

**Entwicklung von ferngesteuerten Faltmechanismen
für Flugdrachen**

STUDIENARBEIT

des Studienganges Maschinenbau
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim



von

Manuel Schubert und Dominik Packeiser

Abgabedatum: 13.01.2014

Bearbeitungszeitraum: 10.10.2013 – 13.01.2014

Matrikelnummern, Kurs: 7373140, TMB11CPT
3223493, TMB11CPT

Ausbildungsbetrieb: ALSTOM

Betreuer der Dualen Hochschule: Dr. Manfred Franetzki

Ehrenwörtliche 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

Schubert, Manuel

Packeriser, Dominik

Abstract

In the future the world population will need more and more energy. Renewable energy is indispensable to cover these increasing needs. Today, a big part of the worldwide renewable energy is produced by wind turbines. But the low base load capacity is the main disadvantage of wind turbines. In addition to this, emerging nations can't afford those wind turbines because of their expensiveness. For this reason emerging nations do not have the possibility to use renewable energy.

A wind power plant, which is able to use wind in a height about 250 meters could be the solution of these presented problems and difficulties. The wind in this height is stronger and more continual.

A kite power plant uses a kite to produce energy. This kite has the ability to fly about a height of 250 meters and can use the strong and continual wind. On condition that the construction of the kite power plant has to be cheap and simple, it can be produced and used in an emerging nation.

The effective power output may be less than 1000 watt. For this reason the kite power plant has to be used in regional applications. In emerging nations the energy of a kite power plant can be used for electric lighting, water pumps or farm equipment.

The development of a cheap and simple kite power plant is the ambition of this paper. In this context different wind turbine systems and kite power systems are compared. Furthermore a radio control for the kite power plant has to be produced. The function of this radio control is to fold the kite while it is flying.

Zusammenfassung

Um den stetig steigenden Energiebedarf der Weltbevölkerung zu decken, sind in Zukunft erneuerbare Energien unabdingbar. Heute schon werden weltweit große Teile der erneuerbaren Energie durch Windkraftanlagen erzeugt. Wesentlicher Nachteile dieser Anlagen sind die unzureichende Grundlastfähigkeit und die finanziellen Aufwände, die es vor allem Schwellenländern nicht ermöglichen, diese Energieformen zu nutzen.

Lösungsansatz dieser Probleme ist ein möglichst kleines, dezentral aufgestelltes Höhenwindkraftwerk, welches mittels eines handelsüblichen Einleiner-Drachens konstant wehende Höhenwinde zur Energieerzeugung nutzt. Der Aufbau eines solchen Kraftwerkes soll möglichst simpel sein, sodass der Bau mit einfachsten Mitteln direkt am Einsatzort erfolgen kann. Da die erzeugte Leistung sich im (Kilo-) Wattbereich befindet, sollen mit dieser Technik keine großen Versorgungsnetzte versorgt werden, sondern die regionale Anwendung, wie zum Beispiel Beleuchtung, Wasserpumpen und landwirtschaftliches Gerät, in Schwellenländern unterstützt werden.

Kernbauteil dieses Kraftwerkes stellt der Flugdrachen dar, der intervallartig im Wind auf- und absteigt und über ein Halteseil elektrische Energie erzeugt, indem es über eine Winde einen Generator antreibt.

Diese Ausarbeitung beschreibt den theoretischen Grundaufbau eines solchen Kraftwerkes und beschäftigt sich mit der Entwicklung diverser ferngesteuerter Faltmechanismen, die den Steig- und Sinkbetrieb des Drachens ermöglichen. Ferner werden die einzelnen Systeme verglichen, praktisch erprobt und Verbesserungspotenziale beschrieben, um das optimale System für ein Drachenkraftwerk zu ermitteln. Ebenfalls wird das optimierte System in der Praxis umgesetzt, sodass es Einsatz in einem Kraftwerk finden kann.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Energiemix in Deutschland 2010	11
Abbildung 2: Reichweite der Energieträger	12
Abbildung 3: Anzahl der Menschen ohne Zugang zu Elektrizität 2004	13
Abbildung 4: Energieverbrauch – Bruttosozialprodukt	14
Abbildung 5: Beaufort-Skala	16
Abbildung 6: Globale Zirkulation	17
Abbildung 7: Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit	18
Abbildung 8: Windgeschwindigkeiten über verschiedenen Oberflächen	19
Abbildung 9: Bauformen mit vertikaler Drehachse	21
Abbildung 10: Bauformen mit horizontaler Drehachse	22
Abbildung 11: Komponenten – horizontale Windkraftanlage	23
Abbildung 12: Nennlastverfügbarkeit	24
Abbildung 13: Kostenvergleich	25
Abbildung 14: Flugkraftwerk Magenn	27
Abbildung 15: Flying Electric Generator, Sky Windpower	27
Abbildung 16: Flying Wind Turbine, Magani Power	28
Abbildung 17: Aufstiegs- und Einholphase	29
Abbildung 18: Drachen TU Delft mit Steuereinheit	30
Abbildung 19: Schematische Systemdarstellung	34
Abbildung 20: Faltpinzip 1	35
Abbildung 21: Faltpinzip 2	35
Abbildung 22: Faltsystem 1	36
Abbildung 23: Faltsystem 2	37
Abbildung 24: Praktische Umsetzung - Faltsystem 2	38
Abbildung 25: Faltsystem 3	39
Abbildung 26: Praktische Umsetzung - Faltsystem 3	39
Abbildung 27: Kraftermittlung	40
Abbildung 28: Verschiedene Spulendurchmesser	42
Abbildung 29: Gewicht des Systems	43
Abbildung 30: Optimierung des Gewichts	44
Abbildung 31: Seilkraftkomponenten	47

Abbildung 32: Versuchsaufbau z-Wert-Ermittlung	50
Abbildung 33: gemittelte Seilkräfte	52
Abbildung 34: Prinzipskizze Variante 1	59
Abbildung 35: Prinzipskizze Variante 2	61
Abbildung 36: Die drei Zählerzustände in Steigphase	61
Abbildung 37: Prinzipskizze Variante 3	63
Abbildung 38: Prinzipskizze Variante 4	64
Abbildung 39: Schaltung Drehstromgenerator	68
Abbildung 40: Gleichgerichteter Drehstrom	69
Abbildung 41: Wirkungsgrade KFZ- Generatoren.....	70
Abbildung 42: Generatorkennlinie	71
Abbildung 43: permanenterregte Gleichstrommaschine	74
Abbildung 44: selbsterregte Gleichstrommaschine.....	75
Abbildung 45: fremderregte Gleichstrommaschine	75
Abbildung 46: Gehäuse	78
Abbildung 47: Gehäuse 2	79
Abbildung 48: Führungsschrauben - Seitenansicht	79
Abbildung 49: Führungsschrauben - Draufsicht.....	80
Abbildung 50: Einbauposition – Spindel	80
Abbildung 51: Seilführung	81
Abbildung 52: Obere Grundplatte	82
Abbildung 53: Obere Grundplatte - Draufsicht.....	82
Abbildung 54: Befestigung am Drachen	83
Abbildung 55: Fernsteuerung	84

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Rauigkeitslänge z_0	20
Tabelle 2: Richtwerte Exponent α	20
Tabelle 3: Übersicht AWE Forschungsprojekte	30
Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Systemvarianten	31
Tabelle 5: Kräfte/ Leistungen idealer Drachen.....	49
Tabelle 6: gemessene Seilkräfte	51
Tabelle 7: reale Steigleistungen	53
Tabelle 8: numerische Kontrolle der Einholverhältnisse	56
Tabelle 9: Leistungen in Abhängigkeit der Drachenfläche.....	57
Tabelle 10: Leistungen in Abhängigkeit der z-Werte	58
Tabelle 11: Nutzwertanalyse	66
Tabelle 12: Kosten Faltmechanismus.....	86
Tabelle 13: Kostenschätzung Bodenstation	87

Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Drachenfläche	m ²
b	Windbreite	mm
c _w	Strömungswiderstandsbeiwert	/
c _L	Auftriebsbeiwert	/
c _D	Strömungsbeiwert	/
d _{Winde}	Durchmesser Winde	mm
d _{Seil}	Durchmesser Seil	mm
γ	Einholverhältnis	/
E	Arbeit	Nm
E _{rot}	Rotationsenergie Schwungrad	Nm
F _w	Kraft am Hauptseil	N
F _L	Auftriebskraft	N
F _D	Anströmkraft	N
F _G	Gewichtskraft	N
G	Gewicht	kg
g	Erdbeschleunigung	m/s ²
P	Leistung	W
δ	Luftdichte	kg/m ³
s	Seilweg	m
t	Zeit	s
u	Drachengeschwindigkeit	m/s
w	Windgeschwindigkeit	m/s
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s = 1/s
x	Anzahl Windenumdrehungen	/
z	spez. Drachenbeiwert	kg/m ³

Indizes	Bezeichnung
----------------	--------------------

1	Steigphase
2	Einholphase

Inhaltsverzeichnis

Abstract	III
Zusammenfassung	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	11
2 Aufgabenstellung	15
3 Windentstehung	16
4 Abgrenzung zu anderen Windenergiesystemen	21
4.1 Vertikale Bauform	21
4.2 Horizontale Bauform	22
4.3 Vergleich konventionelle Windkraftanlage und Drachenkraftwerk	23
5 Marktanalyse	26
5.1 Stromerzeugung in der Luft	26
5.2 Stromerzeugung in einer Bodenstation	28
5.3 Projekt dieser Studienarbeit	31
6 Vergleich verschiedener Faltmechanismen	33
7 Optimierung des gewählten Faltmechanismus	42
8 Leistungsermittlung von Drachenkraftwerken	46
8.1 Theoretische Leistung von Drachensystemen	46
8.2 Reale Kräfte	50
8.2.1 Versuchsaufbau: z-Wertermittlung	50
8.2.2 Optimale Einholgeschwindigkeit	53
8.1 Drachendimensionierung	57
9 Ermittlung der Seillänge	59
9.1 Mechanische Variante über Taster auf der Seilrolle	59
9.2 Mechanische Variante mittels Markierung am Seil	61
9.3 Mechanische Variante mit Gewindespindel	63
9.4 Elektronische Variante mittels SPS	64
9.5 Nutzwertanalyse der Systeme	65

