

Konzept und Aufbau von Kleinwindkraftwerken  
mit frei fliegenden Drachen

**Studienarbeit I**

des Studienganges Maschinenbau  
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Valentin Kaepfel und Felix Kary

08.01.2015

Bearbeitungszeitraum	01.10.2014 – 08.01.2015
Matrikelnummer, Kurs	5486725, TMB12C 1834463, TMB12C
Ausbildungsfirma	Heraeus Holding GmbH, Hanau C. Josef Lamy GmbH, Heidelberg
Betreuer der Dualen Hochschule	Dr. Manfred Franetzki

## *Erklärung*

*gemäß § 5 (3) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom 22. September 2011.*

*Ich habe die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.*

-----  
*Ort, Datum*

-----  
*Valentin Kaepfel*

-----  
*Felix Kary*

## Vorwort

Umweltzerstörung, globale Erwärmung und Ozonloch – all diese Begriffe sind beinahe tagtäglich in den Medien zu hören. Die negative Einflussnahme des Menschen auf die Umwelt ist nicht mehr anfechtbar und wird mit jedem Tag größer. Das Themengebiet der sogenannten „Erneuerbaren Energien“ kämpft gegen diese Umweltverschmutzung an vielen Fronten an. Die Zielsetzung hierbei besteht darin, den Energiebedarf der Menschheit umweltverträglich und nachhaltig zu decken. Diese Studienarbeit befasst sich mit einem Nischenprodukt der regenerativen Energien. Es wird ein Konzept einer Kleinwindanlage entworfen und der Aufbau – soweit wie möglich – realisiert. Hierbei steht jedoch nicht, wie in den meisten Forschungsprojekten, eine kommerzielle Energieerzeugung für die Industrieländer im Vordergrund. Das Kraftwerk soll für Krisengebiete mit geringer technischer Infrastruktur entworfen und eingesetzt werden. Geringe Kosten und eine hohe Mobilität stehen hierbei im Vordergrund. In diesem Punkt unterscheidet sich diese Anlage grundlegend von den anderen Unternehmungen, die auch mit einem Drachen als Kernelement zur Energieerzeugung arbeiten.

An dieser Stelle möchten wir uns herzlich bei Herrn Dr. Manfred Franetzki für seine Betreuung und die hilfreichen Ratschläge in allen Belangen dieser Arbeit bedanken. Dank gebührt auch Herrn Becker und Prof. Dr. Kai Becher für die Hilfe rund um den Themenbereich der elektrischen Maschine. Ebenso ist den Herren Studenten Marius Glasemann und Sergei Schwarzkopf für eine umfangreiche und intensive Zusammenarbeit zu danken. Als außerordentlich hilfsbereit und dienlich hat sich Herr Ernst Meininger in Szene gesetzt und uns vor Allem mit der elektrischen Maschine weitergeholfen.

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Konzept und dem Aufbau eines Kleinwindkraftwerkes, welches elektrische Energie aus Windenergie mit Hilfe eines Drachen gewinnt. Die Herausforderung bei diesem Kraftwerk besteht darin, dass es so kostengünstig wie möglich herzustellen sein soll. Des Weiteren sollen komplexe und aufwändige Technologien vermieden werden. Das hat den Hintergrund, dass dieses Kraftwerk für Entwicklungsländer gedacht ist und nicht zur kommerziellen Stromerzeugung.

Die Aufgabe war das Entwerfen und Aufbauen einer funktionstüchtigen Bodenstation für das Drachenkraftwerk. Hierzu sollten einfachste mechanische Komponenten genutzt und verbaut werden. Einige Teile und mechanische Komponenten konnten einem Vorgängermodell entnommen werden. Hierzu zählen die Haspel und die Führung des Seiles. Die komplette Übersetzung zwischen der Haspel und der elektrischen Maschine konnte aus Bestandteilen alter Fahrräder hergestellt werden. Als Halterungen für die Kettenräder wurde eine Klemmung mithilfe eines gebogenen Aluminiumbleches konzipiert. Die Halterungen der Kettenräder sind auf Aluminiumprofilen festgeschraubt, diese wiederum auf der Bodenplatte. Die Bodenplatte wurde aus belastbarem Polyethylen gefertigt, was zu einem geringen Gewicht der Anlage führt. Für die Aufnahme der elektrischen Maschine wurde ein Prisma entworfen, das sich den Dimensionen verschiedener Maschinen anpassen lässt.

Die Auswahl der elektrischen Maschine wird auf der Grundlage von ausführlichen Leistungsberechnungen getroffen. Dazu werden die zu erwartenden Leistungen sowohl im Generator- als auch im Motorbetrieb errechnet und eingeschätzt. Anschließend werden gängige Gleichstrommaschinen vorgestellt. Aufgrund der geringen Leistung und der Vorgabe einer kostengünstigen Station ohne aufwendige Technik, wird eine permanenterrregte Gleichstrommaschine sowohl als Generator als auch als Motor verwendet.

## Abstract

The present student research report addresses concept and set-up of a small wind power station, which gains energy from wind energy with the aid of a kite. The challenge consists in a low-cost manufacturing of the power station by avoiding complex and expensive technologies. The background is that this power station is intended for the use in less developed countries and not for a commercial electricity generation.

The task within this report was to construct and assemble a functional ground station for the kite power station. For that purpose, simple mechanical components are to be used. Some parts and mechanical components have been taken from its predecessor. This applies for coiler and duct. The transmission between coiler and electric machine has been manufactured from used bike parts. The chain wheels are clamped by the use of aluminum sheets, which are screwed onto aluminum profiles. The polyethylene baseplate contributes to a low overall weight. The attachment for the electric machine is realized by a prism, which can be adjusted to different machine dimensions.

The electric machine is chosen based on detailed power calculations. Therefore, the expected power generator and motor is calculated and evaluated. Afterwards, established types of the direct current machine are being introduced. Due to the low expected power and the specification to manufacture a low-cost station without complex technology, a direct current machine with permanent magnets is chosen and used in both ways, generator and motor.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>II</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>IV</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
<b>1 Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Einführung Erneuerbare Energien.....	3
1.2.1 Verschiedene Formen erneuerbarer Energien.....	3
1.2.2 Entstehung von Wind.....	5
1.2.3 Windkraft als elektrische Energiequelle .....	6
1.2.4 Energieerzeugung durch Drachenkraftwerke.....	7
1.3 Motivation .....	10
1.4 Aktueller Stand nach Schubert/Packeiser .....	11
<b>2 Konzeption und Aufbau der Bodenstation</b> .....	<b>19</b>
2.1 Die Grundplatte .....	20
2.2 Halterung Elektromotor.....	21
2.3 Halterung Kettenräder .....	23
2.4 Kettenräder.....	25
2.5 Haspel .....	26
2.6 Akkumulator .....	27
2.7 Steuerung des Kraftwerks .....	27
2.8 Modularität des Prototyps.....	28
2.9 Funktionsbeschreibung .....	29
2.9.1 Inbetriebnahme .....	29
2.9.2 Betriebszyklus.....	29
2.9.3 Stopp des Kraftwerks.....	30

2.10	Wirtschaftliche Betrachtung.....	30
<b>3</b>	<b>Leistungsanforderungen .....</b>	<b>32</b>
3.1	Berechnungsgrundlagen .....	32
3.2	Ermittlung des Z-Werts.....	34
3.3	Leistungsberechnungen .....	37
3.3.1	Steigphase .....	37
3.3.2	Sink- / Rückholphase .....	39
3.4	Ungenauigkeiten .....	42
<b>4</b>	<b>Die elektrische Maschine.....</b>	<b>47</b>
4.1	Physikalische Grundlagen .....	48
4.2	Gliederung elektrischer Maschinen .....	50
4.3	Die Gleichstrommaschine.....	53
4.3.1	Die elektrische erregte Gleichstrommaschine.....	58
4.3.2	Die permanenterregte Gleichstrommaschine.....	63
4.4	Wahl der elektrischen Maschine.....	64
4.4.1	Anforderungen .....	65
4.4.2	Der ausgewählte DC-Motor .....	66
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit .....</b>	<b>72</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>73</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Leistungsbeiwert von Windrädern, Quelle: [9] .....	12
Abbildung 2: Nennlastverfügbarkeitsvergleich EnerKite – Windrad, Quelle: [13].....	13
Abbildung 3: Faltsystem, Quelle: [13].....	14
Abbildung 4: Einklappvorrichtung, Quelle: [13].....	15
Abbildung 5: Foto Einklappvorrichtung, Quelle: [13].....	15
Abbildung 6: Nutzwertanalyse der Seillängenermittlung, Quelle: [13] .....	17
Abbildung 7: Kosten des Einklappmechanismus, Quelle: [13].....	18
Abbildung 8: Komplette Bodenstation von oben .....	20
Abbildung 9: Prisma mit eingelegter elektrische Maschine.....	21
Abbildung 10: Elastomer-Kupplung .....	23
Abbildung 11: Halterung der Kettenräder .....	23
Abbildung 12: Kettenräder mit Kette.....	25
Abbildung 13: Haspel mit Führungsring.....	26
Abbildung 14: Versuchsaufbau Z-Wert-Ermittlung, Quelle: [13] .....	34
Abbildung 15: OKD Delta, Quelle: <a href="http://www.drachenforum.net">http://www.drachenforum.net</a> .....	35
Abbildung 16: Power-Sled, Quelle: <a href="http://www.fly-high.com">http://www.fly-high.com</a> .....	35
Abbildung 17: Lorentzkraft, Quelle: [8] .....	48
Abbildung 18: Induktion, Quelle: [8].....	48
Abbildung 19: Ausführungen elektrische Maschine, Quelle: [7].....	50
Abbildung 20: Gliederung elektrische Maschinen, Quelle: [7].....	52
Abbildung 21: Wirkungsweise Lorentzkraft, Quelle: [8] .....	53
Abbildung 22: Wirkungsweise Kommutator, Quelle: [8].....	54
Abbildung 23: Funktionsweise elektrische Maschine, Quelle: [8] .....	55
Abbildung 24: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie, Quelle: [11] .....	57
Abbildung 25: Wirkungsgrad-Kennlinie, Quelle: [11] .....	58
Abbildung 26: Aufbau elektrisch erregte Maschine, Quelle: [8] .....	58
Abbildung 27: Fremderregte Gleichstrommaschine, Quelle: [16] .....	59
Abbildung 28: Nebenschlussmaschine, Quelle: [16].....	60
Abbildung 29: Reihenschlussmaschine, Quelle: [16].....	61
Abbildung 30: Kennlinie Reihenschlussmaschine, Quelle: [16].....	62

Abbildung 31: Permanenterrregte Gleichstrommaschine, Quelle: [8] .....	63
Abbildung 32: Faulhaber Serie 2642 CR, Quelle: [6].....	68
Abbildung 33: Ausgewählter Gleichstrommotor .....	69
Abbildung 34: Verhalten der ausgewählten Maschine.....	70

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Z-Werte der untersuchten Drachen.....	35
Tabelle 2: Leistungen während der Steigphase.....	37
Tabelle 3: Drehmomente während der Steigphase .....	39
Tabelle 4: Leistungen während der Rückholphase.....	41
Tabelle 5: Drehmomente während der Sinkphase.....	42
Tabelle 6: Einfluss der Steiggeschwindigkeit auf die Leistung.....	44
Tabelle 7: Einfluss der Rückholgeschwindigkeit auf die Leistung.....	45
Tabelle 8: Anforderungen an die Maschine .....	65
Tabelle 9: Messwerte des ausgewählten Motors, Quelle: [12].....	70

## 1 Einführung

Gegenstand der Arbeit ist ein sogenanntes Drachenkraftwerk. Dieses Kraftwerk soll aus Windenergie elektrische Energie in Form von elektrischem Strom gewinnen. Das geschieht mit Hilfe eines handelsüblichen Drachen mit einer Leine, einem Schlittendrachen (Sled). Der ist über die Leine mit einer Bodenstation verbunden. Der Luftwiderstand des Drachen kann verändert werden. Durch Steigen und Sinken des Drachen wird die Leine auf einer Haspel auf- beziehungsweise abgewickelt und treibt beim Steigen eine elektrische Maschine an oder wird beim Sinken von der elektrischen Maschine angetrieben. Innerhalb eines Zyklus wird sowohl Energie verbraucht als auch gewonnen. Da die Summe der geflossenen Energien positiv ist und es zu keinem CO<sup>2</sup>-Ausstoß oder zur Verwendung fossiler Brennstoffe bei dem Zyklus kommt, spricht man hier von einer regenerativen Energiequelle.

### 1.1 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit war es, ein funktionsfähiges Drachenkraftwerk zu bauen. Das Kraftwerk wird von insgesamt 4 Studenten aufgebaut. Die beiden Elektrotechnikstudenten Marius Glasemann und Sergei Schwarzkopf sind für die elektronischen Bauteile sowie die Regelung und Steuerung der elektrischen Maschine zuständig. Die beiden Maschinenbaustudenten Valentin Kaepfel und Felix Kary hingegen sind für die mechanischen Komponenten des Kraftwerks zuständig. Ein Teil des Kraftwerkes wurde von den Vorgängern Schubert/Packeiser schon zusammengebaut. Gemeint ist hiermit die ferngesteuerte Klappstation, welche im Betrieb an dem Drachen in der Luft hängt und den Drachen vor dem Einholen teilweise zusammenklappt, sowie vor dem Aufsteigen wieder auseinander faltet.

Für die Anlage soll ein Konzept erarbeitet werden, welches anschließend umgesetzt und aufgebaut werden soll. Die Anlage ist für Länder mit geringem technologischem Knowhow auszulegen. Einzelteile aus Industrieländern oder Technologiezentren sind erlaubt, sollten jedoch so gestaltet werden, dass alle Teile vor Ort im Anwenderland zusammengebaut und in Betrieb genommen werden können. Wenn möglich, ist im-

mer die technisch simpelste Lösung zu wählen. Entscheidend sind geringe Material- und Gesamtkosten bei anfallenden Lohnkosten – die Anlage muss für etwaige spätere Nutzer erschwinglich sein.

Die Nennleistung der Anlage sollte 100 Watt bis 1000 Watt betragen. Da es sich hier um den Bau eines Prototypen handelt, sollte der Grundaufbau so variabel wie möglich gestaltet werden, um spätere Änderungen oder Anpassungen (Drachen-/ Motorgröße) so einfach wie möglich zu gestalten.

Zudem sollen verschiedene Drachentypen darauf untersucht werden, ob sie für das Drachenkraftwerk geeignet sind. Weitere Aufgaben in dieser Studienarbeit sind die Erkennung der Position des Drachens sowie die Optimierung der Gesamtleistung des Systems in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit sind weitere Aufgaben in dieser Studienarbeit.

Eine Aufschlüsselung der Einzelaufgaben sieht folgende Verteilung vor:

#### A) Maschinenbauer

- Auswahl des geeigneten Drachens und Rückholverfahrens
- Aufbaukonzept sowie Aufbau der Bodenanlage. Im Einzelnen:
  - Bodenplatte, Generator, Haspel, Übersetzungen mit Kettenrädern und Kette, Umschaltung Sinken / Steigen, Ort der Elektronik, Energiespeicherung
- Realisierung des oben genannten

#### B) Elektrotechniker

- Bewertung der Grundkonzepte zur:
  - Messung der Drachenposition
  - und Einstellung der optimalen Steiggeschwindigkeit
  - Bestimmung und Einstellung der optimalen Sinkgeschwindigkeit
  - Realisierung dessen und Einbau in die Bodenanlage

#### C) Beide Teams

- Erprobung des Kompletterätes

### **Anmerkung zu der Aufgabenstellung**

Die geforderte Leistung des Drachenkraftwerkes konnte nicht erreicht werden, da das eine Investition von rund 500€ nach sich gezogen hätte. Die DHBW Mannheim hatte jedoch keine weiteren Gelder für diese Studienarbeit vorgesehen, weswegen diese Investitionen nicht getätigt werden konnten und wir mit unserem Betreuer so verblieben sind, dass die zunächst angepeilte Leistung mit einem vorhandenen Drachen und einem günstig erstandenen Motor von rund 100 Watt für diese Studienarbeit genügen muss. Auf die Bestimmung, Berechnung und Prognose der Leistung des Kraftwerkes wird in dieser Arbeit in Kapitel 3 vertieft eingegangen.

## **1.2 Einführung Erneuerbare Energien**

Als „regenerative Energien“ (oft auch unter den Namen „alternative Energien“ oder „erneuerbare Energien“ bekannt) werden bestimmte Energieträger bezeichnet, welche in so großem Maße zu Verfügung stehen (oder sich so schnell erneuern), dass sie den weltweiten Bedarf an Strom decken könnten. Mit „schnell“ erneuern sind hierbei unter Anderem nachwachsende Rohstoffe gemeint wie etwa Raps für den sogenannten Biodiesel oder Holz. Hier zieht man den Unterschied zu den fossilen Brennstoffen wie Öl, welche sich nur über sehr große Zeiträume regenerieren.

### **1.2.1 Verschiedene Formen erneuerbarer Energien**

[20]

Man unterscheidet bei den regenerativen Energien zwischen drei Energiequellen: Die elektro-magnetische Strahlung der Sonne, dann die mechanische Wechselwirkung der Erde mit dem Mond (Gezeitenkraft), sowie als letztes die Geothermie des Erdkerns. Diese drei Energiequellen können jeweils direkt oder indirekt zur Erzeugung nutzbarer Energien (Wärme, Strom) herangezogen werden.

Am vielfältigsten kann die Strahlung durch die Kernfusion der Sonne genutzt werden:

## **Solarenergie**

- Photovoltaik (Umwandlung der Strahlung in elektrischen Strom)
- Solarthermie (Erwärmung eines Mediums durch gezielte, manchmal fokussierte Strahlung)

## **Bioenergie**

Im Allgemeinen kann alles, was pflanzlich ist und nachwächst kann nur mit Hilfe der Sonneneinstrahlung entstehen. Hierzu zählen Biodiesel, Biogas, Bioethanol und Holz, aber auch Muskelkraft.

## **Wasserkraft**

Durch die Sonneneinstrahlungen verdunsten Wassermassen und werden in höheren Lagen in Form von Niederschlägen wieder abgegeben. Die hierbei zugeführte potentielle Energie des Wassers kann diesem zum Beispiel durch Stauseen kombiniert mit Turbinen entnommen und in elektrischen Strom umgeformt werden. Auch das klassische Wasserrad funktioniert nach diesem Prinzip. Des Weiteren gibt es noch die Möglichkeit die kinetische Energie großer Meeresströmungen durch Turbinen zu nutzen. Auch Osmosekraftwerke zählen zu den möglichen Nutzungen der Wasserkraft.

## **Windenergie**

Die Nutzung der Windenergie spielt - gerade in Deutschland - eine sehr große Rolle. Hierbei wird die kinetische Energie der Luft genutzt und mit Rotoren oder anderen Luftwiderständen Generatoren angetrieben und Strom produziert. Gängigste Form von Windkraftanlagen sind Windräder. Weitere Möglichkeiten die Energie des Windes zu nutzen sind Höhenwindanlagen (wie unser Drachenkraftwerk), Fall- und Aufwindanlagen. Ältere Anwendungsformen sind zu Beispiel Windmühlen oder Segelschiffe.

Die anderen beiden Energiequellen (mechanische Wechselwirkung mit dem Mond und Geothermie) haben im Vergleich zu der Strahlung der Sonne eine kleine Relevanz. Nichtsdestotrotz lassen sich auch hiermit große Mengen an regenerativer Energie herstellen.

## Gezeiten

Durch die Anziehungskraft des Mondes kommt es zu den sogenannten Gezeiten. Mit den Gezeiten ist die periodische Schwankung der Tiden in Küstennähe gemeint. Durch die Anziehungskraft des Mondes und der Sonne auf das Wasser und die Kombination mit der Zentrifugalkraft, welche durch die Rotation der Erde entsteht, bilden sich, die Erde umlaufende, Wellen im Ozean aus, was im Volksmund dann als Flut oder Ebbe bezeichnet wird. Die hierbei bewegten Wassermassen sind zwar sehr langsam, aber so gigantisch, dass sich hiermit Turbinen in der Größenordnung mehrerer Megawatt betreiben lassen.

## Geothermie

Der Kern des Planeten Erde ist flüssig und sehr heiß. Diese Hitze kommt unter anderem noch aus der Zeit der Entstehung der Erde und von der Reibung von Kontinentalplatten aneinander. Bohrt man tief genug in die erkaltete Kruste der Erde hinein, steigt die Temperatur immer weiter an. Wie tief man bohren muss hängt vom jeweiligen Standort ab. Es lassen sich Wärmetauscher installieren und die Energie in Form von Heizwärme nutzen (für kleine Dimensionen wie Wohnhäuser oder Schwimmbäder), aber man kann auch Wasser tief unter der Erde auf mehrere hundert Grad erhitzen und so Gasturbinen antreiben und Strom produzieren (Geothermiekraftwerk).

### 1.2.2 Entstehung von Wind

Windenergie ist eine indirekte Form der Sonnenenergie, im Gegensatz zu Photovoltaik oder Solarenergie. Durch die Wärmeeinstrahlung der Sonnen kommt es zu Temperaturunterschieden auf der Erde. Am Äquator treffen höhere Energiemengen als an den Polarkappen ein, das hat einen Energietransport vom Äquator zu den Polkappen zur Folge. Dieser Wärmetransport wird durch den Austausch von Luftmassen erbracht. Riesige Zirkulationen entstehen. So entsteht, grob beschrieben, Wind. Diese großen Zirkulationen (auch Hadely-Zellen genannt) werden durch die Umdrehung der Erde und die damit verbundene Corioliskraft weiter abgelenkt. [20]  
Neben den großen, globalen Zirkulationen spielen auch die Strömungen im kleinen Umfang eine sehr große Rolle in der Stromerzeugung durch Windkraft. In Küstenge-

bieten ist die Dichte der Windenergie sehr hoch. Das hat verschiedene Gründe: Die Oberfläche des Meeres bietet dem Wind beinahe keine Angriffsfläche, dieser kann sich also ohne Hindernis auf dem Meer bewegen. Hinzu kommt das sehr unterschiedliche thermische Verhalten der Oberflächen (Meer, Festland) bei Sonneneinstrahlung. Am Tag erhitzt sich das Festland sehr schnell, während das Meer (aufgrund der Wärmekapazität und der Wärmeleitfähigkeit des Wassers) sich kaum erhitzt. Das bedeutet, dass die erwärmten Luftmassen auf dem Festland emporsteigen und die vergleichsweise kühle Luft auf dem Meer in Richtung Festland nachfließt. In der Nacht ist es genau umgekehrt. Das Meer kühlt kaum ab, während das Festland sehr stark abkühlt. Das bedeutet nun, dass die „warmen“ Luftmassen auf dem Meer emporsteigen und nun die kalte Luft vom Festland auf das Meer strömt. Diese Ausgleichsströmungen an Küstengebieten können bis 50km in das Landesinnere reichen. Durch die hohe Verlässlichkeit auf ein vergleichsweise hohes Windaufkommen in Küstennähe haben die eben genannten Ausgleichsströmungen einen sehr großen Stellenwert für die Windenergieerzeugung.

### 1.2.3 Windkraft als elektrische Energiequelle

Ursprünglich wurde Wind mit Hilfe von Windmühlen und sogenannte „Werstenmills“ in mechanische Energie umgesetzt. Heutzutage nutzt man Windkraftwerke fast ausschließlich zur Erzeugung von elektrischem Strom. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Windenergie in elektrische Energie umzuwandeln. Die bekannteste und am weitesten verbreitete Methode besteht in Windrädern mit horizontaler Drehachse und Rotorblättern. Des Weiteren gibt es Windkraftwerke mit vertikaler Drehachse. Diese Art der Windkraftwerke hat sich jedoch nicht durchgesetzt gegen die Räder mit horizontaler Drehachse. Eine weitere Methode, Wind in elektrische Energie umzusetzen, ist mit Hilfe eines Drachenkraftwerkes, wie es in dieser Studienarbeit behandelt wird. Auch hier gibt es diverse verschiedene Methoden und Ideen, die Energie umzuwandeln.

