {0:0.2f}mW'.format(ina.power()))
14.         print('Shunt Voltage: {0:0.2f}mV\n'.format(ina.shunt_voltage()))
15.     except DeviceRangeError as e:
16.         # Current out of device range with specified shunt resistor
17.         print(e)
18. while 1:
19.     read_ina219()
20.     sleep(1)
```

8.6. INA219 Messungen

Bus Voltage: 0.31V Bus Current: 34.51mA Power: 29.45mW
Bus Voltage: 1.29V Bus Current: 106.98mA Power: 125.49mW
Bus Voltage: 1.41V Bus Current: 74.01mA Power: 79.39mW
Bus Voltage: 0.98V Bus Current: 90.66mA Power: 75.55mW
Bus Voltage: 0.92V Bus Current: 86.50mA Power: 98.60mW
Bus Voltage: 1.06V Bus Current: 72.67mA Power: 43.54mW
Bus Voltage: 0.84V Bus Current: 52.69mA Power: 85.79mW
Bus Voltage: 1.00V Bus Current: 42.06mA Power: 58.90mW
Bus Voltage: 0.63V Bus Current: 40.46mA Power: 56.34mW
Bus Voltage: 0.88V Bus Current: 46.10mA Power: 20.49mW
Bus Voltage: 0.86V Bus Current: 42.51mA Power: 25.61mW
Bus Voltage: 0.48V Bus Current: 50.39mA Power: 37.13mW
Bus Voltage: 0.62V Bus Current: 42.90mA Power: 19.21mW
Bus Voltage: 0.45V Bus Current: 24.71mA Power: 20.49mW
Bus Voltage: 0.27V Bus Current: 29.77mA Power: 23.05mW
Bus Voltage: 0.40V Bus Current: 15.11mA Power: 8.96mW
Bus Voltage: 0.40V Bus Current: 29.96mA Power: 12.80mW
Bus Voltage: 0.32V Bus Current: 29.71mA Power: 12.80mW
Bus Voltage: 0.26V Bus Current: 11.52mA Power: 8.96mW
Bus Voltage: 0.22V Bus Current: 21.58mA Power: 6.40mW
Bus Voltage: 0.16V Bus Current: 16.71mA Power: 6.40mW
Bus Voltage: 0.25V Bus Current: 8.32mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.11V Bus Current: 3.20mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.18V Bus Current: 4.29mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.04V Bus Current: 8.90mA Power: 2.56mW
Bus Voltage: 0.12V Bus Current: 6.47mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.05V Bus Current: 6.08mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.02V Bus Current: 0.38mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.00V Bus Current: 1.60mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.04V Bus Current: 1.41mA Power: 0.00mW
Bus Voltage: 0.00V Bus Current: 1.09mA Power: 0.00mW

8.7. Reed Messungen

rpm:0-RPM meter pro sekunde:0.00-m/s pulse:0
rpm:21-RPM meter pro sekunde:0.07-m/s pulse:1
rpm:12-RPM meter pro sekunde:0.04-m/s pulse:2
rpm:40-RPM meter pro sekunde:0.13-m/s pulse:3
rpm:32-RPM meter pro sekunde:0.10-m/s pulse:4
rpm:12-RPM meter pro sekunde:0.04-m/s pulse:5
rpm:37-RPM meter pro sekunde:0.12-m/s pulse:6
rpm:28-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:7
rpm:43-RPM meter pro sekunde:0.14-m/s pulse:8
rpm:88-RPM meter pro sekunde:0.28-m/s pulse:9
rpm:9-RPM meter pro sekunde:0.03-m/s pulse:10
rpm:49-RPM meter pro sekunde:0.15-m/s pulse:11
rpm:27-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:12
rpm:100-RPM meter pro sekunde:0.31-m/s pulse:13
rpm:18-RPM meter pro sekunde:0.06-m/s pulse:14
rpm:49-RPM meter pro sekunde:0.16-m/s pulse:15
rpm:24-RPM meter pro sekunde:0.07-m/s pulse:16
rpm:79-RPM meter pro sekunde:0.25-m/s pulse:17
rpm:3-RPM meter pro sekunde:0.01-m/s pulse:18
rpm:40-RPM meter pro sekunde:0.12-m/s pulse:19
rpm:24-RPM meter pro sekunde:0.07-m/s pulse:20
rpm:27-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:21
rpm:29-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:22
rpm:27-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:23
rpm:45-RPM meter pro sekunde:0.14-m/s pulse:24
rpm:27-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:25
rpm:53-RPM meter pro sekunde:0.17-m/s pulse:26
rpm:32-RPM meter pro sekunde:0.10-m/s pulse:27
rpm:50-RPM meter pro sekunde:0.16-m/s pulse:28
rpm:28-RPM meter pro sekunde:0.09-m/s pulse:29
rpm:42-RPM meter pro sekunde:0.13-m/s pulse:30

E. Literaturverzeichnis

FAZ, Bundestag billigt Energiewende : Gabriel: „Das ist unser Ausstieg“, 30.06.2011, <https://www.faz.net/aktuell/politik/energiepolitik/bundestag-billigt-energiewende-gabriel-das-ist-unser-ausstieg-16606.html>, zugegriffen am 31.03.2019.