10	Auswahl des Generators und des Rückholsystems	67
10.1	Die Generatoren	67
10.1.1	Gleichstromgeneratoren	67
10.1.2	Wechselstromgeneratoren	68
10.2	Auslegung des Generators	69
10.2.1	Wirkungsgrad und Verluste	70
10.2.2	Dimensionierung des Generators	72
10.3	Die Rückholeinrichtung	74
10.3.1	Gleichstrommotor	74
10.3.2	Rückholsystem mit Schwungscheibe	76
11	Montage und Betrieb	78
11.1	Montageanleitung	78
11.2	Betriebshinweise	84
12	Kostenabschätzung	86
13	Fazit	89
14	Quellenverzeichnis	91
15	Anhang	93

1 Einleitung

Durch die Pariser Verträge vom 5. Mai 1955 wurde die zivile Nutzung von Kernenergie möglich. Im Juni 1961 wurde in Deutschland erstmals Strom aus Kernenergie in das öffentliche Netz eingespeist. In den folgenden Jahrzehnten wurde diese Form der Stromerzeugung weiter ausgebaut. Doch Bedenken über die radioaktive Strahlung waren stets vorhanden. Bis heute ist die Endlagerung von Atommüll nicht abschließend geklärt. [1]

Die Atomkatastrophe 2011 in Japan hat große Teile der Welt zum Umdenken bewegt. Die deutsche Bundesregierung hat in Folge dessen beschlossen, bis zum Jahr 2022 alle Atomkraftwerke vom Netz zu nehmen. [2] Doch wie kann der Anteil der Kernenergie am Energiemix in Zukunft ersetzt werden?

Erneuerbare Energien lieferten rund 17 % des Bruttostromverbrauchs.

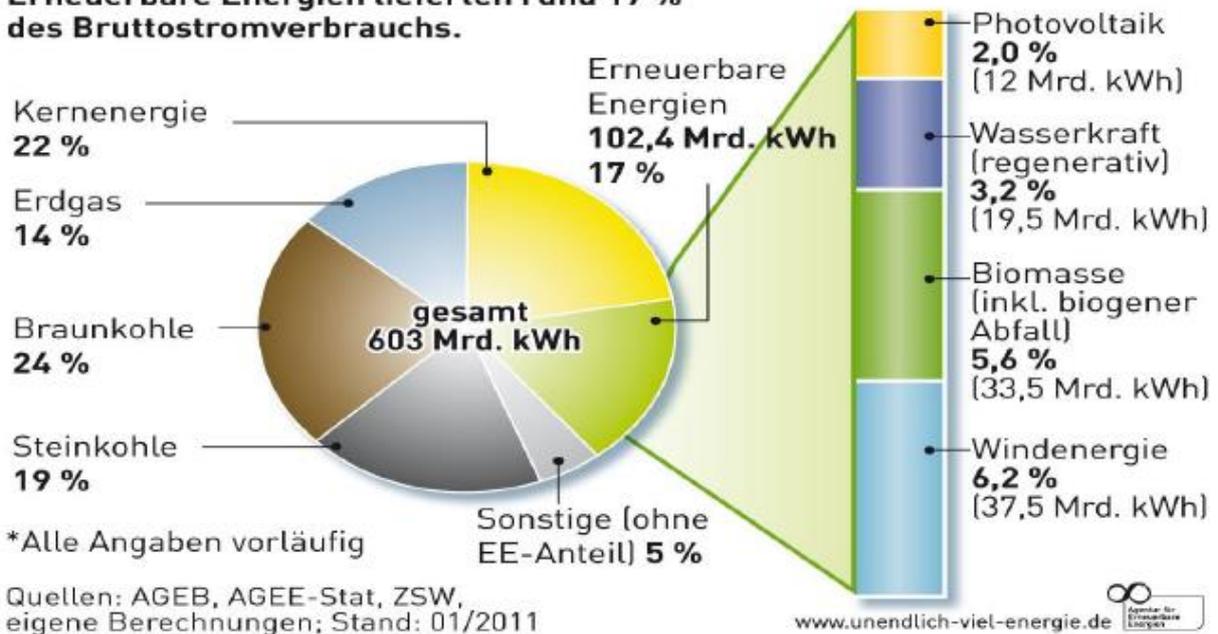


Abbildung 1: Energiemix in Deutschland 2010¹

Wie Abbildung 1 zeigt, wurden im Jahr 2010 22 Prozent der Energie in Deutschland durch Kernenergie erzeugt. Eine Lösung zum Ersatz der Kernenergie wäre der Bau von Kohle- und Gaskraftwerken. Dabei stellt sich allerdings die Frage, wie lange fossile Brennstoffe noch vorhanden sind.

¹ Enthalten in: Oettigmann, B. (2011), S. 4

Energieträger	Reserven (Mrd. t-SKE ^a)	Verbrauch/Jahr welt- weit (Mrd. t-SKE)	Reichweite [Jahre]	Vermutete Reserven [Jahre]
Steinkohle	2603	3.9	661	3434
Braunkohle	214	0.25	846	1059
Erdöl	214	5.28	40	
Erdgas	160	2.8	58	
Ölsande/-schiefer	20			
Summe fossile Brennstoffe	3211	7.2	446 ^b 141 ^c	
Uran (Mio-t)	$3.52 \cdot 10^6$	$4.14 \cdot 10^4$	85 5117 ^d	$3.63 \cdot 10^6$

Abbildung 2: Reichweite der Energieträger²

Abbildung 2 verdeutlicht, dass fossile Brennstoffe eines Tages ausgeschöpft sein werden. Bei einem mittleren Energieverbrauch von 2,1 Tonnen Steinkohleinheiten pro Kopf und Jahr wird geschätzt, dass die Erdöl- und Erdgasvorräte in 40 bzw. 58 Jahren aufgebraucht sein werden. [3] Diese Angaben variieren jedoch. Zum einen verlängert sich die Zeit durch die Anwendung neuer Techniken zur Erschließung von Erdöl- und Erdgasvorkommen, zum anderen steigt der Verbrauch stetig, wodurch die Zeitspanne verkürzt wird. Die Stein- und Braunkohlevorräte hingegen werden noch über 600 Jahre ausreichen. Generell wäre es also möglich, neue Kohlekraftwerke zu bauen. Doch ist dies aus ökologischer Sicht sinnvoll?

Die globale Erwärmung wird hauptsächlich durch den Ausstoß von CO₂ verursacht. Deshalb wird versucht, die CO₂-Emissionen zu senken. Der Bau von Kohlekraftwerken ist daher nicht sinnvoll. Der Ausbau der regenerativen Energieerzeugung hingegen ist erstrebenswert.

Im Jahr 2010 wurden 6,2 Prozent der Energie aus Windkraft erzeugt. Dies geschieht fast ausschließlich durch konventionelle Windkraftanlagen. Doch am Markt steigt die Zahl an Herstellern, die versuchen Drachenkraftwerke mit einer Nennleistung im Megawatt-Bereich zu entwerfen. Wie in Kapitel 5 noch genauer erläutert wird, grenzt sich diese Studienarbeit von diesen Kraftwerken ab.

² Enthalten in: Stieglitz, R. / Heinzl, V. (2012), S. 3

Das Ziel der Studienarbeit ist die Entwicklung eines Drachenkraftwerkes, das so günstig wie möglich hergestellt werden kann. Der Aufbau und die Bedienung des Kraftwerkes sollen dabei simpel gehalten werden. Wie lässt sich dieses Ziel erklären?

Ein Leben ohne Strom ist kaum vorstellbar. Denn ohne Elektrizität würde heute kein Auto fahren, keine Ampel funktionieren und keine Straßenlaterne leuchten. Wie wäre ein Leben ohne Fernseher und Computer? Oder wie würden wir unsere Lebensmittel kühlen? [3]

Diese Fragen müssen wir für Deutschland nicht beantworten. Doch Abbildung 3 zeigt, dass auf der Welt insgesamt über 1,5 Mrd. Menschen ohne Zugang zu Elektrizität leben.

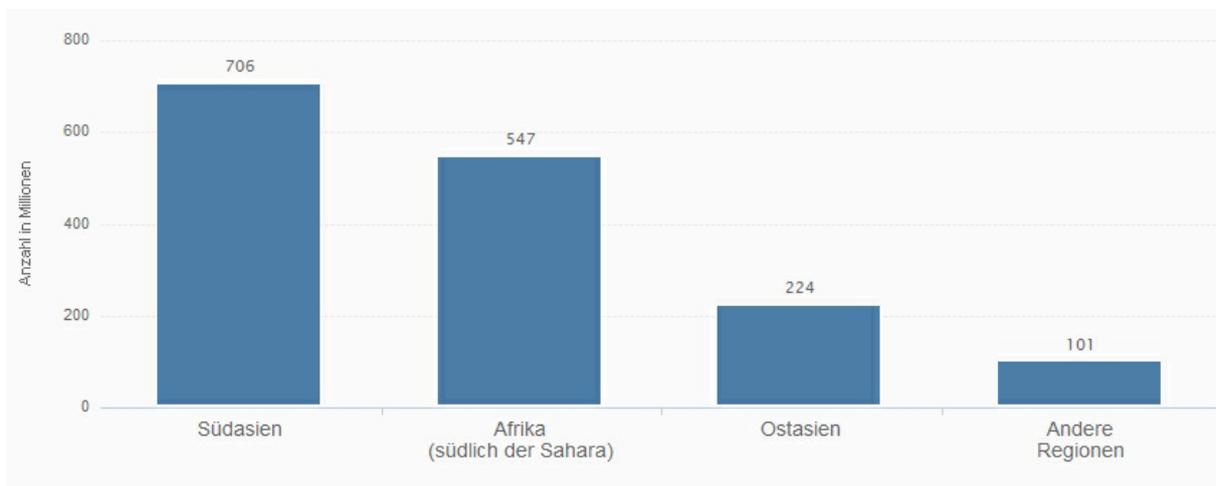


Abbildung 3: Anzahl der Menschen ohne Zugang zu Elektrizität 2004³

Bei einer weltweiten Bevölkerung von 7,2 Mrd. Menschen bedeutet dies, dass etwa 20 Prozent der Menschen keinen Zugang zu Elektrizität haben. Der Energieverbrauch eines Staates lässt sich in direkten Zusammenhang mit der wirtschaftlichen Leistung bringen. Dies wird durch Abbildung 4 verdeutlicht.