## Stand der Technik

Normale Windkraftanlagen erreichen heutzutage schwindelerregende Höhen und Leistungen. Durch starke staatliche Subventionen werden Windkraftanlagen immer weiter erforscht und gebaut. Alternative Methoden, dem Wind die Energie zu entziehen und in elektrischen Strom umzuwandeln werden bei den meisten Förder- oder Forschungsprogrammen leider wenig berücksichtigt.

Die leistungsstärkste und höchste Windkraftanlage der Welt ist die Vestas V164-8.0 in Dänemark (Onshore) mit einer Nennleistung von 8 Megawatt und einer Gesamthöhe von 220 Metern (Narbenhöhe circa 140 Meter. Den größten Rotordurchmesser der Welt hat die Offshoreturbine Samsung S7.0-171 mit einem Durchmesser von 171 Metern. [5]; [15]

### 1.2.4 Energieerzeugung durch Drachenkraftwerke

Konventionelle Windkraftwerke haben oft nur eine sehr eingeschränkte Verfügbarkeit (stark Standortabhängig). Installierte Windturbinen laufen vergleichsweise selten auf Vollast. Von 1999 bis 2011 liefen zum Beispiel in Amerika die Windkraftanlagen im Schnitt 25 – 33% des Jahres im Vollastbetrieb. Diese Zahlen sind schon sehr gut für normale Windkraftanlagen, in Deutschland werden diese Zahlen oft nicht einmal erreicht. Woher diese geringe Auslastung kommt lässt sich relativ einfach erklären. [3]

Desto höher man vom Erdboden entfernt misst, desto stetiger ist der Wind. Das ist auch der Grund warum man mit Windrädern immer größere Narbenhöhen baut. Allerdings werden die Windkraftwerke mit jedem Meter in der Höhe immer teurer, so dass man das nicht unendlich weit treiben kann. Höhen von 500 – 800 Metern erreichen Drachenkraftwerke jedoch mit Leichtigkeit. Und das bei minimalem Materialaufwand. Windrädern wird oft nachgesagt, dass sie die Landschaft nachhaltig verändern und das Bild einer unberührten Natur zerstören. Ein großer Drache in 600m Höhe ist jedoch so klein, dass er nur als Punkt am Himmel erkennbar ist. Die Bodenstation eines Drachenkraftwerkes baut nur um die 10 Meter hoch auf (bei gleicher Leistung wie ein Windrad). Die durchschnittliche Verfügbarkeit von Drachenkraftwerken ist sehr viel höher als die von konventionellen Windkraftanlagen. Der Material-

aufwand ist weit geringer – damit sind die Kosten für ein Drachenkraftwerk auch sehr viel geringer als für ein Windrad mit gleicher Nennleistung. Drachenkraftwerke können im Gegensatz zu Windkraftwerken sehr billig auch Offshore angebracht werden. Sie können auf schwimmenden Plattformen installiert werden. Auch hier spricht das Drachenkraftwerk wieder für sich durch einen sehr viel geringeren Material- und Kosteneinsatz. Drachenkraftwerke können auch in sehr viel tieferen Küstengewässern aufgebaut werden, da die schwimmenden Plattformen nur mit Ankern befestigt werden müssen und keine Fundamente brauchen. Auch gegen Orkane und Taifune sind die Kraftwerke sicher: Bei zu großen Windgeschwindigkeiten werden die Drachen eingeholt und bei zu stürmischer See braucht man keine Bedenken zu haben, da die schwimmenden Plattformen den Wellen keinen Widerstand leisten. [2]

Der geringe Materialaufwand und die geringen Kosten haben auch zur Folge, dass sich die Wartung der Drachenkraftwerke sehr günstig gestaltet.

Hinzukommt, dass auch leistungsfähige Drachenkraftwerke (55kW) auf einem Lkw montiert zu mobilen Stationen umgerüstet werden können. Das wären Optionen für Notstrom-Aggregate in Krisengebieten oder bei Zusammenbruch des Stromnetzes. Auf Krankenhausdächern oder anderen Einrichtungen deren Stromversorgung gesichert sein muss können Not-Kraftwerke installiert werden, die bei Bedarf steigen.

Die Firma NTS Energie- und Transportsysteme GmbH aus Berlin zum Beispiel lässt Wagen auf einer Schienenumlaufbahn laufen und durch die Relativbewegung Schiene zu Wagen wird Strom produziert. Die Drachen ziehen die Wagen die meiste Zeit und produzieren damit Strom. Auf einem kleinen Teil der Bahn muss der Wagen jedoch von dem Generator/Motor angetrieben werden, um auf die Gegenlaufbahn zu kommen.

Die Firma SkySails GmbH aus Hamburg lässt einen großen Lenkdrachen in achterschleifen langsam aufsteigen und dabei eine Haspel antreiben, die an einen Generator gekoppelt ist. Auch hier muss kurzzeitig wieder Energie verbraucht werden und zwar beim Einziehen des Drachen. Vorteil bei dieser besonderen Methode ist, dass diese Systeme auch (beziehungsweise besonders gut) auf dem Meer in Küstennähe installiert werden können und so in einem Land mit teurem Bauraum wie Deutschland kaum Platz wegnehmen und vergleichsweise günstig sind.

Selbst die Firma Google Inc. aus Amerika hat 2013 eine Firma übernommen, die sich auf die Entwicklung eines Prototyps zur Nutzung von Höhenenergie spezialisiert hatte. Hier verfolgen die Entwickler jedoch ein etwas anderes Modell als die eben vorgestellten: Ein Drache ist mit Propellern ausgestattet. Dieser Drache wird von einer Bodenstation gesteuert und fliegt große Kreise. Zum Starten und um die Arbeitshöhe des Drachen zu erreichen werden die Propeller als Starthilfe benutzt, das System kann also auch bei absoluter Windstille starten. Fliegt der Drache nun im Höhenwind Kreise, schalten die Propeller vom Motor in den Generatorbetrieb um und produzieren Strom. Dieser wird dann über das Steuerkabel hinunter geleitet. Die Stromerzeugung in der Luft hat den Nachteil, dass mehr Material in die Luft gebracht werden muss. Außerdem ist der Regelungs- und Steuerungsaufwand sehr viel höher als bei den anderen Methoden. Zudem kommt die Gefahr durch Blitzeinschläge, die bei den anderen Methoden zwar auch den Drachen beschädigen würden, bei dieser Methode jedoch die Generatoren in Mitleidenschaft ziehen. Der wirtschaftliche Schaden wäre immens.

Das Start-up Unternehmen Vent Air Technologies Inc. hingegen nutzt wieder eine andere Technik um dem Wind mit Hilfe eines Drachen Energie abzugewinnen. Die hier verwendete Methode ist der Methode, wie sie in diesem Bericht realisiert wird sehr ähnlich. Der Drachen ist ein sogenannter Einleiner. Er hat mehrere Öffnungen, welche mit Lamellen geschlossen oder geöffnet werden können. Beim Steigen sind die Lamellen geschlossen und die Fläche des Drachen ist größer, als wenn der Drache mit offenen Lamellen eingeholt wird. Der Energieüberschuss, der dabei generiert wird, kann in eine Batterie oder ähnliches eingespeist werden.

### 1.3 Motivation

Die Motivation, ein solches Kraftwerk zu konzeptionieren und in die Realität umzusetzen ist nun sehr klar geworden: Wir bedienen hier eine Nische, auf die sich bisher noch keine Firma spezialisiert hat. Zwar werden ähnliche Systeme erforscht und teilweise auch erprobt, doch immer nur für die Industrienationen dieser Welt. Diese Innovation für Entwicklungsländer nutzbar zu machen ist neu und klingt sehr vielversprechend. Unser Kraftwerk ist klein, günstig und transportfähig. Es ist nach einer gewissen Vorinstallierung von Laien bedienbar und robust.

## 1.4 Aktueller Stand nach Schubert/Packeiser

Diese Ausarbeitung nutzt unter Anderem die Studienarbeit „Entwicklung von ferngesteuerten Faltmechanismen für Flugdrachen“ von M. Schubert und D. Packeiser als Grundlage. Die besagte Arbeit ist, wie auch die vorliegende, unter Herrn Dr. M. Franetki innerhalb des Projektes zur Entwicklung eines Drachenkraftwerkes entstanden und beschäftigt sich insbesondere mit der Auswahl und dem Aufbau eines geeigneten Einklappmechanismus. In diesem Abschnitt sollen die wichtigsten Erkenntnisse der Ausarbeitung von Schubert/Packeiser zusammengefasst werden.

Zur Einführung werden in der Arbeit von Schubert/Packeiser Grundlagen der Windenergie und Windentstehung besprochen. Des Weiteren werden konventionelle Windkraftanlagen vorgestellt und mit dem Konzept des Drachenkraftwerkes verglichen. Dabei werden vertikale und horizontale Bauformen des Windrades vorgestellt und auf die Funktionsweise des dreiblättrigen Windrades eingegangen, welches sich aufgrund der höchsten Leistungsbeiwerte kommerziell durchgesetzt hat. [13]

Diese Aussage lässt sich durch folgende Grafik unterstützen, auf der die Leistungsbeiwerte verschiedener Bauformen über der Schnelllaufzahl (Relation von Umfangs- zu Anströmgeschwindigkeit [9]) aufgetragen werden:

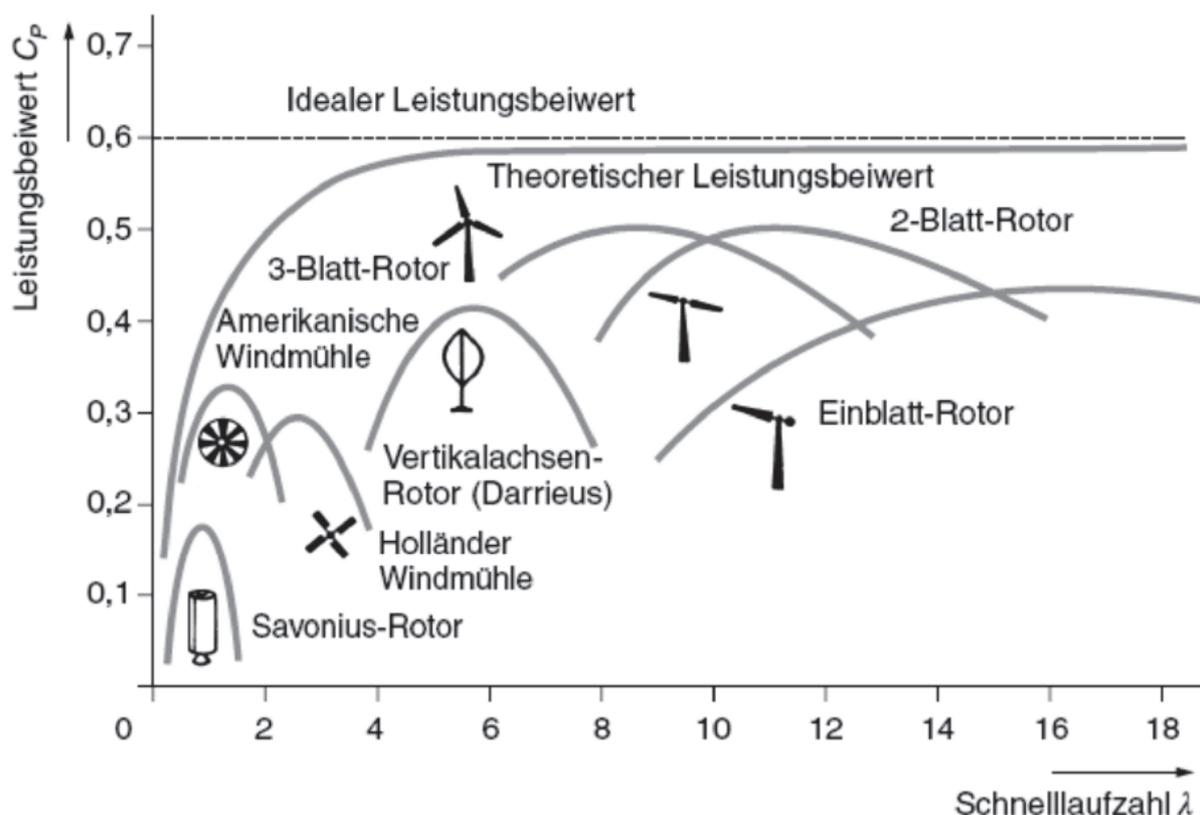


Abbildung 1: Leistungsbeiwert von Windrädern, Quelle: [9]

Der 3-Blatt-Rotor hat sich aufgrund des hohen Leistungsbeiwertes bzw. Wirkungsgrades und des ruhigen Laufverhaltens im Vergleich zum Einblatt- und 2-Blatt-Rotor etabliert. [13]

Entscheidende Vorteile eines Drachenkraftwerkes gegenüber herkömmlicher Windräder lassen sich insbesondere bei Materialkosten und Auslastungsgrad finden. In der Ausarbeitung von Schubert/Packeiser wird im Konkreten ein Vergleich zwischen einer 3-MW-Windkraftanlage und einem äquivalenten Drachenkraftwerk der Firma EnerKite vollzogen. So benötigt das Drachenkraftwerk nur einen Bruchteil des Materials und hat aufgrund der größeren Arbeitshöhe Zugang zu stärkeren und konstanteren Windstärken, weshalb eine wesentlich höhere Auslastung bzw. Nennlastverfügbarkeit verzeichnet werden kann:

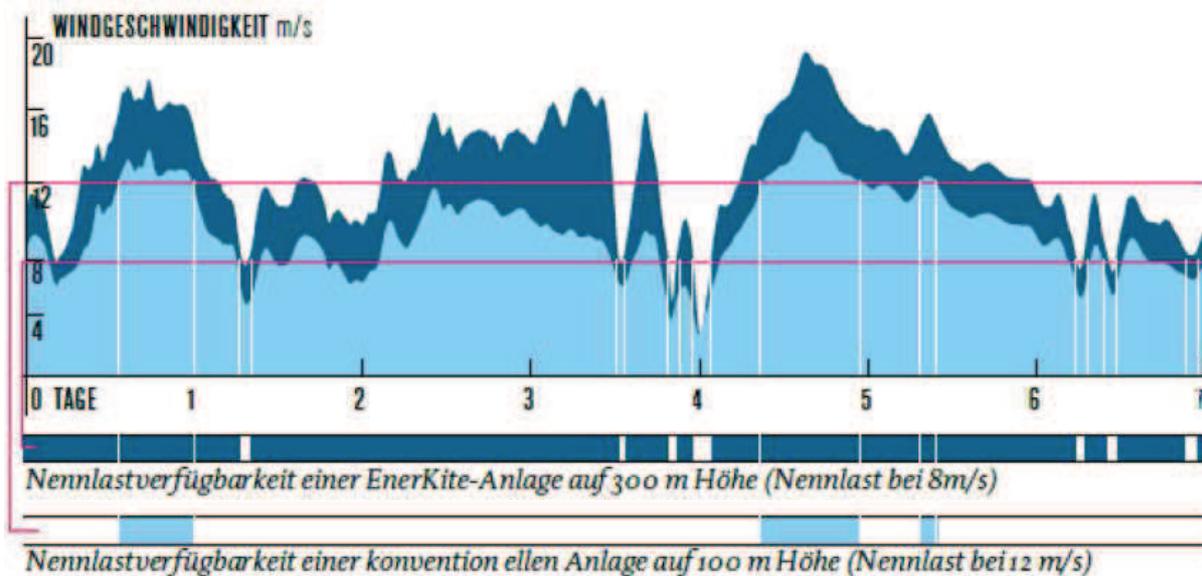


Abbildung 2: Nennlastverfügbarkeitsvergleich EnerKite – Windrad, Quelle: [13]

Aufgrund der höheren Auslastung entsteht durch das Drachenkraftwerk ein deutlich größerer Jahresenergiebetrag, durch welchen die Stromgestehungskosten eines Windrades unterboten werden können. Neben der hohen Auslastung, dem geringen Materialverbrauch und den geringen Stromgestehungskosten lassen sich noch Flexibilität und Mobilität als zentrale Vorteile nennen. [13]

In der Studienarbeit Schubert/Packeiser wird auch eine umfassende Marktanalyse zu bestehenden Konzepten und Forschungsprojekten im Bereich der Energieerzeugung durch Nutzung der Höhenwinde (High Altitude Wind Energy – HAWC) in Form von Drachen oder Ähnlichem präsentiert. Es werden unterschiedliche Ansätze vorgestellt, welche die Windenergie in einer Bodenstation oder auch direkt in der Luft in elektrische Energie umwandeln. Eine Sache haben diese Konzepte jedoch alle gemeinsam – hohe Investitionskosten und einen komplexen Aufbau. In diesen Punkten soll sich das Konzept von Herrn Dr. Franetzki von den kommerziellen Höhenwindkraftwerken, welche für den Betrieb in Industriestaaten ausgelegt sind, unterscheiden. Das Ziel ist die Entwicklung eines Kleinkraftwerkes zur elektrischen Grundversorgung in Ländern der Dritten Welt mit einfacher Technik, geringen Investitionskosten und hoher Mobilität. [13]

## Das Faltsystem

Das zentrale Thema der Studienarbeit von Schubert/Packeiser ist die Entwicklung eines geeigneten Faltmechanismus. Ziel des Faltmechanismus ist es, den Luftwiderstand des Drachens in der Rückholphase des Arbeitszyklus bedeutend zu verringern, um eine positive Energiebilanz verzeichnen zu können. Die Zugkraft des Drachens ist direkt abhängig von der angeströmten Fläche. Eine Verringerung der Fläche führt also zu einer geringeren Zugkraft und somit zu einem geringeren Energieaufwand in der Rückholphase. Genaue mathematische Betrachtungen der Leistungsverhältnisse werden im Kapitel 3 „Leistungsanforderungen“ aufgenommen. Zentrale Anforderungen an den Faltmechanismus sind geringe Kosten, geringes Eigengewicht, sowie die Ansteuerung durch eine Fernbedienung.

Aus den verschiedenen Möglichkeiten, einen Drachen zu falten, wurde in Schubert/Packeiser ein Prinzip ausgewählt, bei dem durch eine Verkürzung der mittleren Führungsschnur eine Verringerung der durch den Wind angeströmten Fläche erfolgt. [13]

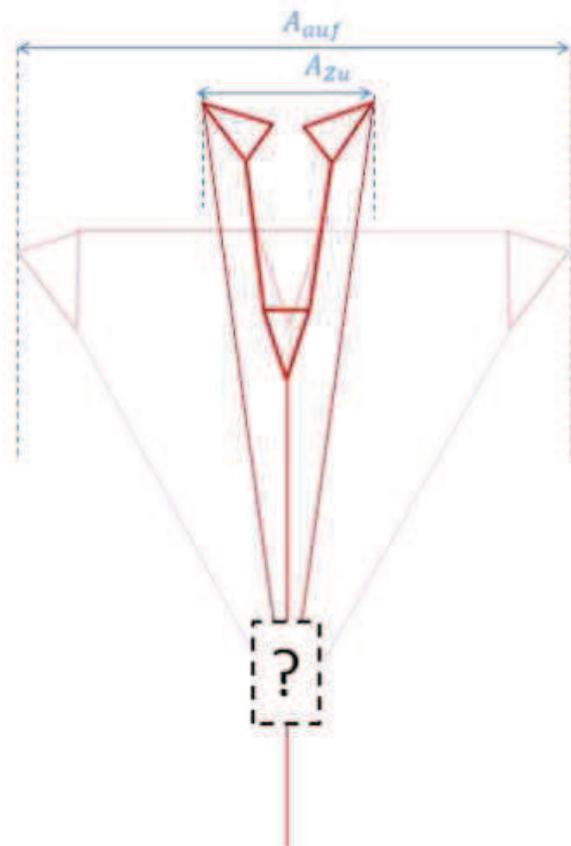


Abbildung 3: Faltsystem, Quelle: [13]

Aus Ideen zur Regelung der Seillänge des mittleren Drachenseils wurde nun ein System ausgewählt, das mithilfe eines Servomotors arbeitet.

Der Servomotor (b) ist auf einer Grundplatte befestigt, an der sich das Hauptseil (4) und die beiden äußeren Drachenseile (2 und 3) befinden. Der Servomotor, welcher durch eine Fernsteuerung angesteuert werden kann, reguliert über eine Spule (c) die Seillänge des mittleren Drachenseils (2). [13]

Mit einfachsten Mitteln wurde dieses Konzept praktisch umgesetzt. In dem blauen Gehäuse befinden sich der Empfänger der Fernsteuerung, der Servomotor und Batterien zur Energieversorgung des Motors. Die Welle des Motors ist mit der Spule verbunden, über welche das mittlere Drachenseil aufgewickelt wird. Als gewichtsarme Grundplatte, an der sich die übrigen Seile befinden, dient eine Aluminiumkonstruktion. [13]

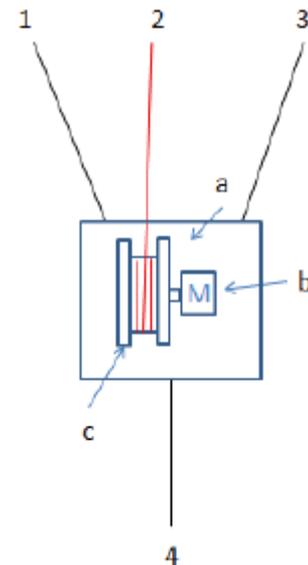


Abbildung 4: Einklappvorrichtung, Quelle: [13]



Abbildung 5: Foto Einklappvorrichtung, Quelle: [13]

Dieses System wurde aufgrund der guten Flugeigenschaften und der hohen Betriebssicherheit ausgewählt. Es zeigte positive Auswirkungen auf das Flugverhalten des Drachens und eine zuverlässige Arbeitsweise beim Einklappen. Durch eine ge-

eignete Auswahl des Spulendurchmessers und Gewichtsreduzierungen konnte dieses System weiter optimiert werden. Das endgültige Gewicht der Apparatur beträgt 335g. Eine ausführliche Montageanleitung zu der Einklappvorrichtung lässt sich auch in der Ausarbeitung von Schubert/Packeiser finden. [13]

Schubert/Packeiser widmen sich auch theoretischen Betrachtungen zur Leistungsabgabe des Drachenkraftwerkes. Es werden mathematische Formeln zur Berechnung der Maximalleistung bei einer optimalen Steiggeschwindigkeit des Drachens hergeleitet. Es erfolgen, auf Versuchswerten basierend, ausführliche Berechnungen zu der mechanischen Leistungsbereitstellung bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und Drachengrößen. Auch wird mathematisch ein optimales Verhältnis von Steig- zu Sinkgeschwindigkeit entwickelt. Auf dieser Basis werden optimale Leistungen pro Zyklus berechnet und es kann eine Empfehlung zur Drachendimensionierung und dem Betrieb eines Kraftwerks gegeben werden. [13]

Der Bereich der Leistungsberechnung wird in dieser Studienarbeit erneut ausführlich in dem Kapitel „Anforderungen an die Bodenstation“ bearbeitet. Es wird Bezug auf die Ergebnisse von Schubert/Packeiser genommen und die mathematischen Grundlagen werden genutzt, um auf der Basis von eigenen Versuchsaufzeichnungen Leistungsvorhersagen zu treffen. Diese werden besonders im Hinblick auf die Auslegung der elektrischen Maschine zur Umwandlung der mechanischen in elektrische Arbeit durchgeführt.