Hau, Erich, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics – Second Edition, 2006, Berlin.

Manwell, James F. / McGowan, Jon G. / Rogers, Anthony L., Wind Energy Explained – Theory, Design and Application – Second Edition, 2009, Great Britain.

Piggott, Hugh, A Wind Turbine Recipe Book – The Axial Flux Windmill Plans” – Metric Edition, 2009.

Shea, Kevin / Howard, Clark Brian, Build Your Own Small Wind Power System, 2012, New York.

Shovic, John, “Project Curacao”, The MagPi Issue 18, November 2013.

Shovic, Johan, „Blue Curacao“, The MagPi, Issue 5, März 2014.

Woofenden, Ian, Wind Power For Dummies, 2009, Indiana.

F. Quellenverzeichnis

Adafruit, INA219 High Side DC Current Sensor Breakout – 26V 3.2A max,
<https://www.adafruit.com/product/904>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

ALLDATASHEET.COM, Electronic Components Datasheet Search,
<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/33902/WTE/2W10.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Alternative Energy Tutorials, Home of Alternative and Renewable Energy Tutorials,
<http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/wind-turbine-generator.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Alternative Energy Tutorials, Induction Generator, <http://www.alternative-energy-tutorials.com/wind-energy/induction-generator.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019

Autodesk Tinkercad, <https://www.tinkercad.com/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Build your own weather station, <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/build-your-own-weather-station/6>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Bundesverband WindEnergie, Zahlen und Fakten, <https://www.wind-energie.de/themen/zahlen-und-fakten/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Download PuTTY, <https://www.putty.org/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Elektronik Kompendium, Raspberry Pi: Erste Schritte bei der Konfiguration <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/raspberry-pi/1906291.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Elektronik Praxis, Fachwissen für Elektronik Professionals,
<https://www.elektronikpraxis.vogel.de/raspberry-pi-alle-modelle-im-ueberblick-a-548795/>,
zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Energiemarie, Watt, Volt, Ampere – Stromeinheiten einfach erklärt,
<https://energiemarie.de/energiertipps/watt-volt-ampere>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

FAQs, What is a Raspberry, <https://www.raspberrypi.org/documentation/faqs/#introduction>,
zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Github, chrisb2 / pi_ina219, https://github.com/chrisb2/pi_ina219, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Github, How to Automatically Install an OS,
<https://github.com/raspberrypi/noobs/blob/master/README.md#advanced-usage-for-experts-and-teachers>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

HENRY'S BENCH, a place for the electronic hobbyist,
<http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-current-measurements/ina219-arduino-current-sensor-voltmeter-tutorial-quick-start/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

How I home-built an electricity producing Wind turbine,
http://www.mdpub.com/Wind_Turbine/, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

How I home-built an electricity producing Wind turbine,
http://www.mdpub.com/Wind_Turbine/index.html, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Kapazitätsrechner – Batteriekapazität ermitteln, <https://ladegeraet-vergleich.de/kapazitaetsrechner-batteriekapazitaet-berechnen/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

KlinikRobot.com, Work, don't play!, <http://klinikrobot.com/product/nema23-stepper-motor/sanyo-denki-103h7124-1145.html>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Lemmiwinks89, Thingiverse, Generator Hub for Sanyo Denki 103H7124-1145,