³ Enthalten in: United Nations (2013)

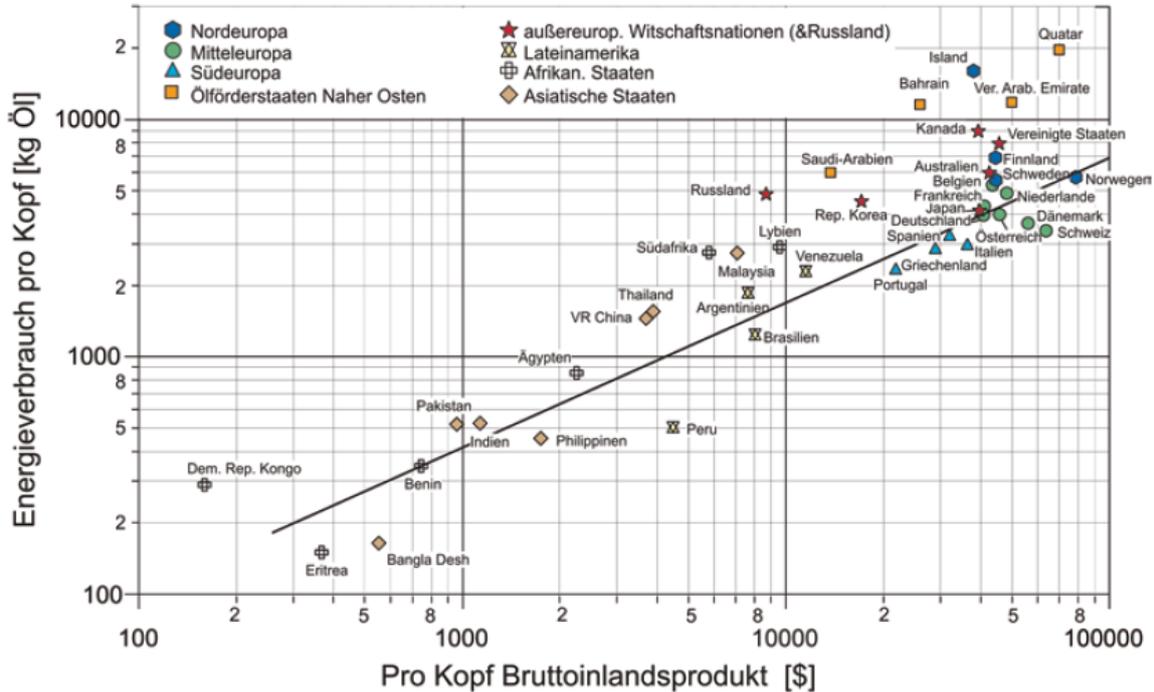


Abbildung 4: Energieverbrauch – Bruttosozialprodukt⁴

Staaten mit einem geringen Bruttosozialprodukt weisen einen geringen Energieverbrauch auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass industrielle Produktionsstätten in diesen Staaten kaum vorhanden sind. Daher wird wenig Energie verbraucht. Umgekehrt ist die wirtschaftliche Entwicklung eines Staates jedoch nur durch die Versorgung mit Energie möglich. Ohne Strom können Lebensmittel nicht gekühlt und Trinkwasser nicht gereinigt werden. Der wirtschaftliche und soziale Lebensstandard hängt daher direkt mit dem Ausbau des Stromnetzes zusammen. Mit steigendem Wohlstand steigt auch der Energiebedarf eines Staates. Doch eine flächendeckende Stromversorgung und die Stromlieferung über weiträumige Transportnetze sind in vielen Staaten nicht möglich.

Um auch wirtschaftsschwachen Staaten den Zugang zu regenerativer Energie zu ermöglichen, soll daher in dieser Studienarbeit ein günstiges Drachenkraftwerk entwickelt werden, das mobil dort eingesetzt werden kann, wo der Strom benötigt wird, ohne den Strom über ein Stromnetz transportieren zu müssen.

⁴ Enthalten in: Stieglitz, R. / Heinzl, V. (2012), S. 2

2 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel der Studienarbeit ist die Entwicklung eines funktionierenden Drachenkraftwerkes. Dabei soll ein Energieüberschuss dadurch erzielt werden, dass die erzeugte Energie eines Generators, der durch den steigenden Drachen angetrieben wird, größer ist, als die verbrauchte Energie eines Motors, der den Drachen einholt. Um den Stromverbrauch des Motors gering zu halten, soll der Luftwiderstand des Drachens beim Einholen verkleinert werden, um die auftretenden Kräfte zu reduzieren.

Die zentrale Aufgabe der Studienarbeit ist es, einen funktionierenden Mechanismus zu entwickeln und zu bauen, der den Drachen in der höchsten Steigposition einklappt bzw. seinen Luftwiderstand verringert. Dieser Mechanismus muss außerdem dafür sorgen, dass der Drachen sich nach dem Sinken wieder entfaltet und somit wieder steigt. Die Konstruktion soll ferngesteuert und später automatisch betätigt werden. Dies bedeutet, es muss weiterhin eine Mechanik theoretisch entwickelt werden, die die abgerollte Seillänge erkennt und im richtigen Moment die Signale zum Einholen bzw. Steigen gibt. Wie in der Einleitung beschrieben wird, ist der Gebrauch der Anlage für wirtschaftsschwache Räume geplant. Alle Konstruktionen sollten daher so günstig wie möglich ausgeführt werden. Die Bedienung der Anlage sollte simpel sein. Als Teil der Studienarbeit ist daher ebenfalls eine Montage- und Bedienungsanleitung zu erarbeiten.

Als Abschluss der Studienarbeit soll eine Kostenabschätzung des gesamten Drachenkraftwerkes erstellt werden. Dazu muss ein Generator bzw. ein Motor ausgewählt werden. Um diese Auswahl zu ermöglichen, müssen die beim Steigen und Einholen des Drachens auftretenden Kräfte und Geschwindigkeiten ermittelt werden. Die optimale Einholgeschwindigkeit des Drachens ist dafür zu berechnen.

3 Windentstehung

Um das Potenzial von Drachenkraftwerken aufzuzeigen, wird zunächst auf die Entstehung von Wind und auf das Windangebot in großen Höhen eingegangen.

Die Windstärke wird nach der Beaufort-Skala gemessen. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen der Windgeschwindigkeit und deren Auswirkung auf die Umgebung. Abbildung 5 zeigt die Skala.

Beaufort-grad	Bezeichnung	Mittlere Windgeschwindigkeit in 10m Höhe über freiem Gelände		Beispiele für die Auswirkungen des Windes im Binnenland
		m/s	km/h	
0	Windstille	0 - 0,2	< 1	Rauch steigt senkrecht auf
1	leiser Zug	0,3 - 1,5	1 - 5	Windrichtung angezeigt durch den Zug des Rauches
2	leichte Brise	1,6 - 3,3	6 - 11	Wind im Gesicht spürbar, Blätter und Windfahnen bewegen sich
3	schwache Brise schwacher Wind	3,4 - 5,4	12 - 19	Wind bewegt dünne Zweige und streckt Wimpel
4	mäßige Brise mäßiger Wind	5,5 - 7,9	20 - 28	Wind bewegt Zweige und dünnere Äste, hebt Staub und loses Papier
5	frische Brise frischer Wind	8,0 - 10,7	29 - 38	kleine Laubbäume beginnen zu schwanken, Schaumkronen bilden sich auf Seen
6	starker Wind	10,8 - 13,8	39 - 49	starke Äste schwanken, Regenschirme sind nur schwer zu halten, Telegrafleitungen pfeifen im Wind
7	steifer Wind	13,9 - 17,1	50 - 61	fühlbare Hemmungen beim Gehen gegen den Wind, ganze Bäume bewegen sich
8	stürmischer Wind	17,2 - 20,7	62 - 74	Zweige brechen von Bäumen, erschwert erheblich das Gehen im Freien
9	Sturm	20,8 - 24,4	75 - 88	Äste brechen von Bäumen, kleinere Schäden an Häusern (Dachziegel oder Rauchhauben abgehoben)
10	schwerer Sturm	24,5 - 28,4	89 - 102	Wind bricht Bäume, größere Schäden an Häusern
11	orkanartiger Sturm	28,5 - 32,6	103 - 117	Wind entwurzelt Bäume, verbreitet Sturmschäden
12	Orkan	ab 32,7	ab 118	schwere Verwüstungen

Abbildung 5: Beaufort-Skala⁵

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Sonne für die Entstehung des Windes verantwortlich ist. Die auf die Erde eintreffende Strahlenenergie ist nicht an jedem Standort gleich. Dies liegt darin begründet, dass die Sonnenstrahlen in unterschiedlichen Winkeln auf die Erde treffen. Am Äquator treffen die Strahlen steiler auf die Erde ein als an den Polen. Dies bedeutet, die Sonnenstrahlen durchlaufen zu den Polen einen längeren Weg durch die Erdatmosphäre. Daher ist die an den Polen ankommende Sonnenenergie geringer als am Äquator. Als Folge erwärmt sich die Erde bzw. die Luft an den Polen geringer als am Äquator. [1]

⁵ Enthalten in: Kafka, B. (2013)

Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen kommt es zu einem Energie- bzw. Wärmetransport vom Äquator zu den Polen. Dieser Wärmetransport kommt durch den Austausch von Luftmassen zustande. Es entsteht Wind. Etwa zwei Prozent der auf die Erde eintreffende Sonnenstrahlung wird in Wind umgewandelt.