### **Ermittlung der Seillänge**

In einem weiteren Abschnitt der Studienarbeit von Schubert/Packeiser werden Konzepte zur Ermittlung der Seillänge entwickelt, welche das Signal zum Ein- und Ausklappen des Drachens geben sollen. Darin lassen sich sowohl einfache, mechanische Prinzipien finden, als auch eine Lösung mittels Speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS). Die Konzepte werden ausführlich beschrieben und im Rahmen einer Nutzwertanalyse bewertet. [13]

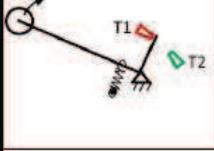
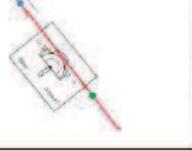
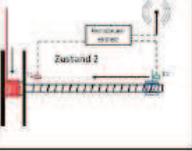
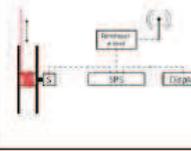
Variante		1	2	3	4
Bezeichnung		mit Rollentaster	mit Markierung am Seil	mit Gewindespindel	SPS-Lösung
Skizze					
Eigenschaften:		Bewertung			
Gewichtung:					
Einfachheit	5	10	8	8	0
Kosten	6	10	10	8	0
Ermittlung Höhe	6	8	8	8	10
Ermittlung Geschwindigkeit	4	0	0	0	10
Automatische Abschaltung bei Windflaute	4	0	0	0	10
Betriebssicherheit	4	6	6	6	8
Erweiterbarkeit	1	0	0	0	10
Ergebnis		182	172	160	182
Legende:		Bedeutung		Bedeutung	
	6	sehr wichtig		10	sehr gut
	5	wichtig		8	gut
	4	weniger wichtig		6	befriedigend
	3	unbedingt notwendig		4	ausreichend
	2	notwendig		2	mangelhaft
	1	nicht notwendig		0	ungenügend

Abbildung 6: Nutzwertanalyse der Seillängenermittlung, Quelle: [13]

Aus dieser Nutzwertanalyse gehen die einfachste mechanische Variante und die SPS-Steuerung als Favoriten hervor. Bei der Variante 1 „mit Rollentaster“ wird direkt auf dem aufgewickelten Seil ein Rollentaster angebracht, welcher über ein Gelenk mit zwei Kontakten in Verbindung treten kann. So kann bei einem bestimmten Spulendurchmesser, welcher sich mit der Länge des aufgewickelten Seils verändert, ein Signal zum Aus- oder Einklappen über die Kontakte weitergegeben werden. Diese sehr kostengünstige Variante ermöglicht aber nur eine grobe Ermittlung der Seillänge und ist nicht erweiterbar. Im Rahmen der vorliegenden Studienarbeit wurde sich für die Seillängenfeststellung mittels eines computergestützten Systems entschieden. Die höheren Investitionskosten wurden zugunsten von Erweiterungsmöglichkeiten und Betriebssicherheit in Kauf genommen. Die Entwicklung der Seillängensteuerung mit Hilfe eines Inkrementell-Messsystems wird in einer separaten Ausarbeitung von Marius Glasemann behandelt. [13]

Anschließend wird die Auswahl des Generators beschrieben. Die Auswahl der elektrischen Maschine stellt auch ein zentrales Thema der vorliegenden Studienarbeit dar. In Schubert/Packeiser wurden bereits einige theoretische Grundlagen zur Antriebstechnik gelegt und Empfehlungen für die Auswahl des Generators bzw. des Motors in der Bodenstation gegeben. Dieses Thema wird jedoch ausführlich in Kapitel 4 „Die elektrische Maschine“ diskutiert.

Zum Abschluss geben Schubert/Packeiser eine Übersicht über die Kosten des Einklappmechanismus und schätzen die Kosten der Bodenstation ab. Die Gesamtausgaben für den Einklappmechanismus können der folgenden Tabelle entnommen werden:

<b>Komponente</b>	<b>Kosten</b>
Fernsteuerung	55 €
Servomotor	35 €
Spindelmaterial	5 €
Gehäuse	2 €
Bleche	3 €
Akku	30 €
Kleinteile	10 €
<b>Zwischensumme</b>	<b>140 €</b>
Akkuladegerät	35 €
Austauschakku	30 €
<b>Gesamtsumme</b>	<b>205 €</b>

Abbildung 7: Kosten des Einklappmechanismus,  
 Quelle: [13]

Die Kostenabschätzung der Bodenstation wird in Kapitel 2.10 „Wirtschaftliche Betrachtung“ aufgegriffen und mit den Kosten der im Rahmen dieser Studienarbeit gewählten Komponenten verglichen.

## 2 Konzeption und Aufbau der Bodenstation

Die gesamte Anlage besteht aus zwei übergeordneten Baugruppen: Der Bodenstation und dem Drachen mit Klappmechanismus. Der Drachen ist zunächst an drei Seilen befestigt. Diese sind mit der Klappstation verbunden. Die Klappstation verbindet also den Drachen mit dem Seil, welches zur Bodenstation führt. Das Seil des Drachen ist auf eine Haspel aufgewickelt, die auf der Bodenstation befestigt ist. Auf derselben Achse wie die Haspel sitzt nun ein Kettenrad, welches über eine Kette mit einem zweiten Kettenrad gekoppelt ist. Aus den unterschiedlichen Durchmessern der beiden Kettenräder ergibt sich die Übersetzung von der Haspel auf die elektrische Maschine. Auf der Gegenseite der Achse des zweiten Kettenrades sitzt die eben erwähnte elektrische Maschine. Die Maschine hat zwei Kabel als Schnittstelle zu den Arbeiten der Elektrotechniker. Auf der freien Fläche der Grundplatte finden die Steuerung des Motors, die Fernsteuerung des Klappmechanismus, die Laderegelung des Akkumulators und der Akkumulator selbst Platz.

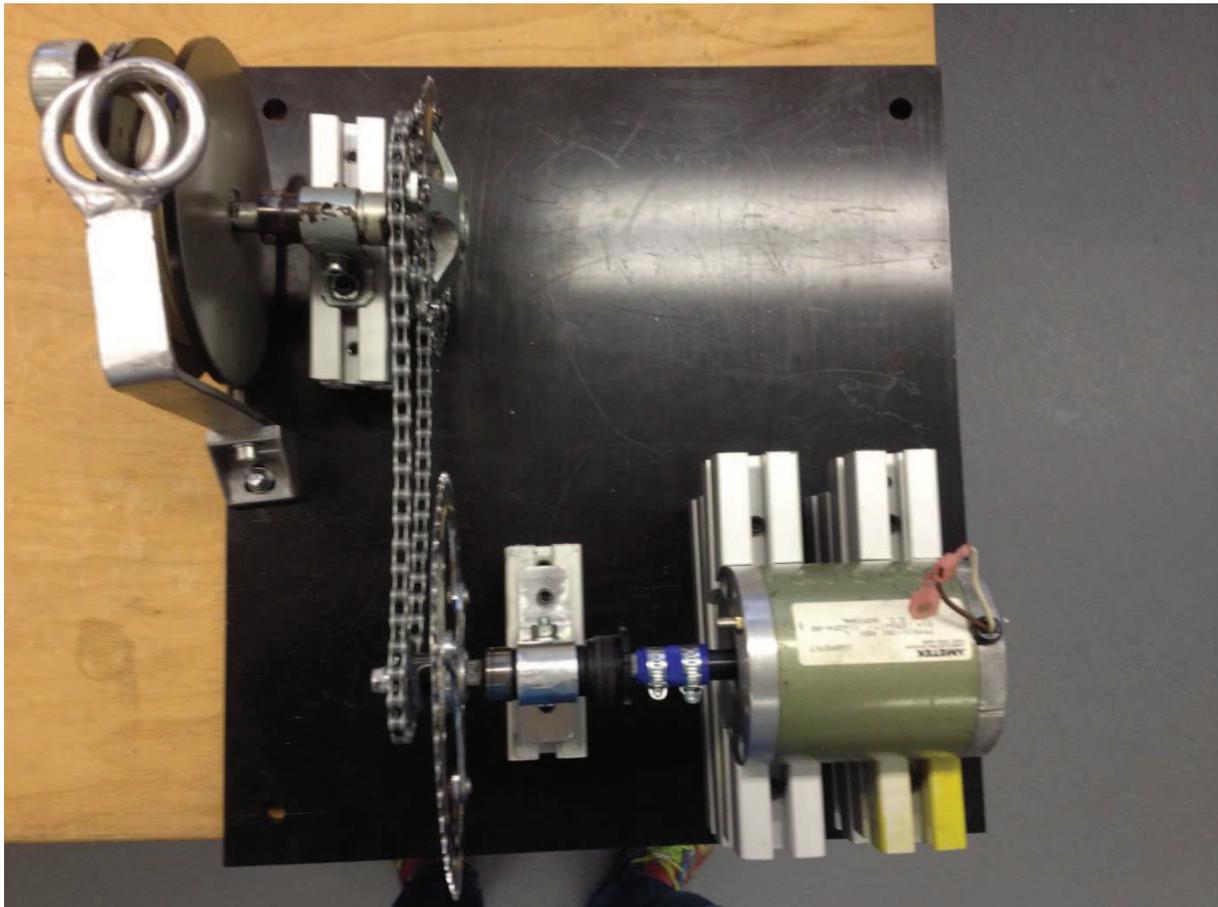


Abbildung 8: Komplette Bodenstation von oben

## 2.1 Die Grundplatte

Die Grundplatte der Bodenstation besteht aus einer 20mm dicken Polyethylen-Platte (PE). PE hat gute Bruchdehnungs- und Zähigkeitskennwerte bei geringer Dichte, weswegen es sich gut für die Plattform des Kraftwerkes eignet. Vorgänger hatten eine lackierte Metallplatte als Plattform gewählt, was das Gewicht des Kraftwerkes immens steigerte. Da es sich bei diesem Aufbau um einen Prototypen handelt, der durchaus zur Präsentation an verschiedenen Orten schnell transportierbar und funktionstüchtig sein soll, ist ein geringeres Gewicht von Vorteil. Das Material ist leicht zerspanbar, was die Arbeit an der Platte erleichtert. Hinzu kommt, dass man PE nicht weiter behandeln muss, da es werkstoffbedingt witterungsbeständig ist. Aber nicht nur für den Prototypen, auch für spätere Weiterentwicklungen oder neue Entwürfe der Anlage sind Kunststoffplatten aufgrund des Gewichtes, ihrer Festigkeit, der Zerspanbarkeit und der Wirtschaftlichkeit zu empfehlen. [14]

Die Platte hat 4 Bohrungen (in jeder Ecke eine) mit 15mm Durchmesser für Heringe, mit denen die Bodenstation im Boden verankert werden soll. Diese Maßnahme ist

unbedingt notwendig, da der Drachen bei entsprechender Größe und Windstärke hohe Zugkräfte entwickelt und mit Leichtigkeit die Bodenstation anheben und hinfort tragen kann. Als Heringe können große Zeltheringe genommen werden, wie es sie in jedem Baumarkt zu kaufen gibt.

## 2.2 Halterung Elektromotor

Die Halterung des Elektromotors besteht aus verschiedenen, zurechtgesägten Aluminiumprofilen. Diese wurden mit Nutensteinen auf die PE Grundplatte geschraubt. Sowohl die Nutensteine als auch die Schrauben sind verzinkt und somit witterungsbeständig (die sind natürlich auch witterungsbeständig). Auf den beiden quer verbauten Alu-Profilen sitzen jeweils zwei weitere Alu-Profilstücke. Diese wurden an einer Seite jeweils unter einem Winkel von  $70^\circ$  abgesägt. Eine Bohrung von oben durch die Profile verbindet die kleinen Alu-profile über Nutensteine mit den Grundprofilen. Durch die Nutensteine sind die oberen Profilteile verschiebbar. Da die angesägten Flächen zueinander zeigen haben die Profilteile die gleiche Wirkung wie ein Prisma. Runde Teile verschiedener Größe können hier eingelegt werden (siehe Abbildung).

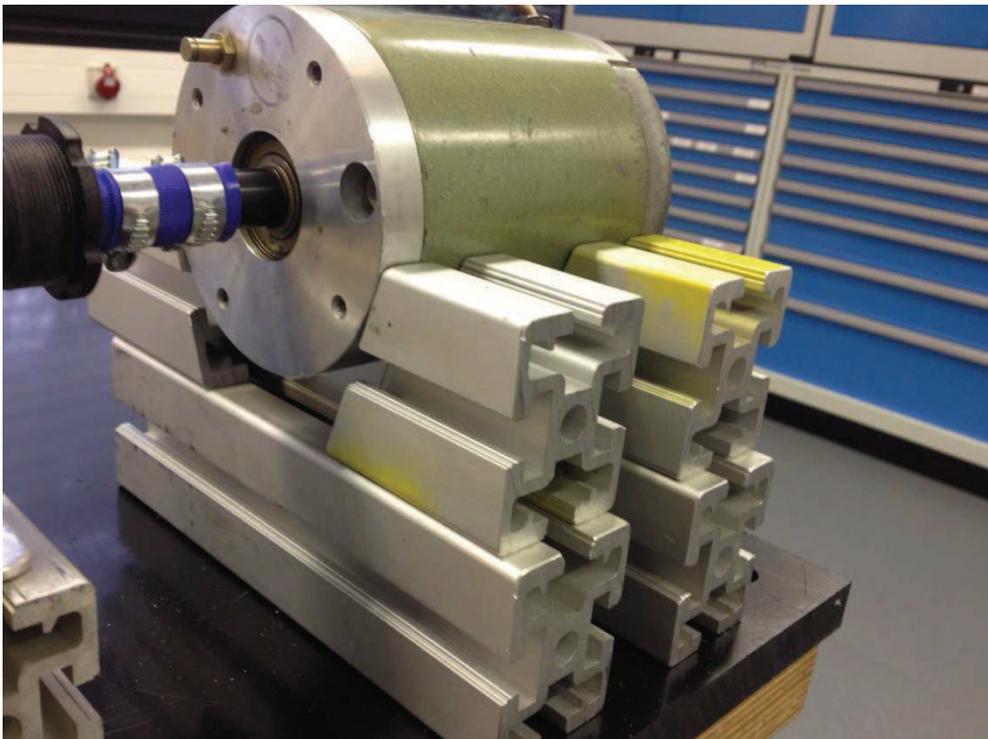


Abbildung 9: Prisma mit eingelegter elektrische Maschine

Das Prisma kann einfach über die Sechskantschrauben in den kleinen Profiltteilen verschoben werden. Da die Achshalterung für die Kettenräder fest ist, muss die elektrische Maschine mit seiner Welle auf die Welle der Fahrradnarbe gebracht werden, um eine Kraftübertragung zu ermöglichen. Durch das Prisma lassen sich problemlos verschiedene Motoren auf der Bodenplatte montieren und auf die Höhe der Welle in Stellung bringen. Um eine Drehung des Motors im Betrieb zu verhindern kann dieser an der Stirnseite mit einem Blechstreifen mit der Bodenplatte verbunden werden. Um das Drehmoment von dem Kettenrad auf den Motor und umgekehrt zu übertragen müssen die beiden Wellenenden mit einer Kupplung verbunden werden. Die Welle des Motors ist rund und hat einen Durchmesser von 16 mm, wohingegen die Welle des Tretlagers viereckig ist (14 mm von Planfläche zu Planfläche). Mithilfe von CNC-Technik ließe sich eine individuelle, passgenaue Kupplung herstellen. Die Anforderungen an diesen Prototypen jedoch gebieten einen möglichst geringen Einsatz von „High-Tech“. Lösung des Problems ist ein Streifen Kunststoff, der um beide Wellenenden gewickelt wird. Anschließend werden mit zwei Schlauchklemmen die jeweiligen Wellenenden mit dem Kunststoffstreifen fest verbunden. Das Elastomer des Kunststoffstreifens passt sich beim Anziehen der Schlauchklemmen der Form der jeweiligen Wellen an. Zieht man die Schlauchklemmen fest genug an, entsteht eine kraftschlüssige Welle – Welle Verbindung. Für unseren Leistungsbereich ist diese Art der Kupplung vollkommend ausreichend und passt sehr gut in dieses Konzept. Bei höheren Leistungsklassen ließe sich ein ähnliches Bauteil mit Streifen aus Pkw- oder Lkw-Reifen herstellen.

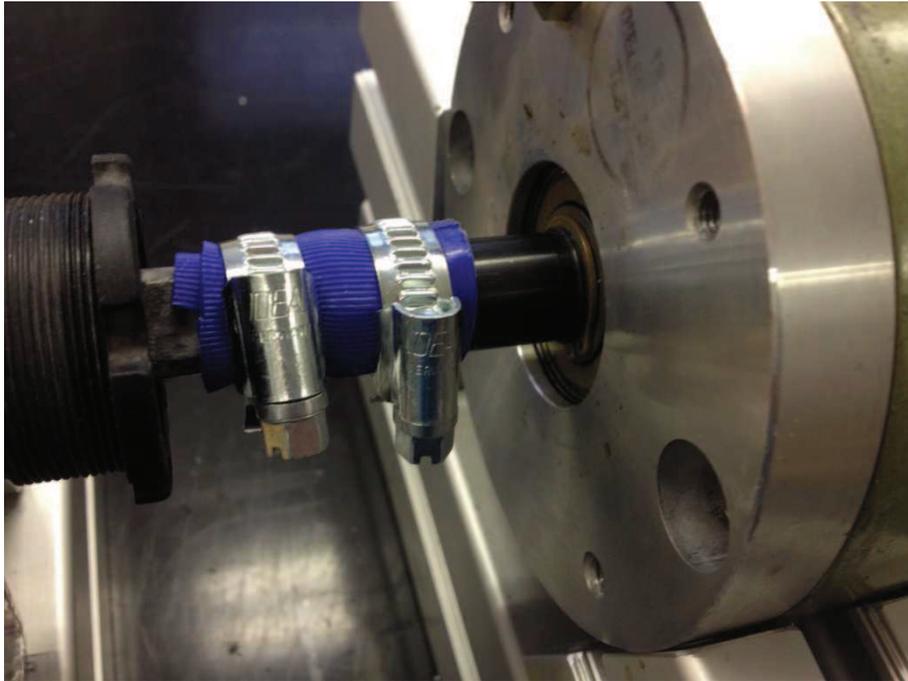


Abbildung 10: Elastomer-Kupplung

## 2.3 Halterung Kettenräder

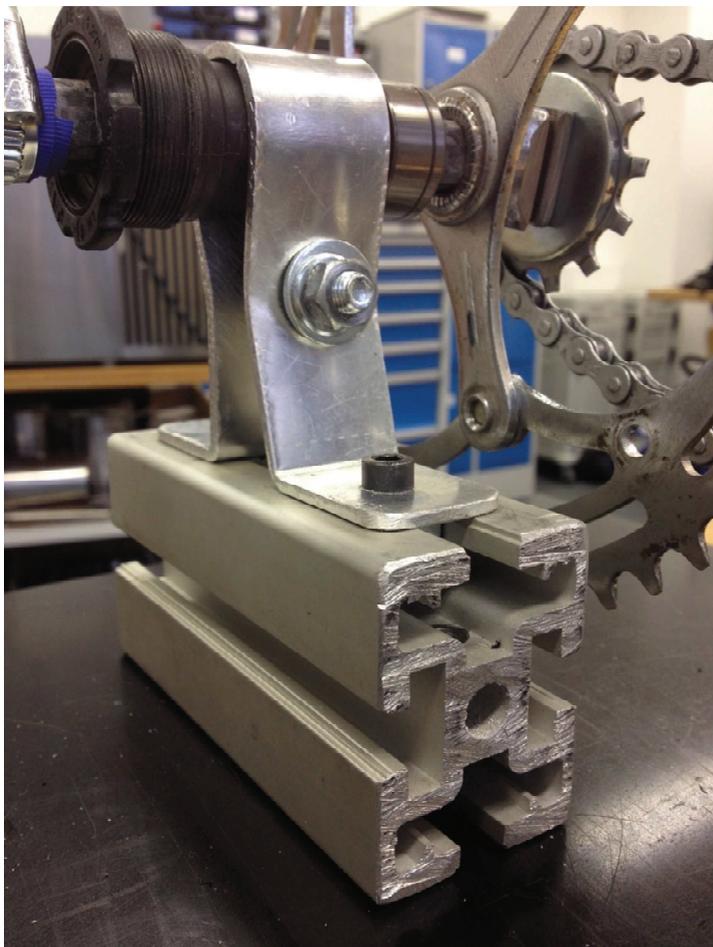


Abbildung 11: Halterung der Kettenräder

Felix Kary

Bei der Halterung der Kettenräder wurde ein ähnliches System wie bei dem Prisma für den Elektromotor gewählt. Von unten durch die Platte wurden Grundprofile mit eben dieser verbunden. Durch lockern der Schrauben lassen sich die Profile in einer Achse verschieben, was es uns ermöglicht, beide Übersetzungsstufen der Kettenräder zu realisieren. Außerdem lässt sich so die Kette spannen und es werden keine weitere Kettenspanner benötigt, sowie störende Schwingungen durch eine hängende Kette verhindert. Auf

den Profilen sind die Halter für die Lagerungen der ehemaligen Fahrradrettlager befestigt. Bei der Gestaltung der Halterungen haben wir uns von dem Vorgängermodell inspirieren lassen, beziehungsweise eine Halterung von dem alten Modell übernommen und eine Halterung aus einem Aluminiumblech nachgebaut. Durch lösen der Klemmschraube unterhalb der Rettlager werden diese aus ihrer Klemmung entlassen und können ausgetauscht werden. Beim Klemmen der Rettlager sollten die Wellen immer etwas gedreht werden, da ab einem bestimmten Punkt mit steigender Klemmkraft auch die Reibung in den Rettlagern steigt. Die Wellen in den Rettlagern haben Gewindebohrungen in beiden Wellenenden, jeweils M8 Feingewinde.

## 2.4 Kettenräder

Die Kettenräder haben auf der Seite der Haspel die Zähnezahlen 51 und 14, auf der Seite der elektrischen Maschine 36 und 26. Momentan ist die Kette auf der Kombination 26 und 14 aufgespannt, was eine Übersetzung von 1,86 von der Haspel zur elektrischen Maschine bedeutet. Die zweite mögliche Übersetzungsstufe ist 0,7 (siehe Abbildung 10). Diese war für den Fall gedacht, dass ein Elektromotor mit integriertem Getriebe bei dem Kraftwerk zum Einsatz kommen soll, der an der Motorwelle eine geringere Drehzahl und damit verbunden ein höheres Drehmoment benötigt. Auf die Übersetzungsstufen und ihre Bedeutung für die verschiedenen Motoren wird im Kapitel 4 noch weiter eingegangen.

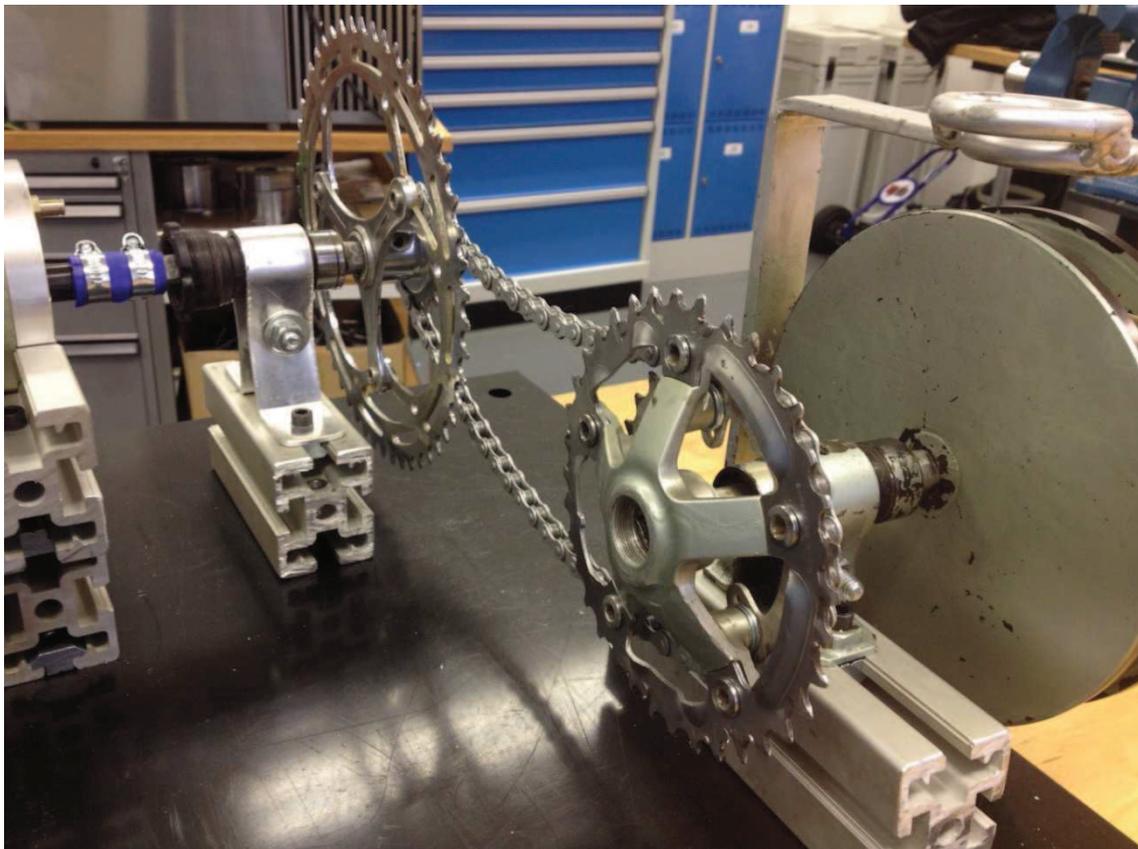


Abbildung 12: Kettenräder mit Kette

Für die zweite Übersetzungsstufe muss noch eine handelsübliche Fahrradkette mit der entsprechenden Länge zusammengesetzt werden. Die zwei anderen, theoretisch möglichen Übersetzungsstufen (14 mit 36 und 51 mit 26) sind nicht zu empfehlen, da die Kette hier sehr schräg laufen würde. Das bedeutet große Reibungsverluste und einen hohen Verschleiß an den Kettenrädern sowie der Kette.