<https://www.thingiverse.com/thing:3542534>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Mackenzie, James, Headless Raspberry Pi Setup, <https://hackernoon.com/raspberry-pi-headless-install-462ccabd75d0>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Mathepower.com, Matheaufgaben einfach – online lösen – Kreise,
<https://www.mathepower.com/kreis.php>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Maurer Elektromaschinen GmbH, Wissenswertes Windkraft,
<https://www.maurelma.ch/windkraft.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Online batterien, Hoppecke verschlossene Bleibatterie ELA, <https://www.online-batterien.de/shop/Hoppecke-powercom-SB-6V-220-6V-220Ah-C10-Hoppecke-verschlossene-Bleibatterie-ELA>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Raspberry Pi Dramble, Drupal 8 on a cluster of Raspberry Pis, Power Consumption Benchmarks, <https://www.pidramble.com/wiki/benchmarks/power-consumption>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Raspberry, IP Address, <https://www.raspberrypi.org/documentation/remote-access/ip-address.md>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Raspberry, Noobs, <https://www.raspberrypi.org/downloads/noobs/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Raspberry, Power Supply,
<https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>,
zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/betz-limit/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website,
<http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/calculation-of-wind-power/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/electricity-with-stepper-motors/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Reuk.co.uk, The Renewable Energy Website, <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/stepper-motor-basics/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Rototron 2004, Raspberry Pi INA219 Tutorial, <https://www.rototron.info/raspberry-pi-ina219-tutorial/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Sauber in die Zukunft ! Energie-Visions.de, <http://energie-visions.de/lexikon-2/windenergieanlage-windrad/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

SD Association, SD Memory Card Formatter for Windows Download, https://www.sdcard.org/downloads/formatter_4/eula_windows/index.html, eingesehen am 08.04.2019.

Setting up your Raspberry Pi, <https://projects.raspberrypi.org/en/projects/raspberry-pi-setting-up/3>, eingesehen am 08.04.2019.

Stack overflow, How to use Python to measure speed of bike like a digital speedometer, using a Raspberry Pi?, <https://stackoverflow.com/questions/40738776/how-to-use-python-to-measure-speed-of-bike-like-a-digital-speedometer-using-a-r>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Stadtwerke Emmendingen, Wieviel ist eine Kilowattstunde?, <https://swe-emmendingen.de/2011/08/10/wieviel-ist-eine-kilowattstunde/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

TheGoofy, instructables, 600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless DC Electric Motor, <https://www.instructables.com/id/600-Watt-3d-printed-Halbach-Array-Brushless-DC-Ele/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Trojanfans, Altitude & Density Chart, <https://www.trojanfans.com/altidens.htm>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Ubuntuusers, fragen ist menschlich!, <https://wiki.ubuntuusers.de/SSH/>, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Wind & Wet, Wind turbine pipe blade construction, http://www.windandwet.com/windturbine/tube_blade/construction.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Wind & Wet, Wind turbine pipe blade design, Designing the blades, http://www.windandwet.com/windturbine/tube_blade/design.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Wind & Wet, Wind turbine power calculator, http://www.windandwet.com/windturbine/power_calc/index.php, zuletzt eingesehen am 08.04.2019.

Woodford, Chris, Reed switches,
<https://www.explainthatstuff.com/howreedswitcheswork.html>, zuletzt eingesehen am
08.04.2019.