Die entstehenden, weltweiten Luftzirkulationen werden durch die Erdrotation abgelenkt, wodurch relativ gleichmäßige Winde entstehen. Diese werden Nordost- bzw. Südost-Passat genannt. Dieser Effekt wird aus Abbildung 6 ersichtlich.

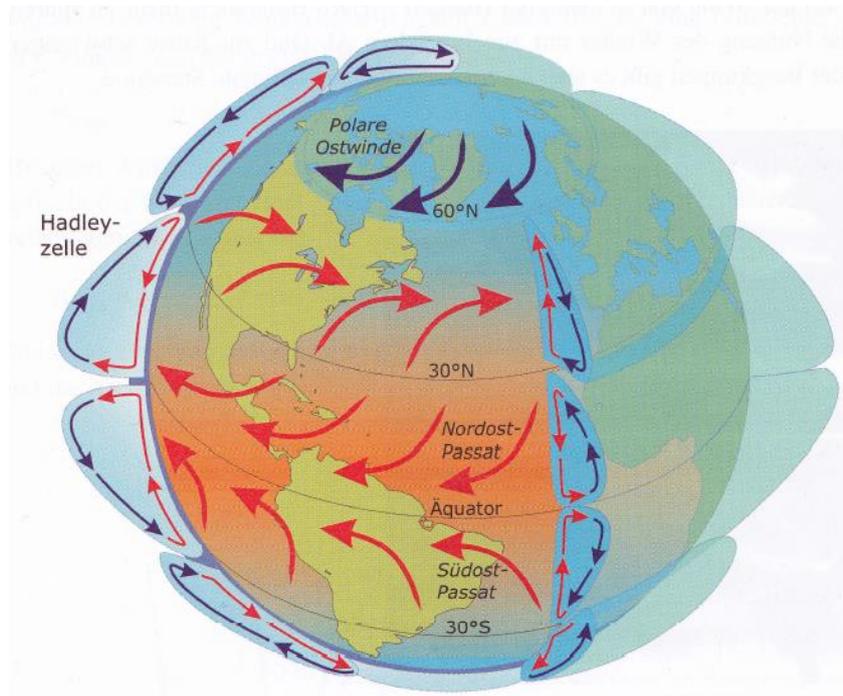


Abbildung 6: Globale Zirkulation⁶

Zu den globalen Effekten kommen noch lokale Einflüsse hinzu. Einer dieser Einflüsse ist die Küstennähe. Nahe der Küste kommt es zu auflandigen und ablandigen Winden. Dies geschieht, da sich das Land tagsüber schneller aufwärmt als das Wasser. Daher steigt die Luft über dem Land auf und die kühle Meeresluft strömt nach. Nachts ist dieser Effekt umgekehrt. Derartige Winde werden z.B. in großen Windparks in Kalifornien (USA) genutzt. Weitere lokale Einflüsse entstehen beispielsweise durch Gebirge. Kalte Luft strömt häufig in Form von Fallwinden mit hoher Geschwindigkeit an Berghängen hinab. [1]

⁶ Enthalten in: Quaschnig, V. (2008), S. 187

Die Globalen Luftzirkulationen werden mit abnehmender Höhe immer stärker von lokalen Einflüssen überlagert. Die Windgeschwindigkeit ist dabei stark höhenabhängig, da der Wind durch die Rauigkeit des Geländes gebremst wird. Die Geschwindigkeit nimmt zum Erdboden hin immer weiter ab und wird direkt am Boden schließlich Null. Je weniger Hindernisse das Gelände aufweist, desto unbehinderter kann der Wind strömen. Aus diesem Grund liegt auf offener See ein stärkeres Windangebot vor als an Land. Daher werden heutzutage vermehrt Offshore-Windparks gebaut. Um an Land die gleiche Leistung von Windkraftanlagen zu erreichen, müssen deutlich größere Flächen genutzt werden.

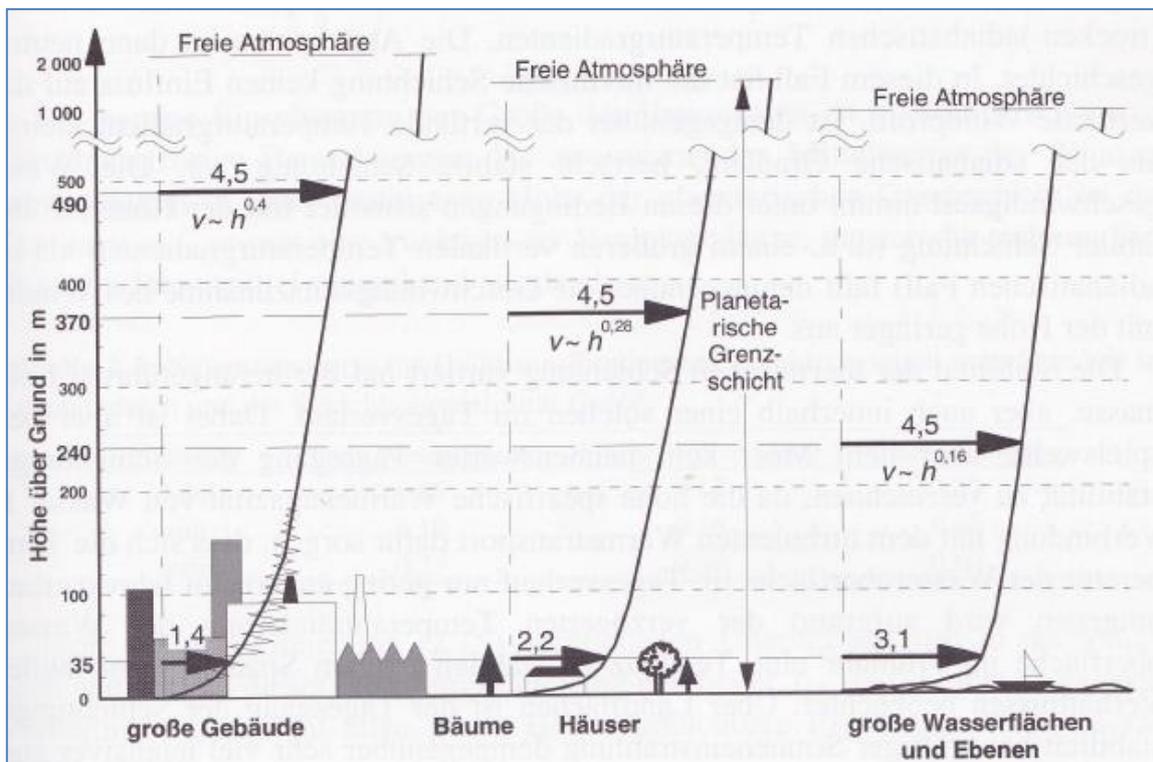


Abbildung 7: Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit⁷

Die Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit wird in Abbildung 7 verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass eine durchschnittliche Windgeschwindigkeit von 4,5 Meter pro Sekunde über großen Wasserflächen bereits bei einer Höhe von 240 Metern erreicht wird. Im Vergleich dazu, tritt diese durchschnittliche Geschwindigkeit über einem Gebiet mit großen Gebäuden erst in einer Höhe von etwa 495 Metern auf.

⁷ Enthalten in: Kaltschmitt, M. / Streicher, W. / Wiese, A. (Hrsg.) (2006), S. 67

Legt man die verschiedenen Kurven übereinander, entsteht die in Abbildung 8 dargestellte Grafik.

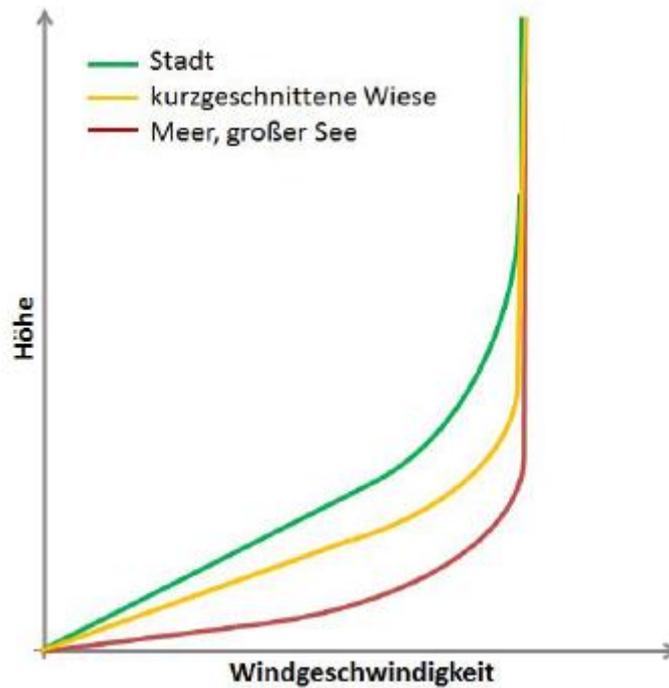


Abbildung 8: Windgeschwindigkeiten über verschiedenen Oberflächen⁸

Es ist zu erkennen, dass die Windgeschwindigkeiten in sehr großen Höhen über allen Landschaften gleich sind. Lokale Gegebenheiten haben in diesen Höhen kaum Einfluss auf die Windgeschwindigkeit. Bei geringeren Höhen laufen die Kurven jedoch auseinander. Über dem Meer werden hohe Windgeschwindigkeiten bei vergleichsweise geringen Höhen erreicht. Möchte man diese Windgeschwindigkeiten an Land nutzen, muss man größere Höhen erreichen. An dieser Stelle wird das Potenzial von Drachenkraftwerken deutlich. Während herkömmliche Windkraftanlagen eine maximale Nabenhöhe von etwa 140 Metern erreichen, können Drachenkraftwerke in größeren Höhen und damit bei schnelleren und konstanteren Winden eingesetzt werden.