Die Tretlager sind gekapselt, die Kette ist lackiert und die Kettenräder sind durch ihre Beschichtung auch gegen Korrosion geschützt.

## 2.5 Haspel

Die Haspel konnte aus dem Vorgängermodell übernommen werden. Sie besteht aus einer Kunststoffscheibe und hat einen effektiven Durchmesser von 12 cm. Auf dieser Scheibe wurde das Seil für den Drachen aufgewickelt. Die Haspel hat eine Durchgangsbohrung, mit deren Hilfe sie auf das Wellenende der Tretlagerwelle angebracht wird. Über der Haspel ist eine Führung für das Seil angebracht. Auf der anderen Seite der Haspel befindet sich eine Metallschiene, auf der ein Handgriff befestigt ist. Mit Hilfe dieses Handgriffes kann das Kraftwerk von Hand betrieben werden oder der Drachen gegeben Falls von Hand eingeholt werden. Die Grundhalterung wurde vom Vorgängermodell ebenfalls übernommen, nur die Anbindung an die Bodenplatte musste neu gestaltet werden. Die Führung ist dafür da, dass das Seil des Drachens sich nicht in den mechanischen Komponenten des Kraftwerkes verfängt, wenn der Wind sich dreht.



Abbildung 13: Haspel mit Führungsring

## 2.6 Akkumulator

Als Speichermedium für die produzierte elektrische Energie des Kraftwerkes wurde ein geschlossener Blei-Akkumulator gewählt. Diese Art der Akkumulatoren hat den Vorteil, dass sie komplett wartungsfrei betrieben werden können. Blei-Akkus haben seit Jahren Vormachtstellung auf dem Markt. Sie sind sehr robust und durchaus für einen Einsatz im Freien geeignet. Hinzu kommen der niedrige Preis und die Langlebigkeit dieser Akku-Typen. Einziger Nachteil ist das schlechte Verhältnis von Kapazität zu Kilogramm Ah / kg, welche im Vergleich zu anderen Akkumulatoren deutlich geringer ist. Die Vorteile der Blei-Akkus für dieses Kraftwerk überwiegen jedoch, also wird ein solches Modell als Speichermedium zum Einsatz kommen, voraussichtlich mit 12Volt und 7Amperestunden. [10]

## 2.7 Steuerung des Kraftwerks

An dieser Stelle ein knapper Umriss des Steuerungsaufwandes im Kraftwerk. Genauere Angaben und Erklärungen finden sich in den Studienarbeiten von den Elektrotechnikstudenten Marius Glasemann und Sergei Schwarzkopf.

Folgende Steuerungsaufgaben sind im Drachenkraftwerk verbaut: Die Klappstation am Drachen wird per Fernsteuerung angesteuert und muss den Drachen auf- und zuklappen. Die Punkte, an denen der Drachen auf- beziehungsweise zugeklappt wird sind empirisch zu ermitteln und in das Steuerungsprogramm des Kraftwerkes einzupflegen. Um diese Punkte zu ermitteln muss das Kraftwerk die Position des Drachen erkennen oder messen können. Hierzu wird ein Inkrementalgeber verwendet, der auf der Welle der Haspel sitzt. Dieser Inkrementalgeber wandelt die Drehbewegung der Welle in ein Signal um, welches die Recheneinheit des Kraftwerkes mit Hilfe des Durchmessers der Haspel in die Länge des ausgezogenen Seiles umrechnet. Im Programm sind dann die Zahlen hinterlegt, an denen der Drachen auf- oder zugeklappt wird.

Weitere Herausforderungen bestehen in der Steuerung und Regelung des Elektromotors, welcher gleichzeitig auch als Generator dient (je nach Betriebsmodus). Der Motor muss den zusammengeklappten Drachen mit einer bestimmten Geschwindig-

keit einziehen, abhängig vom Widerstand, den der Drachen dabei liefert (und damit direkt abhängig von der Windgeschwindigkeit). Auch beim Steigen des Drachen muss dieser eine bestimmte Geschwindigkeit haben, welche hier mit dem Widerstand des Generators, also mit der Last am Generator geregelt werden kann. Der produzierte Strom muss auf ein Niveau gebracht werden, mit dem man den vorhandenen Akkumulator laden kann (12V Akku; 14V Ladespannung). Auch der Strom, der in die Batterie fließt darf eine bestimmte Größe nicht übersteigen, da diese ansonsten Schaden nehmen kann. Die Laderegulung sowie die Steuerung und Regelung des Motors wird detailliert in der Studienarbeit von Sergei Schwarzkopf behandelt, die Fernsteuerung der Klappstation und die Positionsbestimmung des Drachens wird in der Arbeit von Marius Glasemann näher beleuchtet.[10]; [9]

Als Recheneinheiten verwendet jeder der beiden jeweils ein sogenanntes Arduino-board. Ein Arduino-board ist eine Plattform mit einem Microcontroller und verschiedenen analogen und digitalen Ein- und Ausgängen. Mit dieser Plattform lassen sich einfache Programmier- und Steuerungsaufgaben ausführen. [1]

## 2.8 Modularität des Prototyps

Bei dem Aufbau des Kraftwerkes wurde sehr viel Wert auf die Modularität und Vielfältigkeit der Anlage geachtet. Die Verwendung von Aluminiumprofilen ist ein Aspekt dieser Vielfältigkeit. Diese Alu-Profile sind standardisiert und dank Nutensteinen sehr leicht zu bedienen – selbst für Laien. Diese Profile lassen sich schnell zurechtschneiden und sind leicht zu bearbeiten. Die Anlage kann schnell erweitert oder umgebaut werden, falls das von Nöten sein sollte. Das Prisma für den Elektromotor lässt sich ebenfalls sehr einfach abändern oder neu bauen, für den Fall, dass ein neuer Elektromotor für das zurzeit eingesetzte Prisma zu groß oder zu klein ist. Die alten Fahrradzahnäder lassen sich schnell und einfach durch moderne Tretlager oder Zahnäder mit anderen Zähnezahlen und somit anderen Übersetzungen ersetzen.

## 2.9 Funktionsbeschreibung

### 2.9.1 Inbetriebnahme

Die Bodenstation wird auf den Bodengestellt. Wenn möglich so in die Richtung des Windes gedreht, dass die entstehende Reibung mit dem Führungsring des Seiles am geringsten ist. Bevor der Drachen an die Bodenstation gekoppelt wird, muss diese sicher mit dem Boden verankert werden. Ist das geschehen kann nun der Drachen mit der Klappstation an das Seil, welches auf der Haspel aufgerollt wurde, geknüpft werden. Wie in der Einleitung schon erwähnt kann es bei unserer Methode, das Drachenkraftwerk zu betreiben, zu Anlaufschwierigkeiten kommen. Bei kleinen Windgeschwindigkeiten in Bodennähe kann der Drachen nicht von alleine starten. Hier muss er entweder mit Hilfe eines Kraftfahrzeuges in die Windsicheren höhen gebracht werden (Pickup mit Ladefläche würde sich sehr gut eignen), oder eine Art Gasballon bringt den Drachen auf diese Höhe. Dieser muss nach dem Transport jedoch vom Drachen wieder entkoppelt werden, da sich dieser alleine in der Luft hält. Ist der Drachen auf Arbeitshöhe (300-800m) kann das Kraftwerk nun seine Produktion aufnehmen.

### 2.9.2 Betriebszyklus

Im eigentlichen, produzierenden Betrieb hat der Drachen 2 Betriebszustände: Strom produzieren, während der Drachen steigt und Strom verbrauchen, während der Drachen eingeholt wird. In diesem Beispiel beginnt der Drachen am unteren Ende seiner Arbeitshöhe und fängt mit dem Steigen an. Durch den kontinuierlichen Wind auf dieser Höhe zieht der Drachen an der Leine. Diese wiederum zieht an der Haspel, wo die lineare Kraft und in ein Drehmoment umgewandelt wird. Über die Achse wird dieses Drehmoment auf das gegenüberliegende Kettenrad übertragen. Hier wird das Drehmoment in eine Zugkraft in der Kette und dann wieder in ein Drehmoment am anderen Kettenrad umgewandelt. Schlussendlich dreht sich der Läufer des Elektromotors im Magnetfeld (aktuell: permanenterregt). Durch die Relativbewegung Läufer zu Magnetfeld kommt es in dem Läufer zu einem Stromfluss. Dieser Strom wird nun auf die benötigte Spannung transformiert und mit einem bestimmten Ladestrom in den Akkumulator eingespeist. Das alles passiert kontinuierlich während dem Steigen des Drachen. Die Leine auf der Haspel wickelt sich immer weiter ab. Der Inkremen-

talgeber registriert die Umdrehungen, welche die Haspel seit dem Beginn der Steigphase absolviert hat. Ab einem bestimmten (programmierten) Punkt wird die zweite Phase des Kraftwerkes initiiert. Das ist dann der Fall, wenn das Seil vollständig abgewickelt wurde, beziehungsweise der Drachen die obere Grenze des Arbeitsbereiches erreicht hat. Das Signal wird wieder über den Inkrementalgeber ausgelöst. Der Drachen wird vom Klappmechanismus zusammenklappt (genaue Beschreibung des Klappvorganges ist in der Studienarbeit von Schubert/Packeiser zu finden). Der Drachen steigt weiter während des Klappvorganges, damit der Servomotor in der Klappvorrichtung die nötige Kraft aufbringt, den Drachen zusammen zu klappen. Wurde die Fläche des Drachen verkleinert, wird die elektrische Maschine im Motorbetrieb angesteuert. Das bedeutet, es fließt Strom von der Batterie in den Läufer des Motors. Es entsteht ein Drehmoment, welches nun den Kraftfluss umgekehrt entlang wirkt und am Ende die Haspel antreibt, den Drachen wieder einzuziehen. Hierbei wird natürlich Strom verbraucht. Der Drachen wird wieder so lange eingezogen, bis das untere Ende der Arbeitshöhe erreicht ist und der Drachen von der Klappstation nun auf seine volle Größe entfaltet werden kann. Hier beginnt der Zyklus von vorne, der entfaltete Drache steigt und produziert erneut Strom.

### 2.9.3 Stopp des Kraftwerks

Um das Kraftwerk zu stoppen kann die elektrische Maschine von der Batterie abgekoppelt werden. Dabei muss die Haspel an ihrem Handgriff festgehalten werden, da der Drachen sonst durch den verringerten Widerstand wieder zu steigen beginnt. Mit dem Handrad lässt sich der Drache dann anschließend bis zum Boden herunterkurbeln.

## 2.10 Wirtschaftliche Betrachtung

In den Ausführungen von Schubert/Packeiser wurden die Kosten für ein Drachenkraftwerk zum damaligen Stand folgendermaßen aufgeschlüsselt:

Bodenstation:	625 €
Faltmechanismus:	205 €

1,8m<sup>2</sup> Drache inklusive Leine: 110 €

15m<sup>2</sup> Drachen inklusive Leine: 535 €

Die Kosten für den Faltmechanismus steigen in Falle der Anwendung des großen Drachen, da die Kräfte, welche auf den Servomotor im Klappmechanismus wirken, sehr viel größer sind, als beim 1,8m<sup>2</sup> Drachen. Auf welchen Betrag sich die Kosten für eine neue Klappstation allerdings belaufen wurde nicht weiter beleuchtet.

Nach der in diesem Bericht gewonnenen Erfahrung können die überschlägigen Rechnungen aus Schubert/Packeiser nun weiter verfeinert werden:

Die Kosten für eine elektrische Maschine, die der zur Zeit verbauten Maschine sehr ähnlich ist, liegt bei 30€ (100W).[19]

Damit sinken die Kosten für die Bodenstation um 170€, da bei Schubert/Packeiser der Dynastarter als elektrische Maschine vorgesehen war – welcher sich nach unseren Messungen und Berechnungen in einem viel zu hohen Leistungsniveau für den kleinen Sled-Drachen bewegt.

Die Bodenplatte aus PE kostete knapp 70€ bei der Firma Hema in Mannheim. Das sind 45€ mehr, als im Vorgängerbericht veranschlagt. Zusammenfassend sinken die Kosten der Bodenplatte für den Prototypen mit einer 100W Maschine und dem 1,8m<sup>2</sup> Drachen auf insgesamt 830€.

Die Kosten für eine leistungsfähigere Version dieses Prototypen mit einer 1kW Maschine und dem 15m<sup>2</sup> Drachen lassen sich folgendermaßen auflisten:

15m<sup>2</sup> Drache inklusive Leine: 535 €

1kW Maschine: 112€

Oder alternativ: Dynastarter: 200€

Die Anlage mit einem Dynastarter und einem Drachen, der sich auf dem selben Leistungsniveau befindet würde somit insgesamt 1565 € kosten. Die Variante mit dem günstigeren Motor aus China kostet 1477€.

### 3 Leistungsanforderungen

Die Bodenstation des Drachenkraftwerkes stellt, vor Flugdrachen und Einklappvorrichtung, die wichtigste Komponente mit der höchsten Komplexität des gesamten Kraftwerksystems dar. Von der Bodenstation aus wird der Drache kontrolliert und gesichert und die Einklappvorrichtung angesteuert. Das heißt, an der Bodenstation muss die Seillänge gemessen und ausgewertet werden. Außerdem wird mithilfe eines Generators die mechanische Windenergie, die der Drache aufnimmt, in elektrische Energie umgewandelt und anschließend in einem Akkumulator gespeichert. Genauso wird ein elektrischer Motor in der Bodenstation benötigt, welcher den Drachen nach erfolgreichem Einklappen in der Sinkphase herunter zieht. Die benötigte Energie zum Einholen des Drachens wird den Akkumulatoren entnommen und sollte unter der während des Steigvorgangs produzierten Energie liegen, um eine positive Bilanz und somit eine Energiegewinnung zu gewährleisten.

Neben grundlegenden Forderungen wie Wetter-Beständigkeit und Betriebssicherheit spielen die zu erwartenden Leistungen in Steig- und Sinkflug die zentrale Rolle bei der Auslegung der Komponenten in der Bodenstation. Daher erfolgen in diesem Kapitel Leistungsberechnungen und Abschätzungen, um eine passende Auswahl der Komponenten, insbesondere der elektrischen Maschinen, und somit einen hohen Wirkungsgrad zu ermöglichen.

#### 3.1 Berechnungsgrundlagen

Da der Bereich der Energiegewinnung aus Drachenkraftwerken erst seit wenigen Jahren Aufmerksamkeit von Wissenschaft und Wirtschaft erhält, bestehen kaum auswertbare Versuchsdaten zu den Zugkräften von verschiedenen Drachentypen. Mithilfe einiger Vereinfachungen und auf Grundlage einer Ausarbeitung von Herrn Dr. Franetzki können in der Studienarbeit Schubert/Packeiser aber dennoch wichtige mathematische Zusammenhänge zwischen Zugkraft, Drachengröße und Leistung hergestellt werden. Diese Erkenntnisse werden, ohne Herleitung, auch in dieser

Studienarbeit zur Leistungsberechnung genutzt. Dazu werden im Folgenden wichtige mathematische Formeln eingeführt.

Die mechanische Leistung, die der Drache im Flug auf das Seil überträgt, lässt sich mit Formel (1) [13] beschreiben:

Mechanische Leistung am Seil: 
$$P = \frac{1}{2} * \delta * c_w * A * (w - u)^2 * u \quad (1)$$

Aufgrund der nicht vorhandenen Werte zu den verfügbaren Drachenmodellen wurde ein spezifischer Drachenbeiwert  $z$  eingeführt [13]:

$$z = \frac{1}{2} * \delta * c_w \quad (2)$$

Dadurch ergibt sich die Drachenleistung zu [13]:

$$P = z * A * (w - u)^2 * u \quad (3)$$

Der  $Z$ -Wert kann aus Seilkraft, Drachenfläche und Windgeschwindigkeit errechnet werden [13]:

$$Z = \frac{F_s}{A * w^2} \quad (4)$$

Des Weiteren wurde durch Differenzierung der Leistungsformel (3) ein Verhältnis für die theoretische Maximalleistung während der Steigphase entwickelt, welche bei einem Verhältnis  $\frac{u}{w} = \frac{1}{3}$  zu erwarten ist [13]:

Maximalleistung: 
$$P_{max} = z * A * \frac{4}{27} w^3 \quad (5)$$

$\delta = \text{Luftdichte}$

$c_w = \text{Luftwiderstand}$

$A = \text{Drachenfläche}$

$w = \text{Windgeschwindigkeit}$

$u = \text{Drachengeschwindigkeit}$

$F_s = \text{Seilkraft}$

Um nun Leistungen bei bestimmten Windgeschwindigkeiten und Drachengrößen berechnen zu können, muss der spezifische Z-Wert eines Drachens ermittelt werden. Da dieser über Formel (4) berechnet werden kann, gilt es, die Fläche eines Drachens, sowie die Zugkraft bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit zu messen. [13]

### 3.2 Ermittlung des Z-Werts

Um zu verschiedenen Drachen, deren Flächen bekannt sind, die entsprechenden Zugkräfte bei einer konstanten Windgeschwindigkeit zu messen, wurden im Rahmen dieser Studienarbeit Freiluftversuche nach dem Vorbild von Schubert/Packeiser durchgeführt. Dabei wurde der Drachen an einer Kofferwaage befestigt und von einem Auto aus gestartet. In dem unten stehenden Bild ist eine Skizze des Versuchsaufbaus zu erkennen.

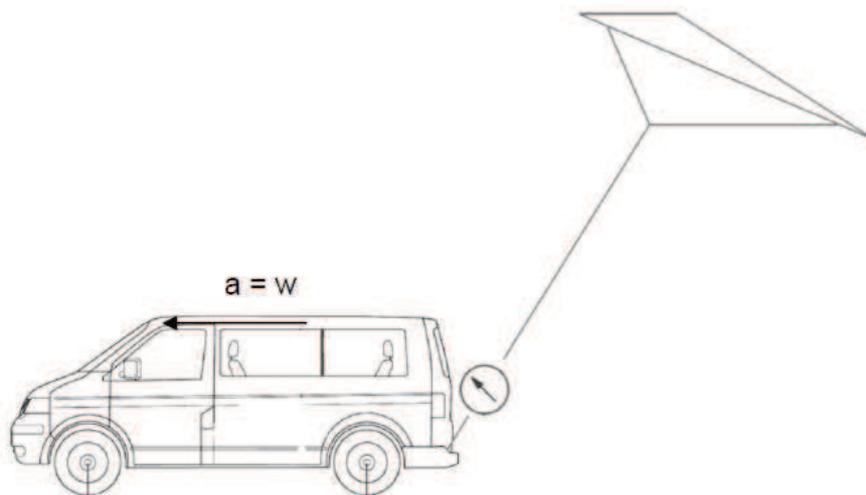


Abbildung 14: Versuchsaufbau Z-Wert-Ermittlung, Quelle: [13]

Bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 20 km/h (5,56 m/s) wurden die Zugkräfte des Drachens in und gegen die Windrichtung gemessen. Durch das anschließende Mittelwert-Bilden der beiden Werte kann der Störfaktor des Umgebungswindes eliminiert werden und man erhält die Zugkraft des Drachens bei 20 km/h Windgeschwindigkeit, die durch das Fahren simuliert wird. Aus Zugkraft, Windgeschwindigkeit und Fläche kann nach Formel (4) der Z-Wert ermittelt werden. [13]

Mithilfe dieses Verfahrens wurden die Z-Werte drei verfügbarer Drachen ermittelt.

Der OKD Delta ist ein einfacher Drache in Dreiecksform mit lediglich einem Seil und steht sehr ruhig und kontrolliert in der Luft. Allerdings stellt er aufgrund der kleinen Fläche und der windschnittigen Form nur eine geringe Zugkraft zur Verfügung.



Abbildung 15: OKD Delta, Quelle: <http://www.drachenforum.net>

Der Power-Sled hat die Form eines Rochens. Der Versuch wurde mit zwei verschiedenen großen Drachen des Typs Power-Sled durchgeführt. Zur Kontrolle in der Luft sind 3 bzw. 5 Schnüre (bei dem größeren Drachen) notwendig. Die durch Schubert/Packeiser entwickelte Einklappvorrichtung wurde für den kleinen Rochen entworfen.



Abbildung 16: Power-Sled, Quelle: <http://www.fly-high.com>

Die Ergebnisse der Versuche lassen sich, mit den entsprechenden Z-Werten, der unten stehenden Tabelle entnehmen. Die in Kilogramm gemessenen Zugkräfte wurden entsprechend der Erdbeschleunigung von aufgerundet 10m/s<sup>2</sup> in Newton umgerechnet.

Drachentyp	Fläche	Ø Zugkraft bei 20km/h	Z-Wert
OKD Delta	1,5m <sup>2</sup>	1,1 kg ≙ 11N	0,24 $\frac{kg}{m^3}$
Power-Sled klein	1,81m <sup>2</sup>	2,7 kg ≙ 27N	0,48 $\frac{kg}{m^3}$
Power-Sled groß	4m <sup>2</sup>	4,3 kg ≙ 43N	0,35 $\frac{kg}{m^3}$

Tabelle 1: Z-Werte der untersuchten Drachen

Da die erbrachte mechanische Leistung des Drachen linear mit dem Z-Wert steigt (siehe Formel (3)), ist ein Drache mit einem möglichst großen Z-Wert auszuwählen. Der OKD Delta weist, wie zu erwarten, den geringsten Z-Wert auf. Die Bauform des Power-Sleds schneidet deutlich besser ab. Überraschend ist jedoch, dass der große und kleine Power-Sled verschiedene Z-Werte haben. Der kleinere Z-Wert des größeren Rochens könnte möglicherweise auf das höhere Eigengewicht und das veränderte Flugverhalten aufgrund der 5 Seile zurückzuführen sein. Bei dem großen Power-Sled trat außerdem das Problem auf, dass er bei niedrigeren Windgeschwindigkeiten kaum zu starten und während des Fluges schwer zu kontrollieren war.

Aufgrund des sicheren, stabilen Flugverhaltens sowie des mit Abstand besten Z-Wertes wurde der kleine Power-Sled für den konzeptionellen Aufbau der Bodenstation ausgewählt. Des Weiteren wurde die Einklappvorrichtung von Schubert/Packeiser für diesen Drachen entwickelt und eine Überarbeitung dieser Vorrichtung erübrigt sich.