⁸ Enthalten in: Hauer, K. (2013), S. 14

Durch die Messung der Windgeschwindigkeit am Boden, kann die Windgeschwindigkeit in der Höhe für verschiedene Geländeprofile näherungsweise nach Formel (1) [7] berechnet werden.

$$v(h_2) = v(h_1) * \frac{\ln(\frac{h_2}{z_0})}{\ln(\frac{h_1}{z_0})} \tag{1}$$

Dabei ist v die Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe h. Die Geschwindigkeit v(h₁) wird am Boden gemessen. Mithilfe der Rauigkeitslänge z₀ kann dann die Windgeschwindigkeit v(h₂) errechnet werden. Die Rauigkeitslänge hängt von dem jeweiligen Gelände ab. Die Werte für verschiedene Gelände können aus der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Rauigkeitslänge z₀⁹

Oberfläche	z ₀ [m]
Großstadt mit Wolkenkratzer	1,6
Stadt	1
Dorf, Wald	0,4
kurzgeschnittene Wiese	0,01
Meer, großer See	0,003

Vereinfacht kann die Geschwindigkeit auch nach Formel (2) [7] berechnet werden.

$$v(h_2) = v(h_1) * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha \tag{2}$$

Die Richtwerte für den Exponenten α sind aus Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Richtwerte Exponent α¹⁰

Oberfläche	α
offenes Gelände (Wasser, Ackerland, Wüste)	0,16
Gelände mit Hindernissen (Wald, Siedlung)	0,28
große Hindernisse (Großstadt)	0,40

⁹ Enthalten in: Hauer, K. (2013), S. 15

¹⁰ Enthalten in: Hauer, K. (2013), S. 15

4 Abgrenzung zu anderen Windenergiesystemen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel erläutert wurde, welches Potenzial Drachenkraftwerke durch das größere Windangebot aufweisen, soll im Folgenden ein Vergleich zwischen der konventionellen Stromerzeugung mit Windkraftanlagen und der Stromerzeugung mithilfe eines Drachenkraftwerkes erstellt werden. Konventionelle Windkraftanlagen lassen sich in Anlagen mit horizontaler oder vertikaler Drehachse unterscheiden. Zunächst wird auf den Aufbau und die Eigenschaften von Windkraftanlagen eingegangen.

4.1 Vertikale Bauform

Die vertikale Bauform hat den Vorteil, dass die Windrichtung zur Erzeugung der Rotation keine Rolle spielt. Abbildung 9 zeigt verschiedene Bauformen mit vertikaler Drehachse.



Abbildung 9: Bauformen mit vertikaler Drehachse¹¹

Generell lassen sich mit dieser Bauform jedoch keine großen Strommengen produzieren. Da durch Anlagen mit vertikaler Drehachse allerdings eine geringere Geräuschbelastung entsteht, können sie auch in der Nähe von Wohngebieten angewendet werden. Daher finden Systeme mit vertikaler Drehachse Einzug in das private Segment. [8]

¹¹ Enthalten in: Deutsches CleanTech Institut (Hrsg) (2009), S. 17

4.2 Horizontale Bauform

Abbildung 10 zeigt die verschiedenen Rotorbauformen mit horizontaler Drehachse.

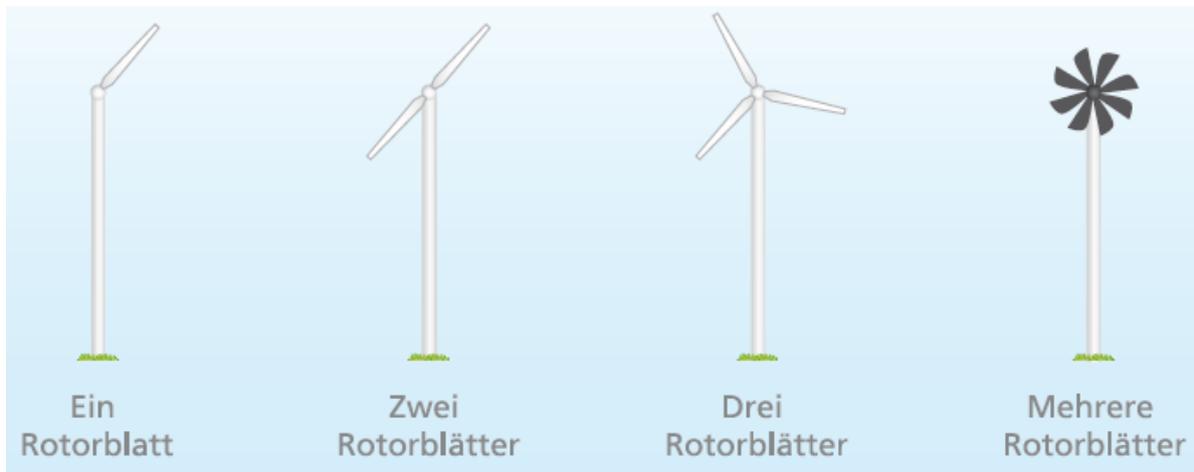


Abbildung 10: Bauformen mit horizontaler Drehachse¹²

Im Gegensatz zu Systemen mit vertikaler Drehachse ist hier die Windrichtung entscheidend. Durch Windgeschwindigkeits- und Windrichtungsmessgeräte müssen die momentanen Windverhältnisse bestimmt werden, damit die gesamte Anlage sowie die Rotorblätter optimal eingestellt werden können. Dadurch kann allerdings ein Blatt ausreichen, um eine Rotation zu erzeugen. In den 1980er und 1990er Jahren wurde daher häufig versucht, Anlagen mit weniger als drei Blättern am Markt zu etablieren. Ein- und zweiblättrige Anlagen konnten sich jedoch nicht durchsetzen. Zwar weisen sie durch die geringere Anzahl an Rotorblättern auch geringere Herstellungskosten auf, jedoch hat sich gezeigt, dass dreiblättrige Anlagen ruhigere Betriebs- und Laufleistungen haben, welche sich positiv auf ihre Lebensdauer auswirken. Zudem wurde festgestellt, dass dreiblättrige Anlagen den größten Leistungsbeiwert aufweisen, wodurch höhere Wirkungsgrade erreicht werden können. Bei Anlagen mit mehr als drei Blättern beeinflussen sich die Luftverwirbelungen der einzelnen Blätter, wodurch der Wirkungsgrad sinkt. Da das dreiblättrige System die am häufigsten verwendete Bauform ist, wird nun genauer auf diese Bauform eingegangen.

¹² Enthalten in: Deutsches CleanTech Institut (Hrsg) (2009), S. 17

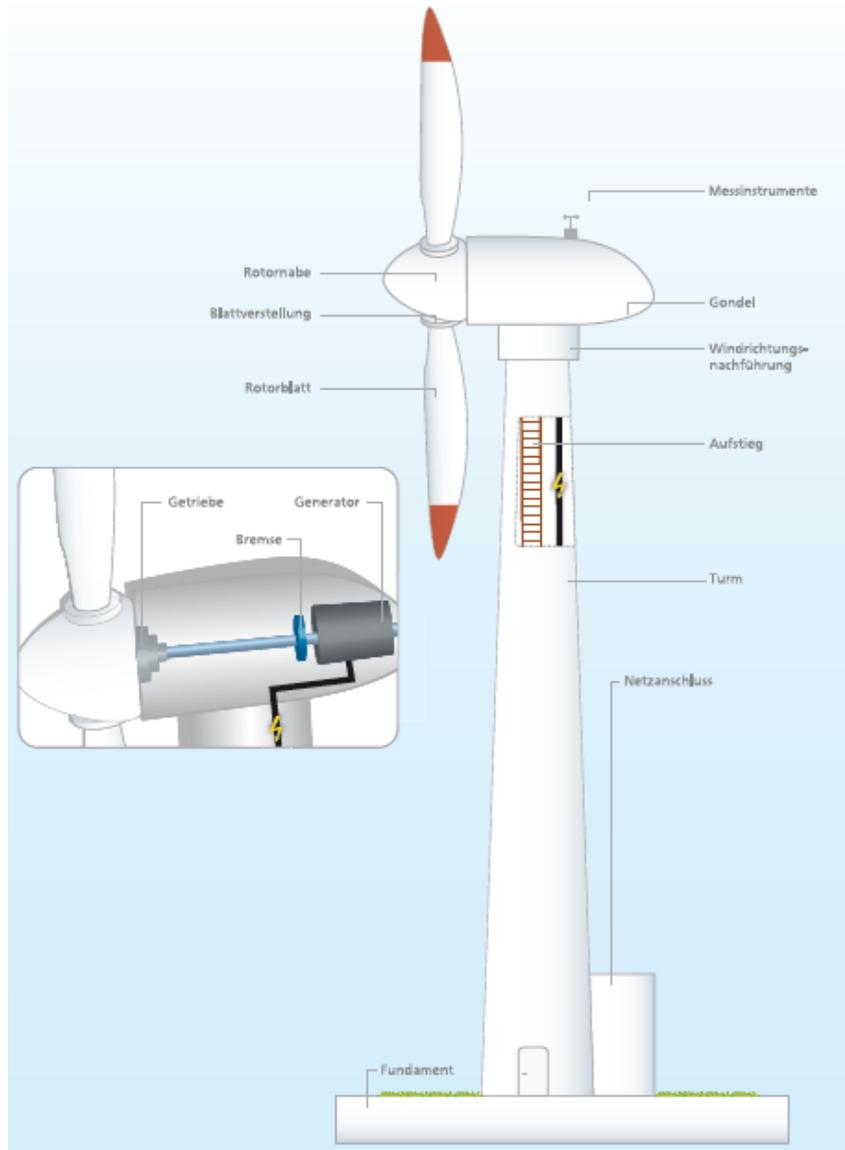


Abbildung 11: Komponenten – horizontale Windkraftanlage¹³

Wie die Abbildung 11 zeigt, besteht die Anlage aus vielen verschiedenen Komponenten. Die wesentlichen Bestandteile einer horizontalen Windkraftanlage sind die Maschinengondel, in der sich der Generator und das Getriebe befinden, die Rotorblätter und die Nabe. Die Gondel ist drehbar auf dem Turm gelagert. Im Turm selbst sind verschiedene elektrische Komponenten für den Netzanschluss zu finden. [8]

4.3 Vergleich konventionelle Windkraftanlage und Drachenkraftwerk

Bei der Rotation der Blätter einer Anlage mit horizontaler Drehachse entstehen große Kräfte auf die Komponenten der Anlage. Vor allem der Turm wird stark tordiert. Um die Kräfte aufnehmen zu können, muss viel hochwertiges Material verbaut werden.

¹³ Enthalten in: Deutsches CleanTech Institut (Hrsg) (2009), S. 13

Hauptsächlich besteht die Windkraftanlage aus Stahl. Das große Gewicht des Systems und die entstehenden Kräfte müssen von einem soliden Fundament getragen werden. Beim Bau einer drei Megawattanlage werden etwa 1000 Tonnen Stahl und Beton verwendet. Dieser Materialbedarf entsteht bei einem Drachenkraftwerk nicht. Anstelle eines Stahlturms werden Seile verwendet, um den Drachen zu halten. Ein großes Fundament ist daher nicht notwendig. Ein vergleichbares Drachenkraftwerkssystem der Firma EnerKite benötigt lediglich 5 Prozent dieses Materials. Ein weiterer Vorteil der Drachenkraftwerke ist der Zugang zu konstanteren und stärkeren Höhenwinden. Die Nennlast der EnerKite-Anlage wird auf eine Windgeschwindigkeit von acht Meter pro Sekunde ausgelegt. Die Nennlast der konventionellen Windkraftanlage liegt im Vergleich bei zwölf Meter pro Sekunde. Dies wird durch die Abbildung 12 verdeutlicht.

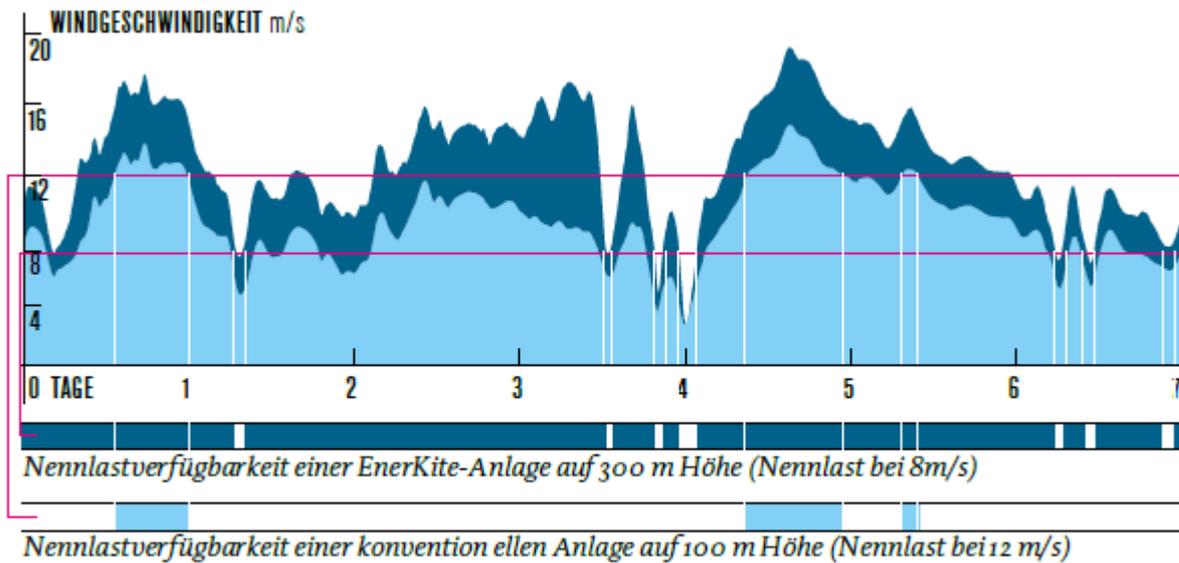


Abbildung 12: Nennlastverfügbarkeit¹⁴

Durch den Zugang zu größeren Höhenwinden ergibt sich für das Drachenkraftwerk eine höhere Nennlastverfügbarkeit. Diese Verfügbarkeit führt zu einer verbesserten Auslastung der Anlage. Während die konventionelle Windkraftanlage mit einer Nabenhöhe von 140 Metern etwa 20 bis 40 Prozent ausgelastet wird, kann ein Drachenkraftwerk in 300 Metern Höhe 50 bis 80 Prozent ausgelastet werden. Diese erhöhte Auslastung der Anlage beeinflusst die Stromgestehungskosten des Systems. Dies verdeutlicht Abbildung 13.

¹⁴ Enthalten in: Bormann, Dr. A. (2011), S. 3

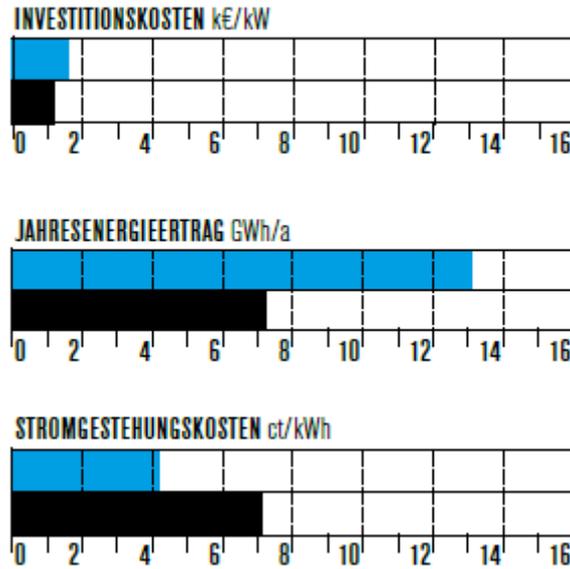


Abbildung 13: Kostenvergleich¹⁵

Zwar sind die Investitionskosten in eine EnerKite-Anlage (blau) höher, als die in eine vergleichbare drei Megawattanlage (schwarz), jedoch ist die Auslastung, wie bereits erklärt, größer. Dies führt dazu, dass die Stromgestehungskosten der EnerKite-Anlage unter den Gestehungskosten der konventionellen Anlage liegen.

Dies sind einige Vorteile eines Drachenkraftwerks. Hinzu kommen noch weitere Punkte, wie die verbesserte Mobilität und Flexibilität. Allgemein kann man die Vorteile wie folgt zusammenfassen:

- Verbesserte, konstantere Auslastung
- Verbesserte Grundlastfähigkeit
- Geringerer Strompreis
- Geringerer Materialverbrauch
- Verbesserte Mobilität
- Verbesserte Flexibilität
- Vereinfachter Aufbau (kein Turm)
- Erleichterter Rückbau (kein Fundament) [9]

¹⁵ Enthalten in: Bormann, Dr. A. (2011), S. 4

5 Marktanalyse

Im vorangegangenen Kapitel wurden konventionelle Windkraftanlagen mit einem Drachenkraftwerkssystem der Firma EnerKite verglichen. Im Folgenden sollen nun weitere Systeme vorgestellt werden, mit denen verschiedene Anbieter versuchen, Höhenwinde zu nutzen.

Flug- bzw. Fesseldrachen (engl. Kites) nehmen zunehmend Einzug in industriellen Anwendungen, wie beispielsweise als (zusätzliche) Antriebshilfe in der Hochseeschifffahrt und zur Erzeugung von Strom. Windbetriebene Energiesysteme/Airborne Wind Energy (AWE) oder auch Höhenwind Energiesysteme/High Altitude Wind Energy (HAWE) sind die modernsten Formen der Windenergienutzung. Die Begriffe AWE/HAWE stehen beide für die Nutzung der Windkraft, die in großen Höhen auftritt. Sie umschreiben viele unterschiedliche technologische Prinzipien, Ansätze und Technologien, die sich in Funktion und Bauweise teilweise stark unterscheiden.

Weltweit sind über 40 Firmen und akademische Forschungsgruppen mit der Entwicklung neuer Technologien zur Nutzung der Windkraft mithilfe von Drachen beschäftigt, u.a. auch Dr. Manfred Franetzki aus Bensheim [10].

Generell lassen sich die bestehenden Forschungsprojekte in zwei Hauptgruppen unterscheiden:

- Systeme, die Elektrizität direkt in der Luft erzeugen, und
- Systeme, die Höhenwindenergie mithilfe von Bodenstationen in elektrische Energie umwandeln.

Im Folgenden wird eine Übersicht über den aktuellen Stand der Forschungs- und Entwicklungsfortschritte in diesem Bereich gegeben.

5.1 Stromerzeugung in der Luft

AWE-Systeme, die die Windenergie direkt in der Luft in elektrischen Strom umwandeln, arbeiten in der Regel alle nach dem gleichen Prinzip. Es werden Generatoren, mittels flugzeug-, hubschrauber- oder ballonähnlichen Fluggeräten, in entsprechende Windregionen befördert.