Bei den dargestellten Z-Werten ist allerdings zu berücksichtigen, dass diese ohne eine montierte Einklappvorrichtung ermittelt wurden. Da diese aber während des Betriebes mit dem Drachen in der Luft ist und ein zu beachtendes Eigengewicht aufweist, sollte dies dennoch bei der groben Leistungsberechnung berücksichtigt werden. Um den Einfluss der Einklappvorrichtung auf den Z-Wert zu bestimmen, wird die Gewichtskraft der Vorrichtung von ca. 400g einfachheitshalber von der Zugkraft des Rochens abgezogen. So ergibt sich eine Zugkraft von

$F = 27N - 4N = 23N$  und ein Z-Wert (3) von

$$z = \frac{23N}{1,81m^2 * (5,56m/s)^2} = 0,412 \frac{kg}{m^3}$$

Von diesem Z-Wert wird bei den nachfolgenden Leistungsberechnungen für die Steigphase des Drachens ausgegangen.

### 3.3 Leistungsberechnungen

#### 3.3.1 Steigphase

Mithilfe der Formel (5)  $P_{max} = z * A * \frac{4}{27} w^3$  kann nun die theoretisch maximale Leistung des Drachens berechnet werden, welche bei dem optimalen Verhältnis von Steig- zu Windgeschwindigkeit  $\frac{u}{w} = \frac{1}{3}$  zu erwarten ist. Die so errechneten Leistungen während der Steigphase, abhängig von Drachenfläche A und Windgeschwindigkeit w, sind in untenstehender Matrix aufgetragen.

Windgeschw.		Fläche								LEISTUNG / WATT
Beaufort	m/s	1 m <sup>2</sup>	1,81 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>	4 m <sup>2</sup>	5 m <sup>2</sup>	7 m <sup>2</sup>	11 m <sup>2</sup>	15 m <sup>2</sup>	
0	0,1	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0,9	0	0	0	0	0	0	0	1	
2	2,5	1	2	3	4	5	7	10	14	
3	4,5	6	10	17	22	28	39	61	83	
20kmh	5,56	10	19	31	42	52	73	115	157	
4	7,2	23	41	68	91	114	159	250	341	
5	10	61	110	183	244	305	427	671	915	
6	12,5	119	216	357	477	596	834	1310	1787	
7	15,5	227	411	681	909	1136	1590	2498	3407	
8	19	418	757	1255	1673	2092	2929	4602	6275	
9	22,7	713	1291	2140	2854	3567	4994	7848	10702	
10	26,5	1135	2055	3405	4540	5675	7946	12486	17026	
11	31	1817	3289	5451	7268	9085	12720	19988	27256	
12	35	2615	4733	7845	10461	13076	18306	28767	39227	

Tabelle 2: Leistungen während der Steigphase

Bei dem Power-Sled von 1,81m<sup>2</sup>, dessen aus dem Versuch ermittelter Z-Wert zu dieser Berechnung herangezogen wird und nach dessen Leistung die Bodenstation ausgelegt werden soll, ergibt sich bei dem durchschnittlichen Höhenwind von 4,5 m/s eine Leistung von 10 Watt. Diese Leistung ist theoretisch während der Steigphase im gleichmäßigen Höhenwind zu erwarten. Weiterhin lässt sich durch den tabellarischen Auftrag der Einfluss der Windgeschwindigkeit quantifizieren. Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Leistung mit dem Faktor  $w^3$  und so entstehen bereits bei leicht höheren Windgeschwindigkeiten signifikant höhere Leistungen. Der lineare Einfluss der Fläche erhöht die Leistung im Vergleich nur geringfügig. So würde ein Power-Sled mit 15m<sup>2</sup> und einem annähernd gleichen Z-Wert wie der getestete Drachen eine

Grundleistung von ca. 83 Watt liefern. Der blau hinterlegte Bereich zeigt die Leistungen in dem Bereich von Windgeschwindigkeiten um 4,5 m/s, welche vorzugsweise auch aufgenommen und verwertet werden sollten, da nicht permanent von einem konstanten Wind ausgegangen werden kann. Eine wichtige Erkenntnis ist aber bereits, dass sich bei dem gleichmäßigen Höhenwind von 4,5 m/s, auch im optimalen Betriebspunkt und mit einem wesentlich größeren Drachen von 15m<sup>2</sup> lediglich Leistungen im Bereich von knapp 100 Watt erzeugen lassen. Nur durch die Auslegung des Kraftwerks auf höhere Windgeschwindigkeiten und die Nutzung dieser lassen sich Leistungen im Kilowatt-Bereich erreichen. Dennoch wird es im Rahmen dieser Studienarbeit für sinnvoll erachtet, mithilfe der vorhandenen Mittel das Konzept für ein Kleinkraftwerk im Bereich von wenigen Watt zu erarbeiten, welches einfach auf größere Leistungen zu erweitern sein sollte.

Um die erzeugte mechanische Leistung elektrisch speichern und nutzen zu können, muss diese mit einer elektrischen Maschine umgewandelt werden. Um abschätzen zu können, welches Drehmoment und welche Drehzahl durch diese Leistung an einem Generator erzeugt werden können, werden mithilfe der Formel [7]

$$P = 2\pi * M * n \quad (6)$$

entsprechende Werte errechnet.

*M = Drehmoment*

*n = Drehzahl*

Die errechneten Drehmomente (in mNm) zu den blau hinterlegten Leistungswerten (s. Tabelle 2) des 1,81m<sup>2</sup> Drachens im Bereich von 2,5 – 7,2 m/s lassen sich, abhängig von der gewählten Drehzahl, der nachstehenden Tabelle entnehmen.

Drehzahl		Leistung				Drehmoment / mNm
1/min	1/s	2 W	10 W	19 W	41 W	
100	1,67	164,7	960,7	1807,7	3934,9	
200	3,33	82,4	480,3	903,8	1967,5	
300	5,00	54,9	320,2	602,6	1311,6	
500	8,33	32,9	192,1	361,5	787,0	
1000	16,67	16,5	96,1	180,8	393,5	
2000	33,33	8,2	48,0	90,4	196,7	
3000	50,00	5,5	32,0	60,3	131,2	
5000	83,33	3,3	19,2	36,2	78,7	
6000	100,00	2,7	16,0	30,1	65,6	
7000	116,67	2,4	13,7	25,8	56,2	
8000	133,33	2,1	12,0	22,6	49,2	
9000	150,00	1,8	10,7	20,1	43,7	
10000	166,67	1,6	9,6	18,1	39,3	
11000	183,33	1,5	8,7	16,4	35,8	

Tabelle 3: Drehmomente während der Steigphase

Aus der Tabelle lässt sich erkennen, dass mit einer Leistung von 10 Watt bei einer sehr geringen Drehzahl von 100/min etwa knapp 1 Nm zu erwarten ist. Bei höheren, realistischeren Generator-Drehzahlen ist allerdings nur ein Drehmoment im mNm-Bereich zu erwarten. Die Ergebnisse dieser Berechnung werden bei der konkreten Generatorauslegung im Kapitel 4 „Die elektrische Maschine“ erneut aufgegriffen und behandelt.

### 3.3.2 Sink- / Rückholphase

Von Bedeutung für die Auslegung der Bodenstation ist auch die erzeugte Leistung des Drachens während der Sinkphase. Gesucht wird also die mechanische Leistung, die von einem elektrischen Motor aufgebracht werden muss, um den eingeklappten Drachen herunterzuziehen. Die benötigte mechanische Leistung kann mit Formel (3) ausgerechnet werden, allerdings wird diese in der Form

$$P = z * A * (w + u)^2 * u \quad (7)$$

verwendet. Da die Drachengeschwindigkeit nun gegen die Windgeschwindigkeit arbeitet, werden beide Werte addiert und nicht, wie zuvor in der Steigphase, subtra-

hiert. Neben Z-Wert und Fläche des eingeklappten Drachen wird zu der Berechnung der Leistung bei einer bestimmten Windgeschwindigkeit außerdem die Geschwindigkeit benötigt, mit der der Drache eingezogen wird. Da Z-Wert und Fläche des kleinen Power-Sleds innerhalb der Arbeit Schubert/Packeiser bereits experimentell ermittelt wurden, können diese Werte übernommen werden. Dort werden folgende Werte angeführt, mit denen auch hier gerechnet wird [13]:

$$Z = 0,0459 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{und} \quad A = 0,34 \text{ m}^2$$

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Drache eingezogen wird hängt von der Drehzahl des Motors ab. Schubert/Packeiser entwickeln jedoch mathematisch das optimale Verhältnis von Steig- zu Sinkgeschwindigkeit, bei dem während eines Zyklus die maximale Differenz zwischen erzeugter Leistung während der Steigphase und verbrauchter Leistung während der Sinkphase entsteht. So wird die gesamte Nutzleistung in Abhängigkeit von diesem Verhältnis dargestellt (Herleitung s. Schubert/Packeiser S. 54/55) [13]:

$$P_{ges} = \frac{\frac{4}{9} * z_1 * A_1 - z_2 * A_2 * \left(1 + \frac{\gamma}{3}\right)^2}{1 + \frac{1}{\gamma}} * \frac{1}{3} w^3 \quad (8)$$

$$\gamma = \text{Verhältnis} \frac{\text{Sinkgeschwindigkeit}}{\text{Steiggeschwindigkeit}}$$

*Phase 1 = Steigphase ; Phase 2 = Sinkphase*

Bei der Extremwertberechnung erhält man nach dem Differenzieren und Nullsetzen dieser Gleichung folgenden Term [13]:

$$0 = \frac{\frac{4}{9} * z_1 * A_1 - z_2 * A_2 * \left(1 + \frac{\gamma}{3}\right)^2}{\gamma^2} - \frac{2 * z_2 * A_2 * \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \left(\frac{\gamma}{3} + 1\right)}{3} \quad (9)$$

Dieser liefert in Schubert/Packeiser ein optimales Einholverhältnis von  $\gamma = 2,48$  [13]. Allerdings wurde im Rahmen dieser Studienarbeit ein anderer Z-Wert des ausgeklappten Drachens als in Schubert/Packeiser ermittelt.

Durch Einsetzen der hier verwendeten Werte:

$$z_1 = 0,412 \text{ kg/m}^3, \quad A_1 = 1,81 \text{ m}^2, \quad z_2 = 0,0459 \text{ kg/m}^3, \quad A_2 = 0,34 \text{ m}^2$$

erhält man folgendes Polynom:

$$0,00345 * \gamma^4 + 0,0156 * \gamma^3 + 0,0208 * \gamma^2 - 0,3158 * \gamma = 0$$

Die Berechnung der Nullstellen (mithilfe von <http://www.arndt-bruenner.de>) liefert ein reales Ergebnis von  $\gamma = 3,09$ . Dieses optimale Verhältnis von Steig- zu Sinkgeschwindigkeit bedeutet, dass, um die maximale Leistungsbilanz zu erhalten, der Drache mit dem 3,1-fachen der Steiggeschwindigkeit eingeholt werden muss.

Diese Erkenntnis kann nun genutzt werden, um die benötigte Leistung im Motorbetrieb bei der optimalen Einholgeschwindigkeit zu ermitteln. Die entsprechenden Leistungswerte des eingeklappten Drachens, die sich so durch Formel (7) bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und der entsprechend optimalen Sinkgeschwindigkeit ergibt, sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

Windgeschw.		Fläche 0,34 m <sup>2</sup>	LEISTUNG / WATT
Beaufort	m/s		
0	0,1	0,0	
1	0,9	0,0	
2	2,5	1,0	
3	4,5	6,1	
20kmh	5,56	11,4	
4	7,2	24,9	
5	10	66,7	
6	12,5	130,2	
7	15,5	248,3	
8	19	457,3	
9	22,7	779,9	
10	26,5	1240,8	
11	31	1986,3	
12	35	2858,6	

Tabelle 4: Leistungen während der Rückholphase

Die geringere Fläche und der geringere Z-Wert verringern die durch den Drachen erzeugte Leistung im Vergleich zur Steigphase. Durch die höhere Drachengeschwindigkeit, welche zudem gegen den Wind arbeitet, fällt die benötigte Leistung von 6,1 Watt (im Arbeitspunkt bei einer Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s) im Vergleich zu der erzeugten Steigleistung von 10 Watt relativ hoch aus. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass die Sinkphase wesentlich kürzer ist als die Steigphase und so ein deutliches Plus an Energie zu erzeugen sein sollte.

Um, wie im Generatorbetrieb, die Verhältnisse von Drehzahl und Drehmoment im Motorbetrieb während der Sink- bzw. Rückholphase einzuschätzen, werden mithilfe von Formel (6) zu verschiedenen Drehzahlen und Leistungen Drehmomente errechnet. Auch hier werden die Leistungen im Bereich von 2,2 – 7,2 m/s Windgeschwindigkeit betrachtet.

Drehzahl		Leistung				Drehmoment / mNm
1/min	1/s	1 W	6 W	11 W	25 W	
100	1,67	99,5	580,2	1091,7	2376,4	
200	3,33	49,7	290,1	545,8	1188,2	
300	5,00	33,2	193,4	363,9	792,1	
500	8,33	19,9	116,0	218,3	475,3	
1000	16,67	9,9	58,0	109,2	237,6	
2000	33,33	5,0	29,0	54,6	118,8	
3000	50,00	3,3	19,3	36,4	79,2	
5000	83,33	2,0	11,6	21,8	47,5	
6000	100,00	1,7	9,7	18,2	39,6	
7000	116,67	1,4	8,3	15,6	33,9	
8000	133,33	1,2	7,3	13,6	29,7	
9000	150,00	1,1	6,4	12,1	26,4	
10000	166,67	1,0	5,8	10,9	23,8	
11000	183,33	0,9	5,3	9,9	21,6	

Tabelle 5: Drehmomente während der Sinkphase

Logischerweise entstehen bei den geringeren Leistungen in der Sinkphase auch geringere Drehmomente, welche in diesem Fall von einem Elektromotor aufgebracht werden müssen. Auf diese Ergebnisse kann bei der Maschinenauslegung zurückgegriffen werden.

### 3.4 Ungenauigkeiten

Im praktischen Betrieb können nie die genau optimalen Verhältnisse und Betriebspunkte erreicht werden. Auch bei den experimentell ermittelten Werten ist von Ungenauigkeiten auszugehen. Diese bestehenden Ungenauigkeiten bei der Leistungsbeziehung werden im Folgenden besprochen und bewertet.

Die durchgeführten Berechnungen stützen sich auf den Z-Wert, der zuvor experimentell ermittelt wurde. Bei dem beschriebenen Versuchsaufbau, in welchem mithilfe eines Kraftfahrzeugs die Windgeschwindigkeit simuliert und mithilfe einer Kofferwaa-

ge die Zugkräfte der Drachen aufgezeichnet wurden, kommt es bereits zu kaum quantifizierbaren Ungenauigkeiten der Versuchsparameter.

Die Zugkräfte wurden bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h aufgezeichnet. Bei Geschwindigkeitsmessgeräten ist allerdings gesetzlich eine Voreilung von 10% zuzüglich 4 km/h zulässig [18]. Dies würde bei einer Anzeige von 20 km/h eine tatsächliche Geschwindigkeit von 14 km/h ermöglichen. Bei so geringen Geschwindigkeiten kann jedoch eher von einer geringeren Voreilung ausgegangen werden, welche sich im Bereich von 5 – 10% bewegt. Bei der Annahme, dass die Zugkräfte im Versuch tatsächlich bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 18 km/h aufgezeichnet wurden, würde sich der Z-Wert nach Formel (4) erhöhen. In diesem Fall ergäbe sich ein Z-Wert von ca. 0,51 kg/m<sup>3</sup>. Dadurch erhöht sich die Leistung während der Steigphase von 10 Watt auf 12 Watt (bei dem Drachen mit 1,81m<sup>2</sup> und einer Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s). Dies ist eine Leistungserhöhung von ca. 20%, welche insbesondere im Bereich von höheren Windgeschwindigkeiten zu berücksichtigen ist.

Bei dem Versuch zur Zugkraftermittlung wird von einer gleichmäßigen Fahrt- bzw. Windgeschwindigkeit ausgegangen. Eventuelle Böen, welche zu einer Erhöhung der gemessenen Zugkraft und somit einem zu großen Z-Wert beitragen, können nicht quantifiziert werden.

Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Kofferwaage, welche für diesen Versuch zweckentfremdet wurde. Es ist allerdings keine zu große Ungenauigkeit der Kofferwaage zu erwarten. Außerdem hat die ermittelte Zugkraft nach Formel (4) lediglich einen linearen Einfluss auf den Z-Wert und die Toleranz der Kofferwaage im Vergleich zu dem Geschwindigkeitsmessgerät im Kraftfahrzeug daher nur geringe Bedeutung.

Neben Zugkraft und Windgeschwindigkeit ist der Z-Wert nach Formel (4) auch von der Drachenfläche abhängig. Da ein Ausmessen der tatsächlich genutzten Fläche bei einem Power-Sled sich aufgrund der Bauweise schwierig gestaltet, ist auch hier von Ungenauigkeiten auszugehen. Dies trifft insbesondere auf den Z-Wert des zusammengeklappten Drachen zu. Allerdings kann auch hier der lineare Einfluss der Flächenungenauigkeit auf Z-Wert und Leistung nicht quantifiziert werden.

Schließlich wurde bei der Z-Wert-Berechnung die Gewichtskraft der Einklappvorrichtung von der Zugkraft des Drachens abgezogen. Auch hier wird der tatsächliche Z-Wert und somit die Leistung des Drachen verändert.

Nachdem bei dem Z-Wert aufgrund der ungenauen Versuchsp Parameter lediglich von einer Kenngröße im Bereich von ca. 0,3 – 0,5 kg/m<sup>3</sup> auszugehen ist, sind bei der konkreten Leistungsberechnung weitere Toleranzen zu berücksichtigen. So liefert die Berechnung der Leistung nach Formel (5) (Steigphase) bzw. Formel (3) (Sinkphase) in der Theorie eindeutige Werte, von denen allerdings in der Praxis nicht auszugehen ist. Bei der Berechnung der Leistung während der Steigphase wird von einer optimalen Drachengeschwindigkeit ausgegangen. Bei der Berechnung der Leistung während der Rückholphase und der gesamten Nutzleistung während einem Zyklus wird auch eine optimale Sinkgeschwindigkeit vorausgesetzt. Es muss davon ausgegangen werden, dass diese Anforderungen an die Drachengeschwindigkeit im Rahmen eines kostengünstigen Kleinkraftwerks technisch nur begrenzt umsetzbar sind. Daher ist es zielführend, die Leistungsabweichungen bei suboptimalen Verhältnissen einzuschätzen, um dadurch Prioritäten bei dem technischen Aufbau setzen und in diesem Zuge Kosteneffizienz und Betriebssicherheit fördern zu können.

Im Folgenden werden Leistungswerte zu unterschiedlichen Drachengeschwindigkeiten betrachtet. Dabei wird wie zuvor von dem 1,81m<sup>2</sup> Power-Sled mit einem Z-Wert von 0,412 kg/m<sup>3</sup> ausgegangen. Während der Steigphase beträgt die optimale Geschwindigkeit des Drachen ein Drittel der jeweiligen Windgeschwindigkeit. In der untenstehenden Tabelle sind Leistungsdaten von abweichenden Verhältnissen der Steiggeschwindigkeit ( $u_1$ ) zu der Windgeschwindigkeit ( $w$ ) aufgetragen.

Windgeschw.		Verhältnis: $u_1$ als Vielfaches von $w$						LEISTUNG / WATT
Beaufort	m/s	1/10	1/5	1/3	1/2	2/3	5/6	
0	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1	0,9	0,04	0,07	0,08	0,07	0,04	0,01	
2	2,5	0,94	1,49	1,72	1,46	0,86	0,27	
3	4,5	5,50	8,69	10,06	8,49	5,03	1,57	
20kmh	5,56	10,35	16,36	18,93	15,97	9,47	2,96	
4	7,2	22,53	35,60	41,21	34,77	20,60	6,44	
5	10	60,36	95,39	110,40	93,15	55,20	17,25	
6	12,5	117,89	186,30	215,62	181,93	107,81	33,69	
7	15,5	224,78	355,20	411,12	346,88	205,56	64,24	
8	19	414,02	654,25	757,23	638,92	378,62	118,32	
9	22,7	706,05	1115,73	1291,36	1089,58	645,68	201,77	
10	26,5	1123,30	1775,09	2054,50	1733,49	1027,25	321,02	
11	31	1798,22	2841,63	3288,93	2775,03	1644,46	513,89	
12	35	2587,99	4089,66	4733,40	3993,81	2366,70	739,59	

Tabelle 6: Einfluss der Steiggeschwindigkeit auf die Leistung

Bei dem optimalen Verhältnis von  $u_1/w = 1/3$  liefert der Drachen stets die maximale Leistung. Nun werden die Leistungswerte bei einer Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s betrachtet. Während die Verluste von etwa 1,5 Watt in den anliegenden Spalten bei den Verhältnissen 1/5 und 1/2 als noch vertretbar erscheinen, nimmt die Leistung bei einem wesentlich größer oder kleinerem Verhältnis deutlich ab. Es ist also unbedingt notwendig, dass der Drachen annähernd mit einer Geschwindigkeit von 33% der Windgeschwindigkeit steigt, um nicht zu große Leistungsverluste zu verzeichnen.

Auch für die Sink- bzw. Rückholgeschwindigkeit ( $u_2$ ) wurde ein optimaler Wert ermittelt, welcher im Verhältnis zur Steiggeschwindigkeit ( $u_1$ ) dargestellt wird. Bei einem Verhältnis von  $u_2/u_1 = 3,1$  wird die gesamte Nutzleistung während eines Arbeitszyklus maximal. In der nachstehenden Tabelle sind die Nutzleistungen bei verschiedenen Verhältnissen dargestellt.

Windgeschw.		Verhältnis: $u_2$ als Vielfaches von $u_1$						LEISTUNG / WATT
Beaufort	m/s	0,5	1	2	3,1	4	5	
0	0,1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
1	0,9	0,03	0,04	0,05	0,05	0,05	0,04	
2	2,5	0,54	0,79	1,00	1,05	1,03	0,96	
3	4,5	3,14	4,61	5,83	6,13	5,99	5,58	
20kmh	5,56	5,91	8,68	10,98	11,53	11,27	10,50	
4	7,2	12,86	18,89	23,89	25,11	24,53	22,86	
5	10	34,47	50,61	64,02	67,27	65,72	61,24	
6	12,5	67,32	98,86	125,04	131,39	128,37	119,60	
7	15,5	128,35	188,48	238,40	250,50	244,75	228,04	
8	19	236,40	347,16	439,10	461,40	450,80	420,03	
9	22,7	403,15	592,04	748,82	786,86	768,78	716,30	
10	26,5	641,39	941,92	1191,35	1251,87	1223,10	1139,61	
11	31	1026,76	1507,86	1907,16	2004,04	1957,98	1824,33	
12	35	1477,71	2170,10	2744,77	2884,20	2817,92	2625,56	

Tabelle 7: Einfluss der Rückholgeschwindigkeit auf die Leistung

Das Verhältnis von  $u_2/u_1 = 3,1$  ergibt, wie zu erwarten, die größten Leistungswerte. Bei der Betrachtung der Leistungen bei 4,5 m/s fallen jedoch keine allzu extremen Unterschiede auf. Selbst wenn der Drachen mit dem 2-, 4-, oder 5-fachen der Steiggeschwindigkeit eingeholt wird, sind lediglich Leistungsverluste von wenigen Zehntel-Watt zu erwarten. Hier lässt sich vermerken, dass nicht zwangsläufig eine 3-fache Einholgeschwindigkeit benötigt wird, sondern beispielsweise auch eine 2-fache an-

nähernd die maximale Nutzleistung liefert. Dies sollte bei der Maschinenauslegung berücksichtigt werden.

Abschließend zu dieser ausführlichen theoretischen Leistungsbetrachtung des Drachenkraftwerks stellt sich die Frage nach Wirkungsgradverlusten und der tatsächlichen Leistungsbilanz. Sowohl die Ungenauigkeiten bei der Z-Wert-Ermittlung, als auch Verluste bei der Umwandlung der Energie mit einer elektrischen Maschine und durch ein möglicherweise benötigtes Getriebe können nicht exakt genug vorhergesagt werden. Es kann aber ein minimaler Wirkungsgrad des gesamten Systems berechnet werden, bei dem gerade noch eine positive Leistungsbilanz entsteht. Dazu werden die erzeugten bzw. benötigten Energien während Steig- und Sinkphase gegenübergestellt.