Wie in den folgenden Abbildungen 14 bis 16 zu sehen ist, werden diese Generatoren entweder direkt durch den Wind (Sky Windpower und Magenn) oder durch die kreisförmige Flugbewegung des Tragflügels (Makani Power) angetrieben.

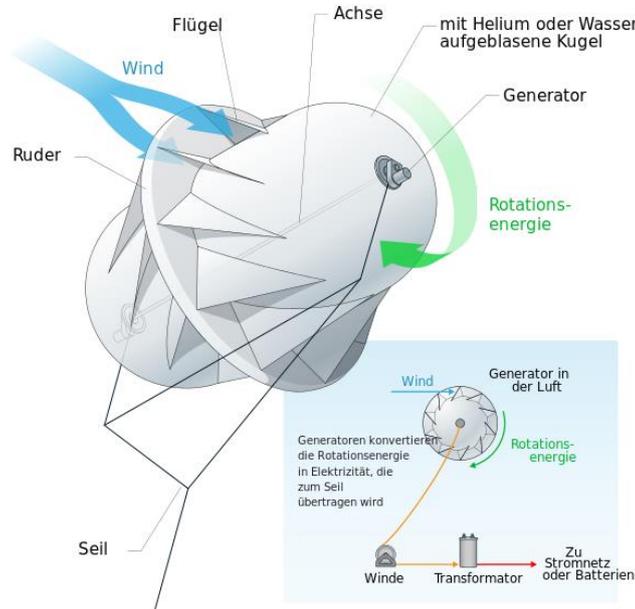


Abbildung 14: Flugkraftwerk Magenn¹⁶

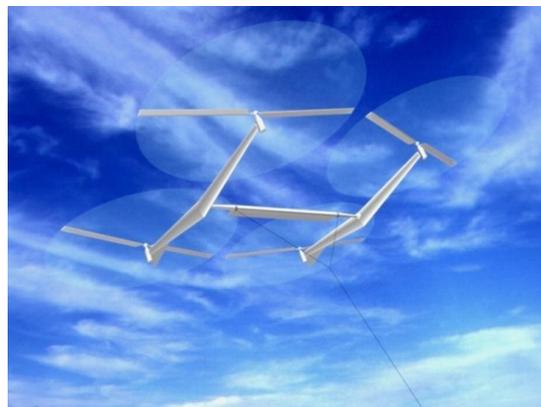


Abbildung 15: Flying Electric Generator, Sky Windpower¹⁷

¹⁶ Enthalten in: Provost, J. (2009)

¹⁷ Enthalten in: Oettigmann, B. (2011), S. 18



Abbildung 16: Flying Wind Turbine, Magani Power¹⁸

Diese Systeme haben den entscheidenden Vorteil, dass sie alle ohne bodennahe Winde starten können. Somit werden diese Systeme mit Sekundärenergie, genauer mittels Auftriebskraft leichter Gase oder Propellerantrieb, in windreichere Höhen befördert. Nachteilig ist jedoch, dass diese HAWE's ein deutlich höheres Eigengewicht besitzen als Systeme, die Elektrizität in einer Bodenstation erzeugen. Das hohe Eigengewicht ist erstens durch die in der Luft befindlichen Generatoren und zweitens durch die schwereren, stromleitenden Haltekabel begründet. Ebenfalls nachteilig ist die Gefahr durch Blitzschlag bei Unwettern, da die durch das Haltekabel geerdeten Flugkörper, wie Blitzableiter wirken [2].

5.2 Stromerzeugung in einer Bodenstation

Eine weitere Methode Höhenwinde energetisch zu nutzen, ist die Stromerzeugung mittels Bodenstation. Die meisten AWE- Systeme an denen geforscht wird, arbeiten nach diesen Grundsätzen. In der Regel werden am Boden befindliche Generatoren angetrieben, indem ein Zugseil von einer Winde abgespult wird. Möglich ist dies durch einen oder mehrere Drachen, die mittels Windenergie in energiereiche Höhen befördert werden und in Höhen von 200-1000m, theoretisch sogar bis 4500m [13], intervallartig auf- und absteigen, siehe Abbildung 17. Ein Intervall besteht somit aus einer Aufstiegsphase, in der Strom erzeugt wird, und einer Einholphase, in der das Zugseil wieder auf die Winde aufgespult wird. Um hierbei eine positive Energiebilanz zu erreichen, muss in der Rückholphase die Zugkraft am Seil deutlich kleiner sein, als in der Steigphase [2].

¹⁸ Enthalten in: Gille, D (2013)

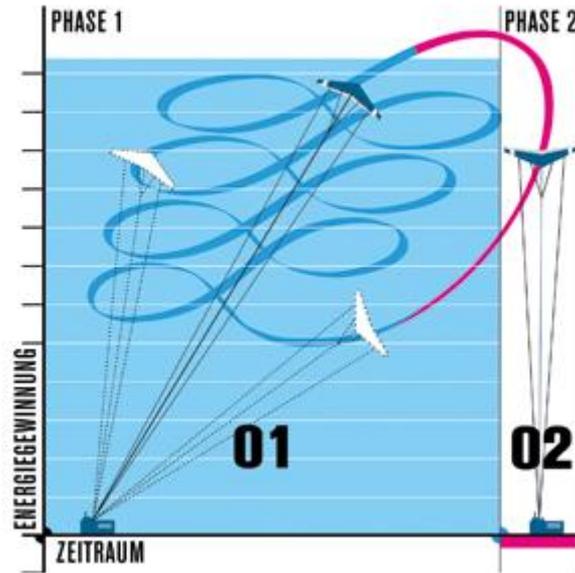


Abbildung 17: Aufstiegs- und Einholphase¹⁹

Die meisten Mitbewerber auf diesem Gebiet unterscheiden sich durch Drachenformen, -steuerung oder -lenkung.

Es gibt diverse Ansätze der Drachensteuerung. Das System der Forschungsgruppe der TU Delft integriert hierbei eine automatische Funksteuerung mit einer Steuereinheit, die direkt am Drachen hängt. Verwendet wird hierbei ein handelsüblicher Kitesportdrachen (vgl. Abbildung 18), der, wie beim Kiteboarden üblich, in Achterformationen im Wind bewegt wird und so das Seil abspult [10]. Anders dagegen funktioniert das System von EnerKite. Bei diesem System wird zwar ebenfalls der Kite in Achterformationen im Wind bewegt, allerdings wird dieser mittels Steuerleinen vom Boden aus manövriert [9]. Die aus diesem System zu entnehmende mechanische Leistung ergibt sich aus der Zugkraft am Seil und der Abroll- bzw. Seilgeschwindigkeit. Die existierenden Prototypen befinden sich laut Herstellerangaben derzeit im Leistungsbereich von 10 - 30KW.

¹⁹ Enthalten in: Bormann, Dr. A. (2011), S. 3



Abbildung 18: Drachen TU Delft mit Steuereinheit²⁰

Tabelle 3 gibt eine Übersicht über die bestehenden Forschungsprojekte im Bereich Höhenwindkraft. Auffällig ist, dass sich die meisten Forschungsprojekte mit der Stromerzeugung am Boden beschäftigen.

Tabelle 3: Übersicht AWE Forschungsprojekte²¹

Unternehmen	Flughöhe	Träger	Stromerzeugung	Land
Ampyx Power	300-600m	Segelflugzeug über einen Autopilot gesteuert	Ebenerdig	Niederlande
Crosswind Power	300-400m	Drachen	Ebenerdig	Kanada
EnerKite	100-300m	Drachen	Ebenerdig	Deutschland
ERC Highwind - KU Leuven		Forschung und Entwicklung von ebenerdigen AWE Technologien		Belgien
Joby	600m	Turbine mit mehreren Flügeln	In der Luft	USA
Kite NRG	500-1000 m	Drachen	Ebenerdig	Italien
KiteGen	800m	Drachen	Ebenerdig	Italien
LadderMill - TU Delft	150-300m	Drachen	Ebenerdig	Niederlande
Makani Power	250-600m	Kabelgebundene unbiegsame Flügel	In der Luft	USA
NTS X-wind	300-500m	Drachen	Ebenerdig auf Schienen	Deutschland
Sky Wind Power	4500m+	Eigenständiges Drehflügelflugzeug	In der Luft	USA
Swiss Kite Power		Forschung und Entwicklung von ebenerdigen AWE Technologien		Schweiz
Twind	1000m	Aerostatischer Ballon	Ebenerdig	Italien
Windlift	150m	Drachen (manuell gestartet)	Ebenerdig	USA

²⁰ Enthalten in: Vargas Evans, Manuel (2013)

²¹ Enthalten in: West, Gilbert (2013)

Zusammenfassend lässt sich über die bestehenden Forschungsprojekte festhalten, dass stets mit Vor- und Nachteilen gerechnet und mit diesen umgegangen werden muss, unabhängig davon, ob diese Strom direkt in der Luft oder via Bodenstation erzeugen. Die Tabelle 4 bietet eine Übersicht über die gegebenen Vor- und Nachteile der jeweiligen Varianten.

Tabelle 4: Vor- und Nachteile der Systemvarianten

Bodenstation	Generator in der Luft
Vorteile	
- kostengünstigeres Zugseil	- können bei Nullwind starten
- Keine Anforderungen an Generatorgewicht und -größe	- kontinuierliche Stromerzeugung in ausreichenden Höhen
- Meist einfache Flugdrachen	- Vorhersehbare Flugbahn (einfacher in Luftverkehr einzugliedern)
Nachteile	
- unterbrochene Stromerzeugung, durch Intervallfahrt	- Kostenintensives, leitendes Haltekabel
- unvorhersehbare Flugbahn	- hohe Anforderungen an die Generatoren
- erhöhte Anforderung für Nullwindstart	- aufwendigere Steuerung
	- Gefahr von Blitzschlag

5.3 Projekt dieser Studienarbeit

Das in dieser Studienarbeit entwickelte Drachenkraftwerk soll sich von den oben beschriebenen Projekten abheben. Da diese Höhenwindkraftwerke für den kommerziellen Betrieb in Industriestaaten entwickelt werden, gibt es kaum Einschränkung in Hinsicht auf Investitionen, Größe und Komplexität dieser Projekte.