Die während der Steigphase produzierte Energie beträgt:

$$E_1 = P_1 * t_1 * \eta_1 \quad (10)$$

$\eta = \text{Wirkungsgrad}$  ;  $t = \text{Zeit}$

Während der Rückholphase beträgt die benötigte Energie:

$$E_2 = \frac{P_2 * t_2}{\eta_2} \quad (11)$$

Ein Wirkungsgrad von unter 100% verringert die erzeugte Energie während Phase 1 und erhöht die benötigte Energie während Phase 2.  $E_1 = E_2$  würde bedeuten, dass die produzierte Energie durch Rückholphase und Wirkungsgradverluste konsumiert wird und keine überschüssige Energie zur Speicherung vorhanden ist.

$$E_1 \geq E_2 \rightarrow P_1 * t_1 * \eta_1 \geq \frac{P_2 * t_2}{\eta_2} \quad (12)$$

Für diese Berechnung werden nun die zuvor errechneten Leistungswerte bei optimalen Verhältnissen gewählt. Als Betriebspunkt wird eine Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s festgelegt. So ergibt sich für  $P_1 = 10$  Watt (bei optimaler Steiggeschwindigkeit) und für  $P_2 = 6,1$  Watt (bei 3,1-facher Einholgeschwindigkeit). Die Zeiten sind nicht bekannt, allerdings das Verhältnis zwischen diesen. Da der Drachen mit der 3,1-fachen Geschwindigkeit eingeholt wird, gilt:  $t_1 = 3,1 * t_2$ . Durch Einsetzen dieses Verhältnisses können die Zeitvariablen eliminiert werden und es wird:

$$\eta_1 * \eta_2 \geq \frac{6,1 \text{ W}}{10 \text{ W} * 3,1} \geq 0,2$$

Dieses Ergebnis bedeutet, dass das Produkt der beiden Wirkungsgrade während Steig- und Sinkbetrieb größer als 0,2 sein muss, um durch das Drachenkraftwerk Energie zu produzieren. Es muss also sowohl im Generatorbetrieb als auch im Motorbetrieb jeweils ein Wirkungsgrad von ungefähr  $\eta = 0,45$  erzielt werden ( $0,45^2 = 0,2$ ), um gerade noch eine positive Energiebilanz zu erhalten.

## 4 Die elektrische Maschine

Die zentrale Aufgabe der Bodenstation ist die Umwandlung der mechanisch erzeugten in elektrische Leistung während der Steigphase. Ebenso muss während der Rückholphase eine Umwandlung von der gespeicherten elektrischen Leistung in eine mechanische Drehbewegung erfolgen, durch die der Drache eingeholt wird. Diese Aufgaben können durch elektrische Maschinen bewältigt werden, welche es in der Ausführung als Generatoren und als Motoren gibt. [7] In diesem Kapitel werden Grundlagen zu elektrischen Maschinen vermittelt. Da in der Bodenstation eine Energiespeicherung in Form von Gleichstrom angestrebt wird, wird insbesondere die Gleichstrom-Maschine untersucht. Von der Herleitung und Erklärung elektrotechnischer Formeln wird im Rahmen dieser Ausarbeitung größtenteils abgesehen, da die meisten für die Auswahl einer geeigneten Maschine nicht relevant sind. Auf dieser theoretischen Basis kann im Anschluss eine geeignete Auswahl für den besprochenen Einsatz getroffen werden.

## 4.1 Physikalische Grundlagen

In der Regel nutzen elektrische Maschinen elektromagnetische Vorgänge zur Vollbringung ihrer Aufgabe. Dabei sind drei physikalische Effekte von wichtiger Bedeutung [8]:

1. Lorentzkraft: In einem Magnetfeld wirkt auf einen stromdurchflossenen Leiter eine Kraft, die sogenannte Lorentzkraft. Durch diese wird in einem Motor die Kraft bzw. das Drehmoment erzeugt. Wenn der stromdurchflossene Leiter senkrecht zur Magnetfeldrichtung steht, wird die Lorentzkraft maximal. Der konstruktive Aufbau von elektrischen Maschinen wird so gewählt, dass diese Bedingung annähernd optimal erfüllt wird. [8]

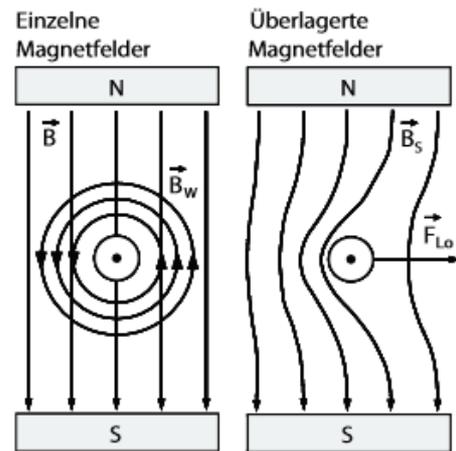


Abbildung 17: Lorentzkraft, Quelle: [8]

2. Induktion: Wenn eine Leiterschleife von einem zeitlich veränderlichen Magnetfeld durchsetzt wird, entsteht an den beiden Enden der Leiterschleife eine Spannung. Durch Anschluss eines Verbrauchers kann ein Stromkreis erzeugt werden, durch den Strom fließt. Dieser Effekt wird in einem Generator durch die mechanische Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld erreicht. Der Strom fließt dabei senkrecht zur magnetischen Feldrichtung und senkrecht zur Bewegungsrichtung des Leiters. [8]

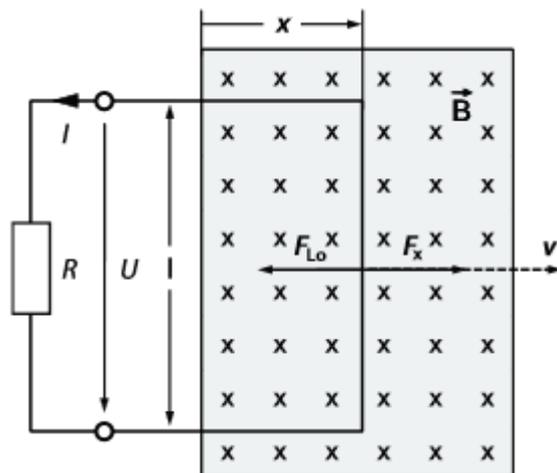


Abbildung 18: Induktion, Quelle: [8]

3. Selbstinduktion: Wird an einer Spule der Speisestrom geändert, so ändert sich auch der vom Strom erzeugte magnetische Fluss. Dabei ist die in der Spule induzierte Spannung, sofern diese kein ferromagnetisches Material enthält, proportional zur Stromänderung. Die Spannungsinduktion in der Spule wirkt der Stromänderung entgegen und beeinflusst die Dynamik des elektrischen Kreises. [8]

Bei elektromagnetischen Maschinen wird das benötigte Magnetfeld mittels einer stromdurchflossenen Spule oder einem Permanentmagneten erzeugt. Dieses Magnetfeld wird in der Regel als Erregerfeld, und die stromdurchflossene Spule als Wicklung bezeichnet. Für die magnetischen Eigenschaften sind die verwendeten Werkstoffe von großer Bedeutung. Bei nicht ferromagnetischen Werkstoffen wie Aluminium und Kupfer besteht ein linearer Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Flussdichte, bei ferromagnetischen Werkstoffen wie Eisen, Nickel und Kobalt ist dieser Zusammenhang nichtlinear. Dieser nichtlineare Zusammenhang führt dazu, dass die magnetische Flussdichte ein Maximum hat, bei dem die magnetische Sättigung erreicht wird. Für elektrische Maschinen bedeutet dies, dass eine Erhöhung des Spulenstroms keine Erhöhung der magnetischen Flussdichte bewirkt und somit keine Drehmomenterhöhung mehr erreicht werden kann. Durch einen höheren Strom würden lediglich die Leistungsverluste steigen und die Maschine würde sich unnötig erhitzen. Des Weiteren bewirken ferromagnetische Stoffe eine hohe Verstärkung des magnetischen Felds, da sie in ihrem Inneren die Magnetfeldlinien konzentrieren. Aus diesem Grund werden sie in Kombination mit Dauermagneten oder Spulen in elektrische Maschinen eingesetzt. [8]

Durch die Funktionsweise der elektrischen Maschine entstehen mechanische und elektrische Verluste. Ursachen mechanischer Verluste sind Reibung in beispielsweise Lagern, Dichtungen und Lüftern. Elektrische Verluste sind [8]:

- Ohm'sche Verluste in den Leitern
- Ummagnetisierungsverluste (Hystereseverluste)
- Wirbelstromverluste (durch die Änderung des magnetischen Flusses)
- Streuverluste

Diese maschineninternen Leistungsverluste führen im konstanten Betrieb zu einer Erwärmung der Maschine, bis die an die Umgebung abgeführte Wärmeleistung mit der Verlustleistung des Motors gleich ist. [8]

## 4.2 Gliederung elektrischer Maschinen

Der prinzipielle Aufbau von elektrischen Maschinen ist in der Regel bei allen Typen gleich. Es gibt einen ruhenden Ständer bzw. Stator und einen Läufer (auch Rotor oder Anker), welcher auf einer Welle sitzt. Grundsätzliche Ausführungen, welche in ihrer Kombination zu den Hauptmaschinentypen führen, lassen sich der nachfolgenden Tabelle entnehmen. [7]

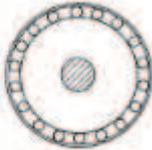
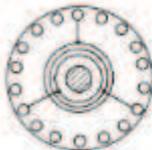
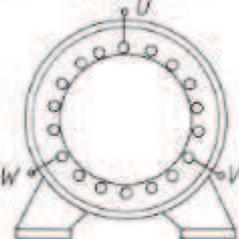
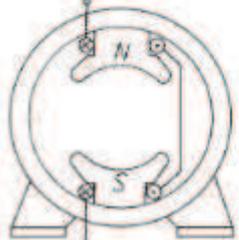
Läufer mit	Käfigwicklung	Drehstromwicklung mit Schleifringen	Einzelpole (auch Dauermagnete)	Stromwenderwicklung
Ständer mit				
Drehstromwicklung 	Asynchron-Käfigläufer-Motor	Asynchron-Schleifringläufer-Motor	Innenpol-Synchronmaschine	Drehstrom-Kommutator-Maschine
Einzelpole auch als Dauermagnete 	Spaltpolmotor	Außenpol-Synchronmaschine	Schrittmotor	Gleichstrom-Maschine

Abbildung 19: Ausführungen elektrische Maschine, Quelle: [7]

Einerseits können elektrische Maschinen nach der verwendeten Stromart wie Gleichstrom, Wechselstrom oder Drehstrom gegliedert werden. Aber auch eine Einteilung nach der Wirkungsweise wie Asynchron- oder Synchronmaschine oder mit Stromwenderwicklung ist möglich. Innerhalb dieser Haupttypen finden sich meist etliche spezielle Bauarten, die sich in einem bestimmten Anwendungs- oder Leistungsbereich durchgesetzt haben. In der nachfolgenden Tabelle werden gebräuchliche Typen gegliedert, wodurch eine Übersicht erlangt werden kann. Dazu werden Haupteinsatzgebiete und Leistungsbereiche der Maschinen genannt. [7]

Stromart	Stromwendermaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps	
Gleichstrom	Dauermagnetmotor			Feinwerktechnik, Kfz-Elektrik, Servoantriebe	< 1 W bis 10 kW	
	Fremderregter Motor			Hauptantrieb für Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Prüffelder, Walzwerke	10 kW bis 10 MW	
	Reihenschlussmotor			Anlasser im Kfz, Fahrmotor in Bahnen	300 W bis 500 kW	
Wechselstrom	Universalmotor			E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W bis 2000 W	
	Reihenschlussmotor			Fahrmotor in 16 <sup>2</sup> / <sub>3</sub> -Hz- und 50-Hz-Vollbahnen	100 kW bis 1000 kW	
		Spaltpolmotor		Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W bis 150 W	
		Kondensatormotor		Haushaltsgeräte, Pumpen, Gebläse, Werkzeuge	50 W bis 2000 W	
			Hysteresemotor	Uhrwerke, Feinwerktechnik, Hilfsantriebe	< 1 W bis 20 W	
			Reluktanzmotor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W bis 10 kW	
Drehstrom	Nebenschlussmotor (durch Umrichterantriebe abgelöst)	Käfigläufermotor		Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW	
				Industriestandardantrieb, z. B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik, Umformer, Fahrmotor in Bahnen	100 W bis 50 MW	
		Schleifringläufermotor		Hebezeuge, Pumpen- und Verdichter	10 kW bis 10 MW	
			Linearmotor	Linearmotor	Fördertechnik, Schnellbahnen	100 W bis 10 MW
				Dauermagnetmotor	Servoantriebe, Gruppenantrieb	100 W bis 10 kW
				Schenkelpolmaschine	Notstromgenerator, langsamlaufender Industrieantrieb, Wasserkraftgenerator	10 kW bis 1000 MW
		Vollpolmaschine	Verdichter-, Mühlenantrieb, Turbogenerator im Kraftwerk	100 kW bis 1500 MW		
Impulsstrom			Elektronikmotor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	< 1 W bis 200 W	
			Schrittmotor	Quarzuhren, Positionierantrieb	10 µW bis 500 W	

Abbildung 20: Gliederung elektrische Maschinen, Quelle: [7]

### 4.3 Die Gleichstrommaschine

Gleichstrommaschinen sind als Elektromotoren darauf ausgelegt, mit Gleichspannung gespeist zu werden oder um im Generatorbetrieb Gleichspannung zu erzeugen. Aufgrund ihrer niedrigen Kosten sind sie, insbesondere im Kraftfahrzeugbereich, weit verbreitet. Gleichstrommaschinen werden nach der Art der Erzeugung des Magnetfeldes nach zwei Grundprinzipien unterschieden [8]:

- Elektrisch erregte Maschine (Selbsterregt oder fremderregt)
- Permanenterregte Maschine

Bei elektrisch erregten Maschinen wird, wie zuvor bereits erwähnt, das magnetische Feld durch eine stromdurchflossene Spule erzeugt. Wenn dabei für die Erregerwicklung im Stator die gleiche Spannungsquelle wie für die Ankerwicklung verwendet wird, handelt es sich um eine selbsterregte Maschine. Wird eine separate Spannungsquelle für die Erregerwicklung benutzt, spricht man von einer fremderregten Maschine. Fremderregte Maschinen ermöglichen über den Strom in der Erregerwicklung also eine unabhängige Einstellung der Stärke des Erregerfeldes. Allerdings sind hier zwei Spannungsquellen erforderlich. Bei permanenterregten Maschinen ist die Stärke des Erregerfeldes konstant, da dieses durch Permanentmagnete erzeugt wird. [8]

#### Wirkungsweise

Zum Aufzeigen des Wirkprinzips wird zunächst nur eine einzelne Leiterschleife betrachtet. Diese ist drehbar gelagert und befindet sich in einem parallelen homogenen Magnetfeld. Das magnetische Feld steht senkrecht zu dem stromdurchflossenen Leiter. Senkrecht zu dem Magnetfeld und der Leiterschleife wirkt die Lorentzkraft  $F_L$ . Durch die tangentielle Kraftkomponente er-

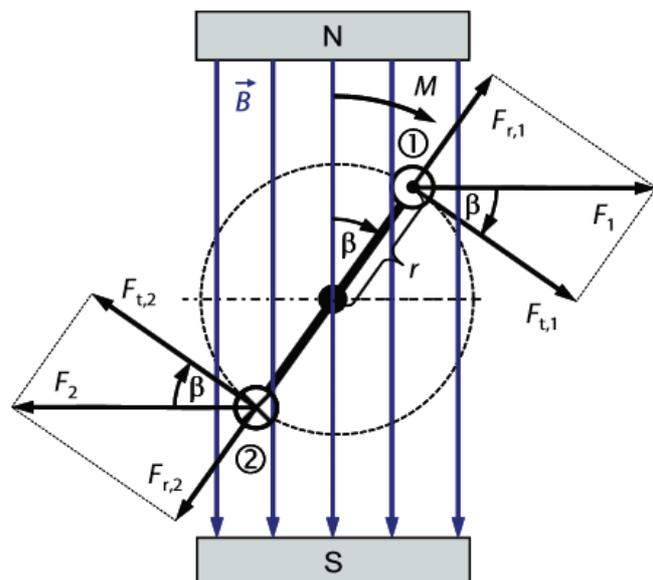


Abbildung 21: Wirkungsweise Lorentzkraft, Quelle: [8]

rechnet sich das in dem entsprechenden Leiterabschnitt erzeugte Drehmoment. In den beiden Leiterabschnitten 1 und 2 wirkt die betragsmäßig gleiche Kraft. Allerdings entsteht durch die dargestellte Anordnung keine Umdrehungsbewegung. Sobald die Leiterschleife waagrecht steht, heben sich die beiden gleichgroßen Tangentialkräfte gegenseitig auf. [8]

Um eine beziehungsweise mehrere Umdrehungen zu erzeugen, muss in dieser stabilen Position die Stromrichtung geändert werden. Dies geschieht mithilfe eines Kommutators (auch Stromwender oder Polwender). Auf der Welle der Maschine sind Kontaktflächen angeordnet. Diese stehen im Kontakt mit schleifenden Elementen, über welche die Stromübertragung vom stehenden Motorteil auf die drehende Welle geschieht. In dem dargestellten Fall besitzt der Kommutator zwei Kontaktflächen (1 und 2). In waagrechter Stellung würde es hier allerdings zu einem Kurzschluss kommen und der Motor läuft nicht an. Außerdem kommt es zu starken Drehmoment-schwankungen (siehe Kennlinie in Abbildung 22) während einer Umdrehung und das Drehmoment ist verhältnismäßig gering. [8]

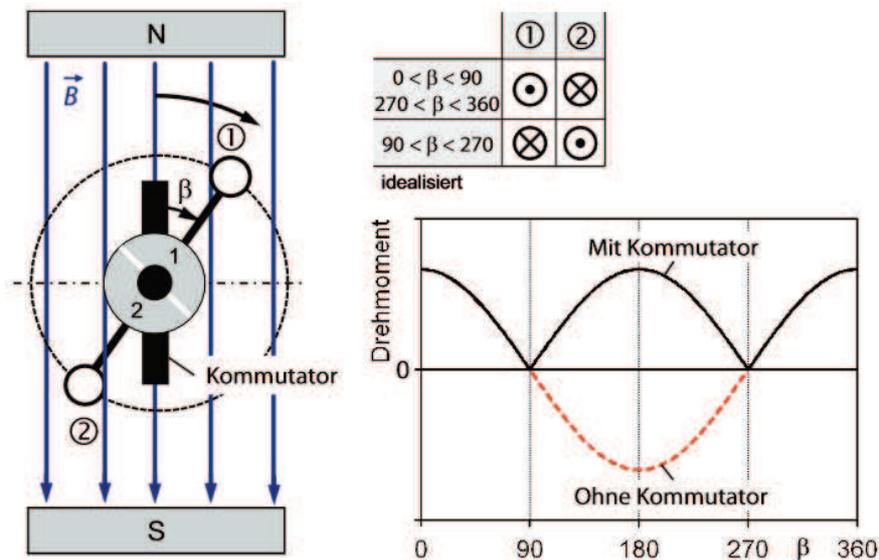


Abbildung 22: Wirkungsweise Kommutator, Quelle: [8]

Um diese Nachteile zu überwinden, werden folgenden Maßnahmen getroffen [8]:

- Anstatt von einer Leiterschleife wird eine Spule, bestehend aus mehreren Leiterschleifen, benutzt. Dadurch erhöht sich das Drehmoment.
- Über den Umfang des drehenden Rotors sind in gleichen Abständen mehrere Spulen verteilt, wodurch sich das Drehmoment weiter erhöht. Dies führt auch zu einer Reduktion der Drehmomentschwankung. Die Gesamtheit der Spulen

wird Wicklung genannt. Um ein Anlaufen des Motors in jeder Stellung zu gewährleisten, wird die Anzahl der Kommutatorsegmente erhöht.

- Das magnetische Erregerfeld der Maschine wird dimensioniert, sodass es möglichst radial zum Rotor verläuft. Auch die Geometrie des feststehenden Statorbereichs (auch Polschuh genannt) wird so ausgelegt, dass das Erregerfeld senkrecht zu den stromdurchflossenen Leitern des Rotors verläuft.

Die Funktionsweise einer elektrischen Maschine soll anhand des elektrisch erregten Motors erklärt werden. Bei der elektrisch erregten Maschine entsteht das Magnetfeld aus dem Stromfluss durch die Erregerwicklung. Der Stromfluss durch die Rotorwicklung (auch Ankerstrom bezeichnet), welche in Richtung der Drehachse liegt, erzeugt das Drehmoment. Das Joch aus weichmagnetischem Material schließt den magnetischen Kreis im Stator. Außerdem werden durch das Joch, welches dem Erregerfeld einen geringen magnetischen Widerstand entgegensetzt, Streuverluste minimiert. Der Kommutator wird zur Stromübertragung an den Rotor und zur Steuerung der Stromrichtung benutzt. [8]

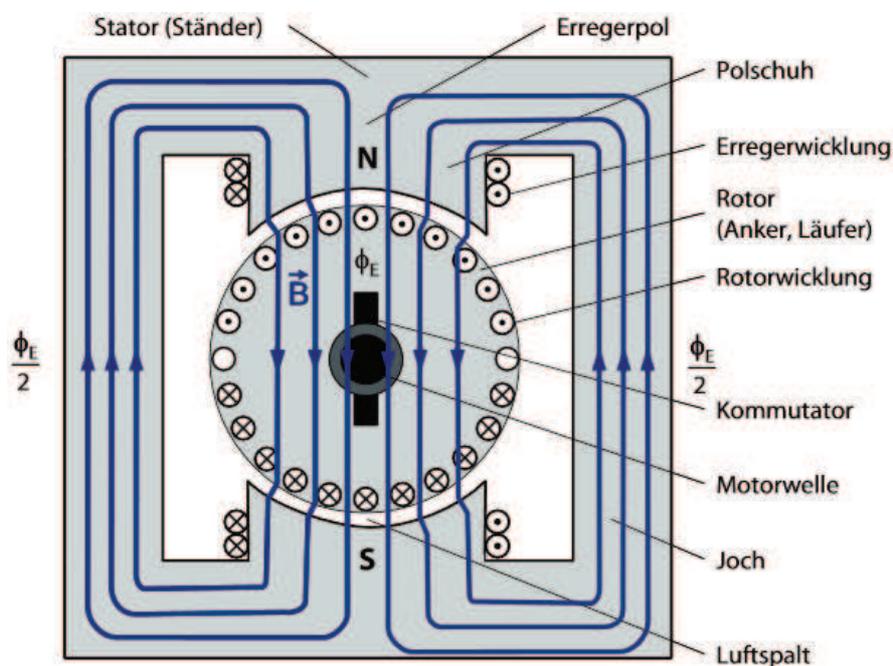


Abbildung 23: Funktionsweise elektrische Maschine, Quelle: [8]

Die radiale magnetische Flussdichte in dem Luftspalt ist die entscheidende Größe für das Drehmoment (bei der Verwendung als Motor) bzw. die induzierte Spannung bei der Verwendung als Generator). Bei einer konstanten magnetischen Flussdichte ist

das Drehmoment des Motors proportional zum Ankerstrom. Dieser Proportionalitätsfaktor wird als „Drehmomentkonstante“ von Motorenherstellern bei den Motorkennwerten angegeben. Sie gibt an, wieviel Drehmoment bei einem konstanten Ankerstrom erzeugt wird. [8]

Wenn an der Maschinenwelle eine Drehzahl anliegt, wird nach dem Induktionsgesetz im Rotor eine Spannung induziert. Diese ist beim Generator die Basis zur Spannungserzeugung. Die induzierte Spannung wird auch als „Elektromotorische Kraft“ (EMK) bezeichnet. Da diese Spannung proportional zu der anliegenden Drehzahl ist, wird auch hier eine Konstante eingeführt, die sogenannte „Spannungskonstante“. Sie gibt an, welche Spannung bei einer bestimmten Motordrehzahl induziert wird. [8]

Drehmomentkonstante und Spannungskonstante sind in folgendem Verhältnis voneinander abhängig [8]:

$$c_U = 2\pi * c_T \quad (13)$$

Das Motorverhalten von Gleichstrommotoren im stationären Fall ist also mit einer Konstanten zu beschreiben. In der Regel werden bei den Motorkennwerten jedoch beide Faktoren angegeben. Diese Verhältnisse gelten auch für eine permanenterrregte Gleichstrommaschine. [8]

Des Weiteren kann durch eine normierte Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie das Motorverhalten charakterisiert werden. Diese Kennlinie beschreibt das mechanische Verhalten des Motors bei einer konstanten Ankerspannung. Mit steigendem Drehmoment nimmt die Drehzahl linear ab, bis es bei dem maximalen Drehmoment zum Stillstand der Maschine kommt. Je schneller ein Motor dreht, desto weniger Drehmoment kann er abgeben. Durch die beiden Endpunkte Leerlaufdrehzahl  $n_0$  und Anhaltmoment  $M_H$  kann die Kennlinie beschrieben werden. Bei einer Veränderung der Spannung verändern sich Leerlaufdrehzahl und Anhaltmoment proportional, was sich mit einer Parallelverschiebung der Kennlinie im Diagramm darstellen lässt. Der Proportionalitätsfaktor zwischen Leerlaufdrehzahl und Spannung ist die Drehzahlkonstante. Unabhängig von der Spannung wird die Kennlinie am aussagekräftigsten durch die Kennliniensteigung beschrieben. Die Kennliniensteigung erlaubt den Vergleich zwischen verschiedenen Motoren. Je kleiner die Steigung, desto unempfindlicher reagiert die Drehzahl auf Laständerungen und desto kräftiger ist der Motor. [11]

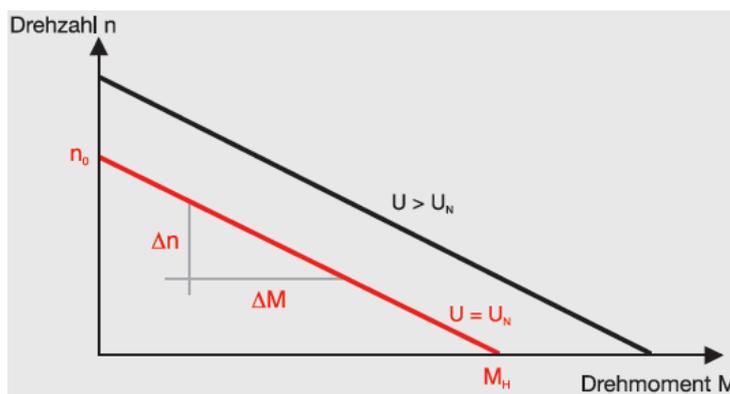


Abbildung 24: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie, Quelle: [11]

Es ist zu beachten, dass bei diesem Diagramm Begrenzungen vorerst nicht berücksichtigt werden. Reale Motoren besitzen folgende Begrenzungen [8]:

- Mechanische Begrenzung: Die Drehzahl wird durch ein mechanisches Bauteil, beispielsweise ein Kugellager, begrenzt.
- Elektrische Begrenzung: Die Motordrehzahl wird durch eine zulässige oder maximal verfügbare Ankerspannung, das Drehmoment durch den verfügbaren Ankerstrom begrenzt.
- Thermische Begrenzung: Das Drehmoment wird durch eine maximal zulässige Temperatur eines Bauteils, z.B. der Isolation, limitiert.

Hohe Ankerströme können den Motor in kurzer Zeit thermisch überlasten und sind daher nicht von praktischem Nutzen. Auch aus Gründen der Kostenminimierung wird der Ankerstrom begrenzt. Damit ergibt sich auch ein maximales Drehmoment, das der Motor nach der Begrenzung abgeben kann. Diese Grenze wird auch Stromgrenze genannt. Bei einem vorgegebenen Lastdrehmoment und damit einem konstantem Ankerstrom steigt die Drehzahl bei einer höheren induzierten Spannung. Zur Begrenzung der Drehzahl wird eine Spannungsgrenze festgelegt. Durch diese beiden Grenzen kann der Arbeitsbereich des Antriebs nach der Betriebsart definiert werden. [8]

Auch der Wirkungsgrad einer elektrischen Maschine ist von dem Drehmoment-Drehzahl-Verhalten abhängig und lässt sich als Kennlinie in das Diagramm legen. Der Wirkungsgrad beschreibt beim Motor das Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung zu aufgenommener elektrischer Leistung. Beim Generator ist es das Verhältnis zwischen abgegebener elektrischer und aufgenommener mechanischer Leistung. [11]

In dem nebenstehenden Diagramm ist der qualitative Verlauf des Wirkungsgrades im Drehmoment-Drehzahl-Diagramm zu sehen. Mit zunehmender Drehzahl nimmt der Wirkungsgrad bei konstanter Spannung aufgrund der Proportionalität von Drehmoment und Strom linear zu. Bei kleinen Drehmoment überwiegen Reibungsverluste und der Wirkungsgrad nimmt stark ab. Als Faustregel für Gleichstrommotoren gilt, dass etwa bei einem Siebtel des Anhaltmoments der maximale Wirkungsgrad auftritt. [11]

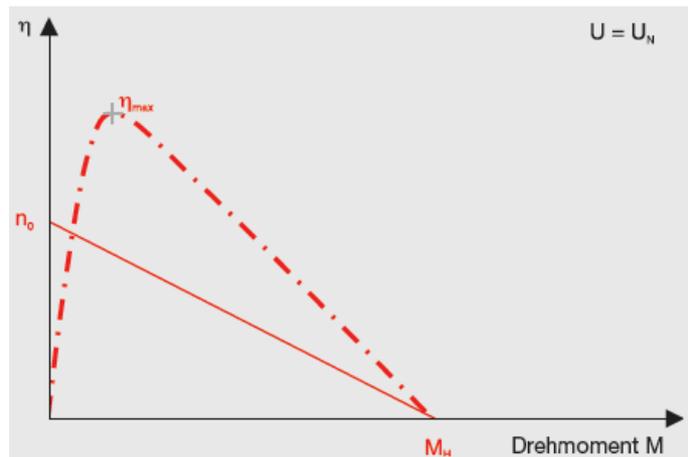


Abbildung 25: Wirkungsgrad-Kennlinie, Quelle: [11]

Als Faustregel für Gleichstrommotoren gilt, dass etwa bei einem Siebtel des Anhaltmoments der maximale Wirkungsgrad auftritt. [11]

#### 4.3.1 Die elektrische erregte Gleichstrommaschine

Die Komponenten eines elektrisch erregten Gleichstrommotors sind auf dem nächsten Bild zu erkennen. Der Stator besteht aus Erregerwicklung und Eisenkern. Der Rotor sitzt mit Ankerwicklung und Kommutatorstegen auf der Motorwelle. [8]

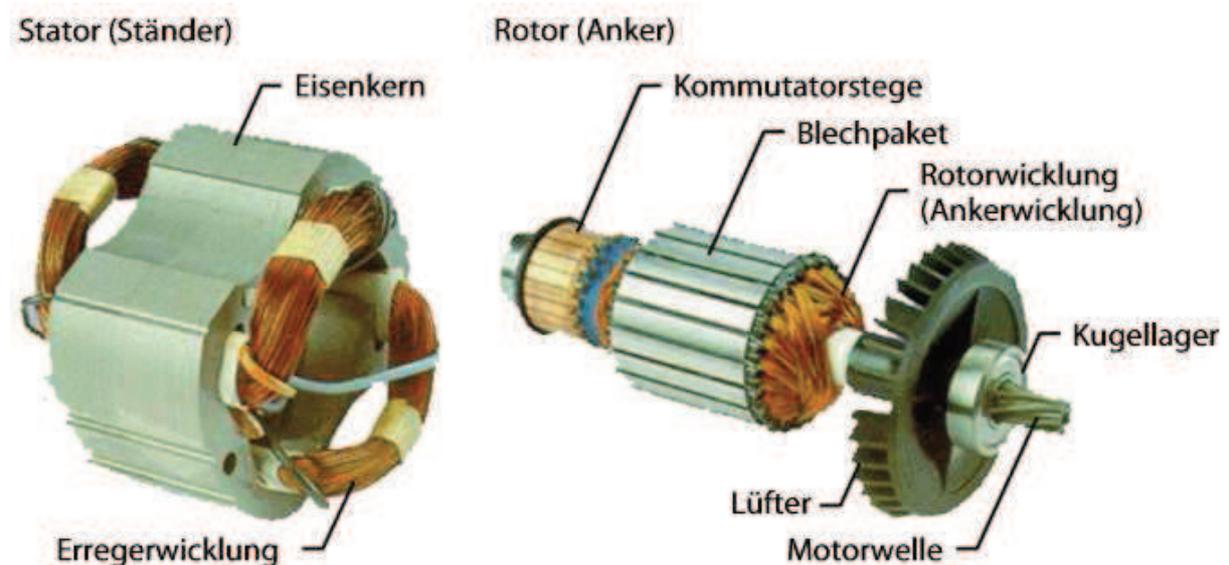


Abbildung 26: Aufbau elektrisch erregte Maschine, Quelle: [8]

Oft besitzt der Anker übereinander gestapelte Bleche zur Verstärkung des Magnetfeldes der Kupferdrahtwicklungen. Diese sind zueinander isoliert, um Wirbelstromver-

luste zu vermeiden. Der magnetische Fluss konzentriert sich im Material und nicht in den Nuten, weshalb der Anker in einer Winkelposition zwischen den Nuten verharrt, wo der geringste magnetische Widerstand herrscht. Das zum Verlassen dieser Position nötige Drehmoment wird als Rastmoment bezeichnet. [8]

Bei elektrisch erregten Maschinen hängt das Verhalten der Maschine stark davon ab, wie Anker- und Erregerwicklung geschaltet sind. [16]

### Fremderregte Gleichstrommaschine

Fremderregte Gleichstrommotoren benötigen zwei Spannungsquellen. Davon wird eine Spannungsquelle mit der Erregerwicklung, die andere mit der Ankerwicklung verbunden. Bei der fremderregten Maschine stehen also zwei voneinander getrennte Stromkreise zur Verfügung, wie in der nebenstehenden Abbildung zu erkennen ist. [16]

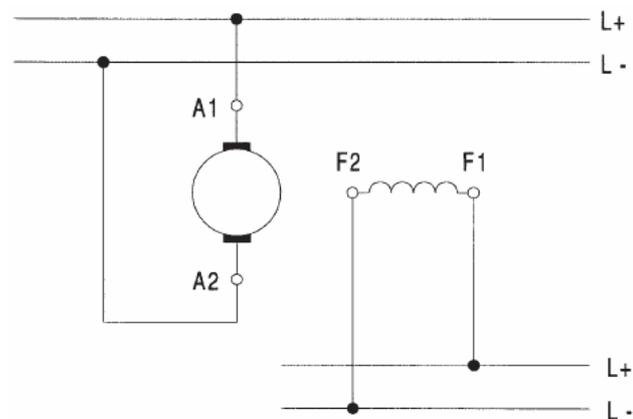


Abbildung 27: Fremderregte Gleichstrommaschine, Quelle: [16]

#### Im Motorbetrieb

Die Motordrehzahl ist dabei abhängig von der Ankerspannung. Bei einem konstanten Erregerfluss erhöht sich die Drehzahl mit einer größer werdender Ankerspannung und lässt sich so über diese steuern. Ebenso verringert sich die Drehzahl bei einer kleiner werdenden Ankerspannung. Auffallend hierbei ist, dass die Drehzahl nicht von der Belastung des Motors abhängt. Die Belastung bzw. das Drehmoment ist lediglich von der Stromstärke abhängig. Je größer der durch den Motor fließende Strom, desto größer das Drehmoment und umgekehrt. Bei dem fremderregten Motor stellt die Drehzahlkennlinie, wie in dem zuvor beschriebenen Beispiel, eine geneigte Gerade dar. [16]

### Im Generatorbetrieb

Auch im Generatorbetrieb wird bei der fremderregten Maschine vorausgesetzt, dass die Erregerwicklung von einem Strom durchflossen wird. Der magnetische Erregerfluß und die Generatorurspannung sind von dem Erregerstrom abhängig und können über diesen verstellt werden. Dies kann entweder durch einen zusätzlichen, einstellbaren Widerstand im Erregerkreis geschehen oder dadurch, dass an der Erregerwicklung eine Gleichspannungsquelle mit veränderbarer Ausgangsspannung angelegt ist. Nachteilig bei diesem Generatortyp ist offensichtlich, dass zu seinem Betrieb eine Gleichspannungsquelle benötigt wird, welche die Erregerwicklung speist. Um eine Spannung zu erzeugen, muss man auf eine bereits vorhandene Gleichspannung zurückgreifen. Diese steht nicht immer zur Verfügung und außerdem verringert sich der Wirkungsgrad des Generators. Fremderregte Maschinen sind nicht weit verbreitet und werden wenn überhaupt als Motoren im Hochleistungsbereich verwendet. [16]

### **Nebenschlussmaschine**

Im Gegensatz zu der fremderregten Maschine wird bei der Nebenschlussmaschine nur eine Spannungsquelle benötigt. Anker- und Erregerwicklung liegen an derselben Spannungsquelle an. Dabei ist die Ankerwicklung parallel zur Erregerwicklung geschaltet, sie liegt also im „Nebenschluss“. [16]

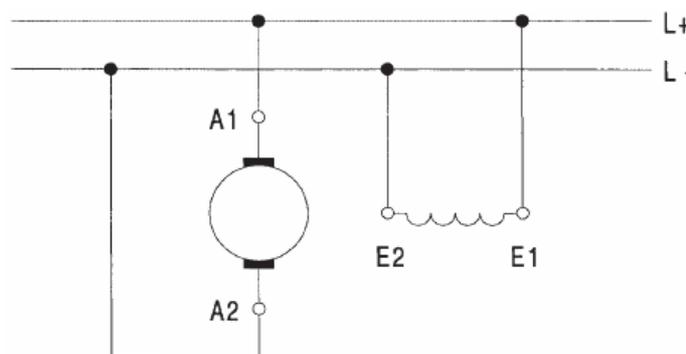


Abbildung 28: Nebenschlussmaschine, Quelle: [16]

### Im Motorbetrieb

Der gesamte Motorstrom ist die Summe aus Anker- und Erregerstrom. Der Vorteil des Nebenschlussmotors, dass nur eine Spannungsquelle benötigt wird, bringt auch einen Nachteil mit sich. Eine verlustlose Drehzahlverstellung durch die voneinander unabhängigen Ankerkreis- und Erregerkreisspannungen wie beim fremderregten Motor ist beim Nebenschlussmotor nicht möglich. Nur durch verstellbare Widerstände in

Anker- und Erregerkreis kann die Drehzahl variiert werden. Gemeinsam haben fremderregter Motor und Nebenschlussmotor allerdings, dass die Erregerwicklung an einer von der Belastung unabhängigen Spannung liegt und sich der Erregerfluss daher mit der Belastung nicht ändert. Aus diesem Grund haben die Kennlinien der beiden Maschinen das gleiche Aussehen. [16]

### Im Generatorbetrieb

Da bei dem Nebenschlussgenerator die Erregerwicklung nicht an einer unabhängigen Spannungsquelle liegt, verhält sich auch die Erregerwicklung belastungsabhängig. Da die Spannung der Erregerwicklung also auch mit zunehmender Belastung abnimmt, nehmen auch Erregerstrom und damit der Erregerfluss ab. Dies hat zur Folge, dass die in der Ankerwicklung induzierte Spannung, also auch die Drehzahl, mit der Belastung abnimmt. Aus diesem Grund fällt die Klemmenspannung, die bei einem fremderregten Generator linear abnimmt, beim Nebenschlussgenerator mit zunehmender Belastung stärker als linear ab. Sogar wenn der Belastungsstrom bei Leerlauf der Maschine null wird, fließt durch die Ankerwicklung noch der Erregerstrom. [16]

Nebenschlussmaschinen finden als kleine Motoren nur in speziellen Bereich Anwendung, z.B. bei niedrigen Temperaturen oder wenn eine grobe, kostengünstige Drehzahlstellung durch Anzapfung der Ständerwicklung erfolgen soll. [17]

### Reihenschlussmaschine

Bei der Reihenschlussmaschine sind Anker- und Erregerwicklung in Reihe geschaltet. Durch Anker- und Erregerwicklung fließt derselbe Strom. Die Größe des Stroms und der Erregerfluss ändern sich mit der Belastung bzw. dem Drehmoment. Dabei ist der

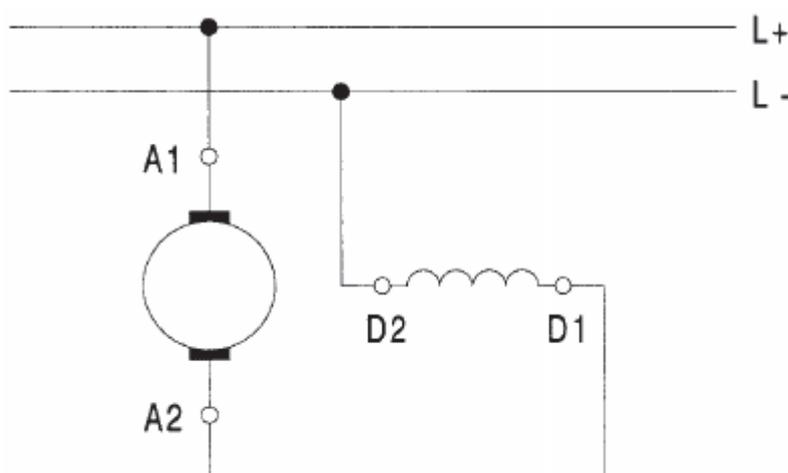


Abbildung 29: Reihenschlussmaschine, Quelle: [16]

Erregerfluss dem Belastungsstrom proportional. Der Strom ist also nicht mehr, wie zuvor bei fremderregter Maschine und Nebenschlussmaschine konstant. [16]

### Im Motorbetrieb

Aus der nebenstehenden Drehzahlkennlinie des Reihenschlussmotors lässt sich entnehmen, dass die Drehzahl mit zunehmender Belastung stark abfällt. Bei Entlastung erreicht sie extrem hohe Werte, die zur Gefahr für die Maschine selbst werden. Aus diesem Grund darf ein Reihenschlussmotor nie komplett entlastet werden und es wird eine höchstzulässige Drehzahl angegeben, bis zu der der Motor entlastet werden darf.

Eine Drehzahlverstellung kann durch die Änderung

der am Motor anliegenden Spannung oder durch die Änderung des Erregerflusses vorgenommen werden. Dies lässt sich durch einen zur Erregerwicklung parallel geschalteten, verstellbaren Widerstand realisieren. [16]

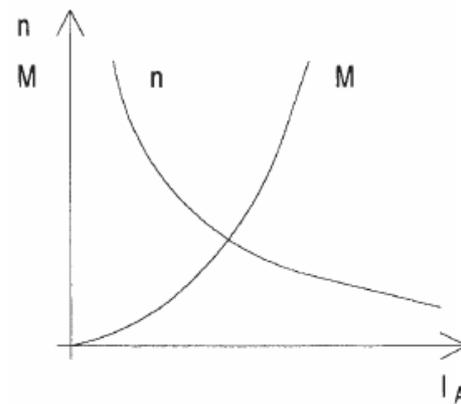


Abbildung 30: Kennlinie Reihenschlussmaschine, Quelle: [16]

### Im Generatorbetrieb

Charakteristisch für den Reihenschlussgenerator ist, dass sich die erzeugte Spannung stark mit dem Belastungsstrom ändert. Die Klemmenspannung steigt mit wachsendem Belastungsstrom an. Wegen der starken Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Belastung wird der Reihenschlussgenerator nur selten eingesetzt. [16]

Aufgrund der Drehmoment-Drehzahl-Charakteristik eignet sich der Reihenschlussmotor besonders gut für Anwendungen mit Schweranlauf, welche bei geringen Drehzahlen ein besonders hohes Drehmoment fordern. [17]

### 4.3.2 Die permanenterregte Gleichstrommaschine

Elektrische erregte Maschinen benötigen zu der Erzeugung des Erregerfeldes ständig elektrische Energie, wodurch der Wirkungsgrad verringert wird. Diesen Nachteil hat eine permanenterregte Maschine nicht. Bei ihr wird das erforderliche Magnetfeld durch Permanentmagneten im Stator erzeugt. Auf dem nebenstehenden Bild ist ein permanenterregter Gleichstrommotor zu erkennen. [8]

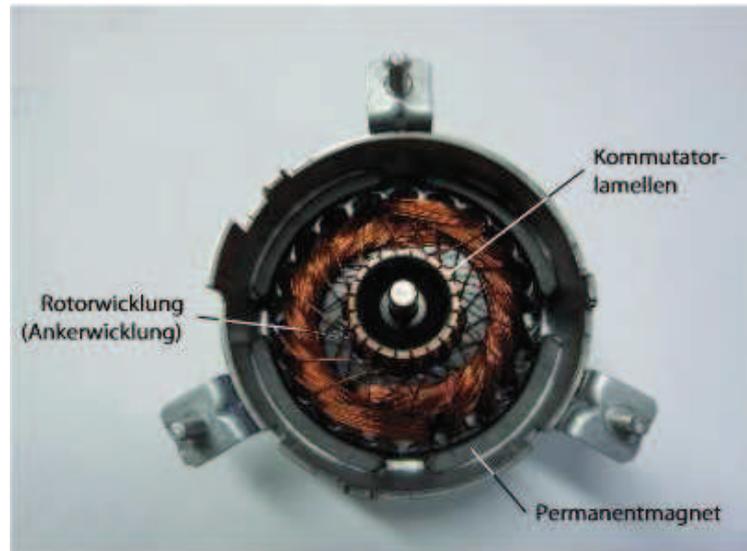


Abbildung 31: Permanenterregte Gleichstrommaschine, Quelle: [8]

Insbesondere im unteren Leistungsbereich bei dem Betrieb an Kleinspannungen ( $\leq 42$  Volt) haben Permanentmagnet-Motoren wegen der geringen Kosten und des hohen Wirkungsgrades eine große Bedeutung. Außerdem erfolgt die Drehzahlregelung der Maschine nur durch den Ankerstrom, was eine kostengünstige und einfache Steuerelektronik zur Folge hat. Für den vielfältigen Einsatz der Permanentmagnet-Motoren werden im Folgenden einige Beispiele aufgelistet [17]:

- Hilfsantriebe im Kraftfahrzeug: Scheibenwischer, Fensterheber
- Haushalts- und Hobbygeräte: Haartrockner, Zahnbürsten, Modelleisenbahnen
- Haustechnik: Heizung, Rollläden
- Werkstatt: Handwerkzeugmaschinen
- Büromaschinen: Drucker, Kopiergeräte

Bei Permanentmagnet-Motoren (auch DC-Motoren) wird eine mechanische Kommutierung genutzt. Dies hat folgende Nachteile [17]:

- DC-Motoren sind nicht wartungsfrei, da der mechanische Kommutator verschleißt.

- Die maximale Motordrehzahl wird durch die Reibung an den Kontaktflächen und den damit einhergehenden Wärmeverlusten begrenzt.
- Andere elektrische Geräte können durch Funkenbildung an den Kommutatorbürsten gestört werden.

Es besteht auch die Möglichkeit, den Permanentmagneten in den Rotor, und die Wicklungen in den Stator zu legen. Diese sogenannten EC-Motoren werden elektronisch kommutiert, erfordern eine aufwendige und kostenintensive Steuerungselektronik und werden im Rahmen dieser Studienarbeit nicht eingeführt. [8]

#### 4.4 Wahl der elektrischen Maschine

Für den Einbau in die Bodenstation werden ein elektrischer Generator während der Steigphase und ein elektrischer Motor während der Rückholphase benötigt. Da eine elektrische Maschine in der Regel sowohl als Generator und auch als Motor verwendet werden kann ist es erstrebenswert, beide Funktionen mit lediglich einem Bauteil abzudecken. Die Verwendung einer einzelnen Maschine hat mehrere Vorteile:

- Bei zwei Motoren wäre eine Kupplung notwendig, über die je nach Betriebsphase Generator oder Motor ein- bzw. ausgekuppelt werden. Bei der Verwendung von nur einer Maschine wird keine Auskupplung benötigt
- Zwei Maschinen erfordern einen höheren Steuerungsaufwand
- Eine Maschine ist in der Beschaffung sowie in den damit einhergehenden Bauteilen wesentlich günstiger als Generator und Motor in Form von zwei verschiedenen Maschinen.

Aus diesen Gründen wurde sich im Rahmen dieser Studienarbeit dazu entschieden, die elektrisch-mechanische Wandlung mit einer Maschine, die sowohl im Motor- als auch im Generatorbetrieb verwendet wird, zu realisieren. Allerdings bringt dies die Schwierigkeit mit sich, die Maschine für beide Betriebsfälle passend auszulegen. Im Motorbetrieb werden andere Drehmomente und Drehzahlen gefordert als im Generatorbetrieb.

In dem folgenden Kapitel wird die Auswahl der elektrischen Maschine erarbeitet und erläutert. Dazu werden in einem ersten Schritt die genauen Anforderungen aus der

Leistungsberechnung zusammengetragen, um anschließend auf dieser Basis eine Auswahl zu treffen.

#### 4.4.1 Anforderungen

Bei einem Betrieb des Drachenkraftwerks mit einem Drachen in einer Höhe von über 300m wird die meiste Zeit ein konstanter Höhenwind von 4,5 m/s erwartet. Auf diese Windgeschwindigkeit und die damit einhergehenden Leistungen wird das Kraftwerk ausgelegt. Als Drachen wurde im Rahmen dieser Studienarbeit der 1,81m<sup>2</sup>-große Power-Sled ausgewählt, da dieser das sicherste Flugverhalten und den besten Z-Wert von ca. 0,412 kg/m<sup>3</sup> aufweist und die Einklappvorrichtung von Schubert/Packeiser für diesen Drachen entwickelt wurde.

Zusammenfassend aus dem Kapitel der Leistungsberechnung ergeben sich für diesen Betriebspunkt folgende Anforderungen an die Maschine:

Im Generatorbetrieb		
Leistung	Drehmoment bei 1000 U/min	min. Wirkungsgrad
10 Watt	96 mNm	45%
Steiggeschwindigkeit: 20-50% der Windgeschwindigkeit (optimal: 33% $\equiv$ 1,5 m/s)		
Im Motorbetrieb		
Leistung	Drehmoment bei 1000 U/min	min. Wirkungsgrad
6 Watt	58 mNm	45%
Rückholgeschwindigkeit: 2-5-fache der Steiggeschwindigkeit (optimal: 3,1-fach $\equiv$ 4,65 m/s)		

Tabelle 8: Anforderungen an die Maschine

Die Leistungsberechnung stellt lediglich grobe Werte zur Verfügung, da Ungenauigkeiten und Abweichungen in der Theorie nicht quantifizierbar sind. Es werden daher die optimalen Werte angenommen, diese sind allerdings als ungefähre Werte zu verstehen.

Um eine Orientierung bezüglich des Drehmoments zu geben, werden die Werte bei einer Drehzahl von 1000 U/min hier noch einmal aufgeführt. Der in der Leistungsberechnung ermittelte minimale Wert der kumulierten Wirkungsgrade von Generator und Motor wird hier zu gleichen Teilen, da für beide Betriebe eine Maschine verwen-

det wird, aufgeteilt. Dies ergibt einen minimalen Wirkungsgrad der Maschine von etwa 45% sowohl im Generator- als auch im Motorbetrieb.

Für die Steig- und Rückholgeschwindigkeit werden Bereiche angegeben, die nach einer subjektiven Einschätzung zu vertretbaren Leistungsverlusten führen. Diese Entscheidung stützt sich auf die zuvor in der Leistungsberechnung erarbeiteten Ergebnisse zu den Leistungen bei suboptimalen Verhältnissen.

Des Weiteren ist bei der Maschinenauswahl die Drachengeschwindigkeit in Bezug auf die Maschinendrehzahl zu berücksichtigen. Für die Steigphase bedeutet dies, dass sich die am Generator anliegende Drehzahl proportional zur Steiggeschwindigkeit erhöht. Dies bedeutet auch, dass sich das anliegende Drehmoment entsprechend verändert. Um also die Steiggeschwindigkeit des Drachens regulieren zu können, müsste die am Generator anliegende Last und somit das vom Drachen aufzubringende Drehmoment gesteuert werden. Im Motorbetrieb wird bei einem geringeren Drehmoment ein Vielfaches der Steiggeschwindigkeit benötigt. Hierbei ist die entscheidende Größe die Drehzahl des Motors. Eine Regulierung der Motordrehzahl ermöglicht eine kontrollierte und optimale Rückholgeschwindigkeit des Drachens.

#### 4.4.2 Der ausgewählte DC-Motor

Für die beschriebenen Aufgaben wurde eine permanenterregte Gleichstrommaschine ausgewählt. Diese bringt, im Vergleich zu elektrisch erregten Gleichstrommaschinen zahlreiche Vorteile mit sich [8] [17]:

- Hohe Verfügbarkeit und Vielfalt aufgrund der weiten Verbreitung in dem beschriebenen Leistungsbereich von Kleinmotoren.
- Kein Erregerstrom notwendig, was einen hohen Wirkungsgrad zur Folge hat
- Kompakte Bauweise
- Einfache und kostengünstige Regelung des Motorverhaltens
- Kostengünstig

Eine permanenterregte Gleichstrommaschine ist aufgrund des nicht veränderbaren Magnetfeldes nicht im Ausmaß einer elektrisch erregten Maschine steuerbar. [17] Um der Aufgabenstellung eines kostengünstigen und leicht steuerbaren Drachen-

kraftwerks mit möglichst wenig Elektronik für den Einsatz in Ländern der Dritten Welt gerecht zu werden, wurde dennoch zu dieser Variante gegriffen.

Es gilt nun also, einen DC-Motor auszuwählen, welcher im Motorbetrieb ca. 6 Watt und im Generatorbetrieb ca. 10 Watt zur Verfügung stellen kann. Eine weitere wichtige Rolle spielt neben der Leistung die Drehzahl der Maschine. Im Generatorbetrieb hängt die erzeugte Spannung von der Drehzahl ab. Um eine mögliche Drehzahl während der Steigphase zu errechnen, muss der Radius der verwendeten Haspel hinzugezogen werden. Die Drehzahl in Umdrehungen pro Minute lässt sich in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit und des Haspelradius folgendermaßen berechnen [4]:

$$n = \frac{u}{2\pi r} * 60/min \quad (14)$$

Mit einem Haspelradius  $r = 6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$  und einer optimalen Steiggeschwindigkeit von  $1,5 \text{ m/s}$  ergibt sich eine Drehzahl von ca. 240 U/min.

Ziel ist es, die durch den Drachen erzeugte Energie in einem 6V- oder 12V-Akkumulator zu speichern. Wenn also kein Getriebe vor den Generator geschaltet werden soll, muss eine Maschine ausgewählt werden, die im Generatorbetrieb bei 239 U/min bereits annähernd 6 oder 12 Volt liefert. Da die meisten Maschinen in diesem Leistungsbereich mit wesentlich höheren Drehzahlen arbeiten, lassen sich der Anbau eines Getriebes und der damit verbundene Wirkungsgradverlust kaum vermeiden. Durch ein Getriebe kann auf Kosten des Drehmoments eine Erhöhung der Drehzahl erfolgen.

Ein weiter wichtiger Aspekt, der bei der Auslegung des Motors zu berücksichtigen ist, ist die erhöhte Drehzahl im Motorbetrieb. Hier wird, wie zuvor beschrieben, eine 2 bis 5-fache Drehzahl des Generatorbetriebs benötigt. Da die Drehzahl der Maschine direkt von der Spannung abhängt, kann durch eine Spannungserhöhung im Motorbetrieb die gewünschte Drehzahl erreicht werden. Um dies in dem geforderten Bereich zu ermöglichen, müsste der Motor also bei einer Spannung von etwa 24-36V betrieben werden können. Die Bereitstellung dieser erhöhten Spannung könnte durch eine Reihenschaltung von den verwendeten Akkumulatoren realisiert werden, soll hier aber nicht weiter diskutiert werden.

Hersteller von Kleinstmotoren für den beschriebenen Leistungs- und Spannungsbereich von 6-10 Watt und 6-36 Volt sind die Maxon und Faulhaber. Diese Firmen sind auf hochqualitative, kompakte Kleinstmotoren mit hohen Wirkungsgraden für den Modellbaubereich spezialisiert. Nebenstehend ist, als Beispiel, das Drehmoment-Drehzahl-Diagramm eines Faulhaber-Motors, welcher in dem benötigten Leistungs- und Spannungsbereich arbeitet, zu sehen. In dem Diagramm sind die empfohlenen Drehzahlbereiche von dem Wellendrehmoment zu erkennen. [6]

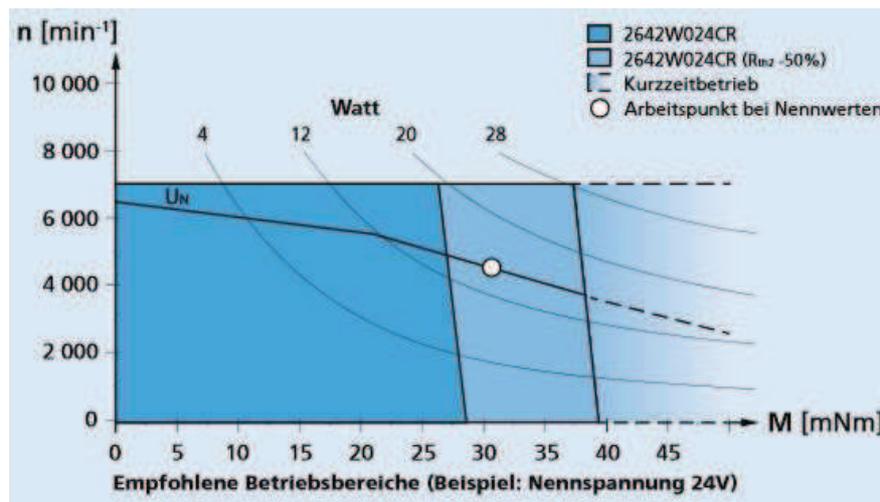


Abbildung 32: Faulhaber Serie 2642 CR, Quelle: [6]

Allerdings arbeitet dieser Motor mit wesentlich höheren Drehzahlen als gefordert. Das gleiche trifft auf ähnliche Modelle von Maxon zu [11]. Um diese zu verwenden, wäre also ein mehrstufiges Getriebe erforderlich. Obwohl von diesen beiden Herstellern Motoren mit angebauten Getrieben direkt als Getriebemotoren vertrieben werden, bringt dies einige Nachteile mit sich. Zum einen steigen die Wirkungsgradverluste durch ein Getriebe [6][11]. Zu berücksichtigen ist auch, dass durch ein mehrstufiges Getriebe das Drehmoment und somit das Anlauf- bzw. Anhaltemoment enorm steigt. Dies kann zu Problemen beim Start der Steigphase führen. Der wichtigste Grund jedoch, warum sich im Rahmen dieser Studienarbeit nicht für einen Motor der besagten Hersteller entschieden wurde, sind die Kosten. Aufgrund der hohen Leistungsdichte und der kompakten Bauweise werden für solche Motoren Beträge von 150-200 Euro verlangt [6][11]. Eine Alternative bietet die chinesische Firma Unite Motor Ltd. Bei diesem Anbieter lassen sich kostengünstige DC-Motoren in dem geforderten Leistungsbereich finden [19]. Ein Vorteil dieser Motoren ist auch, dass ihre Nennzahl bereits im Bereich von 2000-3000 U/min liegt und daher für unsere

Anwendung eine kleinere Übersetzung benötigt wird. Bei Kosten von etwa 30 Euro fällt der Wirkungsgrad bei diesen Motoren allerdings leicht geringer aus. Auch die Leistungsdichte leidet, wodurch die Baugröße wächst. [19]

Über private Kontakte konnte zu Versuchszwecken kostenlos ein Motor erstanden werden, welcher in dem Verhalten den Motoren der Firma Unite Motor ähnelt. Bei dem Motor handelt es sich um einen langsam laufenden DC-Motoren von der Firma Ametek mit einer Nennspannung von 30V. Auf dem folgenden Bild ist dieser Motor zu sehen.



Abbildung 33: Ausgewählter Gleichstrommotor

Aufgrund fehlender Kennwerte wurde das Motorverhalten im Generatorbetrieb ausführlich getestet. Dazu wurde die Motorwelle in einer Drehmaschine angebracht und zu verschiedenen Umdrehungen Stromstärke und Spannung gemessen. Als Verbraucher wurden fünf 12 Volt Glühlampen mit einer Nennleistung von jeweils 5 Watt in Reihe geschaltet. Die bei diesem Versuch gemessenen Spannungs- und Stromwerte, sowie die sich daraus ergebenden Widerstands- und Leistungswerte lassen sich der untenstehenden Tabelle entnehmen. [12]

Drehzahl in U/min	Spannung in Volt	Stromstärke in Ampere	Widerstand in Ohm	Leistung in Watt
40	0,25	0,32	0,78	0,08
63	0,48	0,48	1,00	0,23
80	0,76	0,59	1,29	0,45
100	1,14	0,69	1,65	0,79
125	1,77	0,78	2,27	1,38
160	2,59	0,98	2,64	2,54
200	3,71	1,02	3,64	3,78
250	5,18	1,17	4,43	6,06
315	6,83	1,33	5,14	9,08
400	9,16	1,54	5,95	14,11
500	12,35	1,78	6,94	21,98

Tabelle 9: Messwerte des ausgewählten Motors, Quelle: [12]

Der Widerstand der Glühfäden steigt erheblich durch deren Erwärmung. Interessant ist eine qualitative graphische Betrachtung der Größen Spannung, Stromstärke und Leistung in Abhängigkeit von der anliegenden Drehzahl:

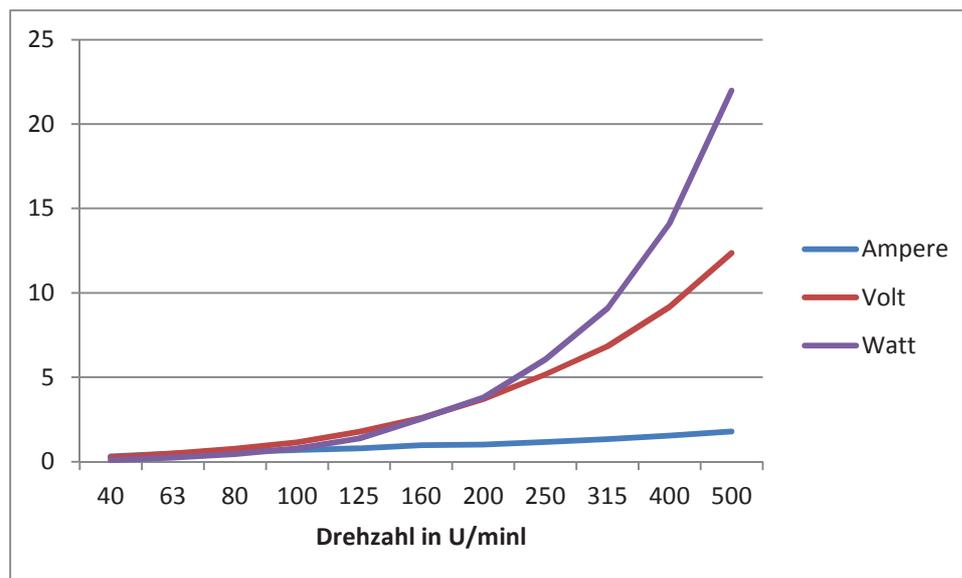


Abbildung 34: Verhalten der ausgewählten Maschine

Während sich die Stromstärke nur in einem sehr kleinen Bereich verändert und annähernd linear verhält, scheinen Spannung und daher auch Leistung einen exponentiellen Anstieg bei einer höher werdenden Drehzahl zu erfahren.

Das Entscheidende bei dieser Maschine ist, dass sie im Generatorbetrieb bereits bei ca. 300 U/min eine Spannung von über 6 Volt erzeugt und bei 500 U/min über 12 Volt anliegen. Das bedeutet, dass eine leichte Übersetzung der Haspeldrehzahl von

ca. 240 U/min ausreicht, um eine Spannung zum Laden von 6- oder 12-Volt Batterien zu erzeugen. Wenn eine leicht höhere Steiggeschwindigkeit als die optimale von 1,5m/s gewählt wird, kann bereits an der Haspel eine Drehzahl von über 300 U/min erzeugt werden. Somit könnte zum Laden von 6-Volt Batterien komplett auf eine Übersetzung verzichtet werden. Auch bewegt sich die erzeugte Leistung des Generators bereits bei 300 U/min genau in dem benötigten Bereich. Weiterhin besitzt die Maschine eine Nennleistung von über 30-Volt und kann somit im Motorbetrieb problemlos mit der 2-3-fachen Spannung des Generatorbetriebs arbeiten, um eine entsprechende Einholgeschwindigkeit zu erreichen. Daher ist dieser Motor für den benötigten Anwendungsfall gut geeignet und wurde für den Aufbau der Bodenstation ausgewählt.

Die erzeugte Leistung durch diesen konzeptionellen Aufbau bewegt sich, wie bereits erwähnt, in einem viel zu geringen Bereich, um sinnvoll genutzt zu werden. Falls ein Ausbau der Station mit einer Auslegung für höhere Windgeschwindigkeiten oder größere Drachen vollzogen wird, kann der Einsatz einer elektrisch erregten Maschine nach dem fremderregten oder Reihenschluss-Prinzip erwogen werden, wodurch eine genauere Steuerung möglich ist. Dazu kann gegebenenfalls ein Startergenerator, wie er in der Ausarbeitung von Schubert/Packeiser vorgeschlagen wird, verwendet werden. Allerdings nimmt hier der elektronische Steuerungsaufwand deutlich zu.

## 5 Zusammenfassung und Fazit

Es ist uns gelungen, einen einfachen mechanischen Aufbau eines Drachenkraftwerkes zu realisieren. Weder kostenintensive oder hochkomplexe Bauteile und Komponenten wurden verwendet. Vieles ließ sich aus alten Teilen oder dem vorhergehenden Kraftwerk verwenden. Wir konnten die Grundanforderungen hinsichtlich der Mobilität, der Einfachheit und Robustheit erfüllen. Die Aufbauten der Elektrotechniker konnten allerdings noch nicht mit den mechanischen Komponenten, speziell mit der elektrischen Maschine verbunden und im Praxisbetrieb erprobt werden. Der hier aufgebaute Prototyp erfüllt auch nicht die ursprünglich veranschlagten Leistungsanforderungen. Für eine größere elektrische Maschine und einen Drachen mit äquivalentem Leistungsniveau wurden uns von der DHBW leider keine weiteren Gelder zur Verfügung gestellt.

Weiterhin wurden ausführliche Leistungsbetrachtungen und Messungen an der elektrischen Maschine durchgeführt. So werden Leistungserwartungen zu Steig- und Rückholphase besprochen. Auch erfolgen eine Einschätzung von Ungenauigkeiten und eine Berechnung der Leistungsverluste bei suboptimalen Betriebsverhältnissen. Dazu werden theoretische Grundlagen zu Gleichstrommaschinen gelegt. Auf der Basis dieser Erkenntnisse kann sowohl eine technische als auch wirtschaftliche Auswahl der Maschine getroffen werden. Auch lassen sich bei anderen Leistungsbereichen sehr einfach neue Maschinen für das Kraftwerk auswählen. Hierzu werden auch Empfehlungen gegeben.

Um das Verhalten der elektrischen Maschine und die genaue Leistung des Gesamtkraftwerkes zu bestimmen ist ein Praxistest unbedingt erforderlich. Wir haben Wert darauf gelegt, das Konzept des Drachenkraftwerkes einfach und leicht verständlich zu gestalten. Die Modularität des Aufbaus lässt ein einfaches Um- oder Aufrüsten des Prototyps zu.

## Literaturverzeichnis

[1]	Arduino (2014):	<a href="http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno">http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno</a> (27.12.2014)
[2]	Berkhout, V. & 11 Mitautoren (2013)	<i>Windenergie Report Deutschland 2012</i> . Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik, Kassel 2013, S22 (14.12.2014)
[3]	Bohlinger, M. (2012)	<i>Is Class 2 the new Class 5? Recent Evolution in Wind Power Technology and Implications for New England</i> AWEA Regional Wind Energy Summit 2012, Folie 6 (27.12.2014)
[4]	Bürger, M. / Megerle, J. (2014)	Formeln, Diagramme, Tabellen – Maschinenelemente, Eberhart-Schott-Schule Schwetzingen 2014
[5]	Erneuerbare Energien (2014):	<a href="http://www.erneuerbareenergien.de/weltgroesste-offshore-turbine-errichtet/150/469/74200/">http://www.erneuerbareenergien.de/weltgroesste-offshore-turbine-errichtet/150/469/74200/</a> (23.12.2014)
[6]	Faulhaber GmbH & Co. KG (2015):	<a href="https://fmcc.faulhaber.com/de/">https://fmcc.faulhaber.com/de/</a> (07.01.2015)
[7]	Fischer, R. (2009):	Elektrische Maschinen, 14., aktualisierte und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag München 2009
[8]	Hagl, R. (2013):	Elektrische Antriebstechnik, Carl Hanser Verlag München 2013
[9]	Hausmann, F. (2014):	Nachhaltige Energiesysteme - Vorlesungsskript Windenergie, Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim – Fakultät Technik 2014
[10]	Kiehne, H.A. & 11 Mitautoren (2000):	<i>Batterien: Grundlagen und Theorie, aktueller technischer Stand und Entwicklungstendenzen</i> . 4. Völlig neu bearb. Aufl. – Renningen-Malmsheim: expert verlag, 2000, Kontakt & Studium ; Bd. 57 (2.1.2015)
[11]	Maxon Motor GmbH (2011, 2015):	DC – Das wichtigste über Maxonmotoren, Maxon Motor GmbH (2011), <a href="http://www.maxonmotor.de">http://www.maxonmotor.de</a> (07.01.2015)

[12]	Meininger, E. (2014):	Beratende Tätigkeit, Entwicklung und Maschinenbau Ernst Meininger, Verden (2014)
[13]	Schubert, M. / Packeiser, D. (2014):	Entwicklung von ferngesteuerten Faltmechanismen für Flugdrachen, Duale Hochschule Baden-Württemberg Mannheim – Fakultät Technik 2014
[14]	Siedel, W. (2007)	Werkstofftechnik: Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung. 7. Aufl. – München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2007 (2.1.2015)
[15]	Sonne Wind Wärme (2014):	<a href="http://www.sonnewindwaerme.de/windenergie/vestas-hat-erste-v164-80-errichtet">http://www.sonnewindwaerme.de/windenergie/vestas-hat-erste-v164-80-errichtet</a> (23.12.14)
[16]	Spring, E. (2009):	Elektrische Maschinen – Eine Einführung, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009
[17]	Stölting, H.-D. / Kaltenbach, E. (2006):	Handbuch elektrische Kleinantriebe, 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag München Wien 2006
[18]	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (2014):	<a href="http://www.stvzo.de">http://www.stvzo.de</a> (07.01.2015)
[19]	Unite Motor Co., Ltd. (2015):	<a href="http://www.unitemotor.com/en/productmin.htm">http://www.unitemotor.com/en/productmin.htm</a> (07.01.2015)
[20]	Wiese, A. / Streicher W. / Kaltschmitt, M. (2006)	Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, 4. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006