Die Idee von Herrn Franetzki verfolgt dahingehend eine andere Absicht. Mithilfe der DHBW Mannheim sollen mehrere, eher unkonventionelle Windkraftwerke entwickelt

und betrieben werden. Darunter auch das hier beschriebene Drachenkraftwerk. Dieses Drachenkraftwerk soll nicht in Industrienationen zur kommerziellen Stromerzeugung eingesetzt werden, sondern vielmehr in armen Regionen ausgesuchter Schwellenländer, wie z.B. den Philippinen, die Grundversorgung an Elektrizität gewährleisten. Diese, meist landwirtschaftlich geprägten, Regionen weisen meist eine unzureichende bis gar keine Infrastruktur an Elektrizität auf. Hier könnten mehrere kleine, dezentrale Drachenkraftwerke diese Infrastruktur bereitstellen und die häusliche Grundversorgung gewährleisten. Ebenfalls ließe sich damit einfaches landwirtschaftliches Gerät, wie zum Beispiel Wasserpumpen, Getreidemühlen oder Dreschmaschinen, betreiben. Dieses Aufgabengebiet verlangt Eigenschaften, welche die High-Tech-Lösungen für Industriestaaten nicht erfüllen.

Folgende Eigenschaften sollte ein Drachenkraftwerk für Schwellenländer abdecken:

- **Einfachste Technik:**

Das Kraftwerkssystem soll direkt am Verwendungsort produzierbar sein. Demnach muss es aus Komponenten bestehen, die sich in Automobilen, Fahr- und Kleinkraftträdern wiederfinden. Ebenfalls soll der Betrieb und die Wartung von den Endverbrauchern (meist Bauern) selbst übernommen werden
- **Einfachster Aufbau:**

Es muss damit gerechnet werden, dass am Produktionsort gering ausgebildete Arbeits- und keine Fachkräfte das Kraftwerkssystem fertigen.
- **Geringe Kosten:**

Da nicht damit zu rechnen ist, dass sich die Drachenkraftwerke in Schwellenländern finanziell selbst tragen und da zurzeit noch kein Großsponsor das Projekt unterstützt, sollte der Investitionsbedarf möglichst gering gehalten werden.
- **Geringes Transportgewicht/ geringe Transportgröße**

Das System sollte möglichst kompakt und leicht sein, um es nach Klimakatastrophen, wie Erdbeben, Stürmen oder Fluten, aus der Luft in zerstörten Gebieten abzusetzen und dort eine Notstromversorgung zu gewährleisten.

6 Vergleich verschiedener Faltmechanismen

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung eines Faltsystems für den Drachen eingegangen. Der Grund, weshalb ein solches Faltsystem notwendig ist, wird im Folgenden erläutert. Die in der Steig- und Sinkphase entstehende bzw. verbrauchte Leistung des Drachenkraftwerkes lässt sich nach Formel (3) [16] berechnen.

$$P = F_w * u \quad (3)$$

Dabei ist F_w die am Hauptseil anliegende Kraft und u die Abrollgeschwindigkeit des Seiles. Die Seilkraft ist nach Formel (4) [16] zu bestimmen.

$$F_w = \frac{1}{2} * \delta * c_w * A * (w - u)^2 \quad (4)$$

Die detaillierte Berechnung der Leistung ist in Kapitel 8 zu finden. An dieser Stelle soll lediglich auf die Bedeutung des c_w -Wertes bzw. auf die Drachenfläche A eingegangen werden.

Der c_w -Wert ist der Strömungswiderstandskoeffizient des Drachens. Dieser hängt mit der Drachenfläche zusammen. Wie der Formel (4) zu entnehmen ist, gehen der c_w -Wert und die Drachenfläche in die Leistungsberechnung des Kraftwerkes ein. Um in der Steigphase möglichst viel Energie zu produzieren, müssen der c_w -Wert und die Drachenfläche groß sein. Während der Einholphase muss die benötigte Energie zum Einholen des Drachens möglichst gering gehalten werden. Um einen geringen Energieaufwand zu ermöglichen, wird daher versucht, die Drachenfläche zu reduzieren.

Während des Betriebs der Anlage steigt der Drachen zyklisch auf und wird wieder eingeholt. Es wird ein System benötigt, dass die Drachenfläche vor dem Einholen reduziert, wenn das Seil vollständig ausgerollt ist bzw. der Drachen seine höchste Flugposition erreicht hat. Nach dem Einholen des Drachens auf eine bestimmte Flughöhe, muss die Drachenfläche wieder erhöht werden, um beim Steigen erneut viel Energie zu produzieren.

An das Faltsystem werden verschiedene Anforderungen gestellt. Aus der Aufgabenstellung wird ersichtlich, dass es sich um ein ferngesteuertes System handeln soll. Es ist anzustreben, die Kosten für das System gering zu halten. Neben diesen gegebenen Randbedingungen werden jedoch noch andere Ansprüche an das System gestellt.

Einer dieser Ansprüche ist das Gewicht des Systems. Das System muss möglichst leicht sein. Dies hat zwei Gründe. Zum Einen kann ein zu hohes Gewicht die Flugeigenschaften des Drachens negativ beeinflussen, zum Anderen bedeutet ein zu hohes Gewicht zu große Verluste beim Steigen des Drachens. Ein weiterer Anspruch an das System ist die Betriebssicherheit. Es muss sichergestellt sein, dass der Drache nach der Sinkphase wieder aufklappt. Sollte er dies nicht tun, ist ein Abstürzen des Drachens sehr wahrscheinlich.

Nun wird zunächst auf die Funktionsweise der Faltmechanismen eingegangen. Anschließend werden verschiedene Ideen zur Umsetzung des Faltsystems erläutert. In Abbildung 19 ist eine schematische Darstellung des Drachens zu sehen.

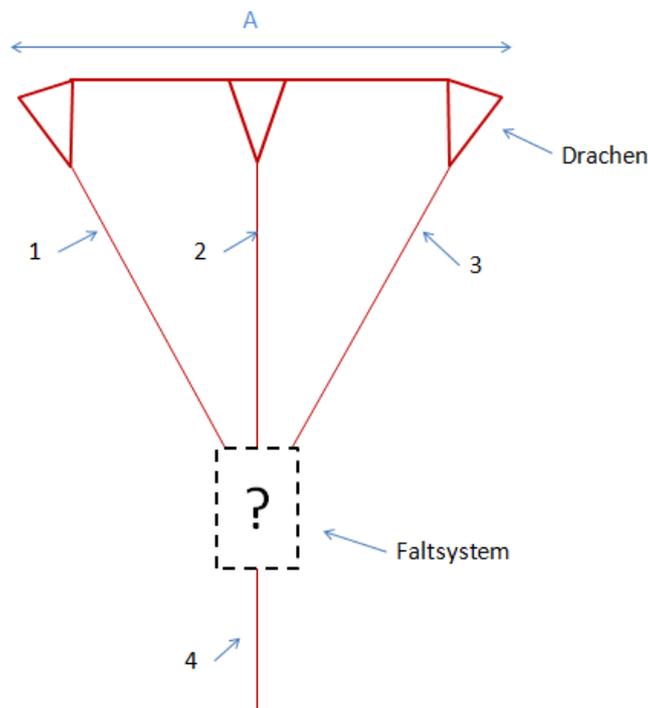


Abbildung 19: Schematische Systemdarstellung

Der Drache wird durch die Seile (1), (2) und (3) gehalten. Diese werden an einem Punkt zusammengeführt. An dieser Stelle soll sich das Faltsystem befinden. Seil (4) ist das Hauptseil und wird zum Boden geführt. Betrachtet man den Drachen von unten sieht man die angeströmte Fläche. Diese Strömungsfläche gilt es beim Sinken zu reduzieren. Eine simple Möglichkeit die Fläche zu reduzieren entsteht dadurch, die Länge der Seile (1), (2) und/oder (3) zu variieren. Bei diesem Prinzip ergeben sich zwei Varianten, wie sich der Drache falten kann. Durch die Verlängerung der Seile

(1) und (3), oder die Verkürzung des Seiles (2), klappen die äußeren Teile des Drachens nach hinten. Dies ist in Abbildung 20 zu erkennen.

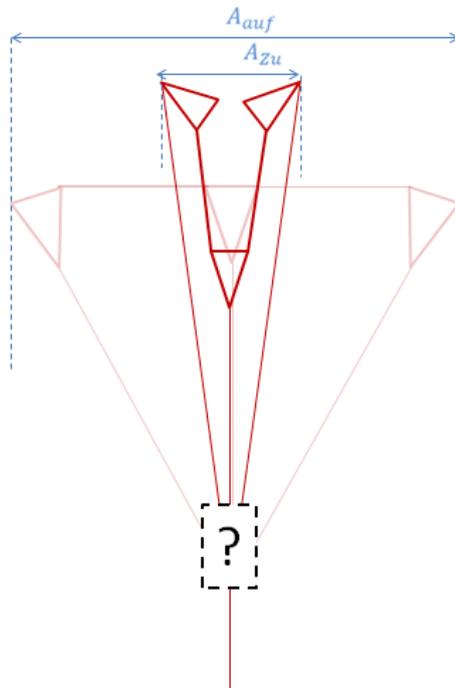


Abbildung 20: Faltpinzipp 1

Durch das Abklappen der äußeren Drachenteile wird die ursprüngliche angeströmte Drachenfläche A_{Auf} auf die Fläche A_{Zu} reduziert. Die zweite Variante des Faltpinzips ist in Abbildung 21 zu erkennen.

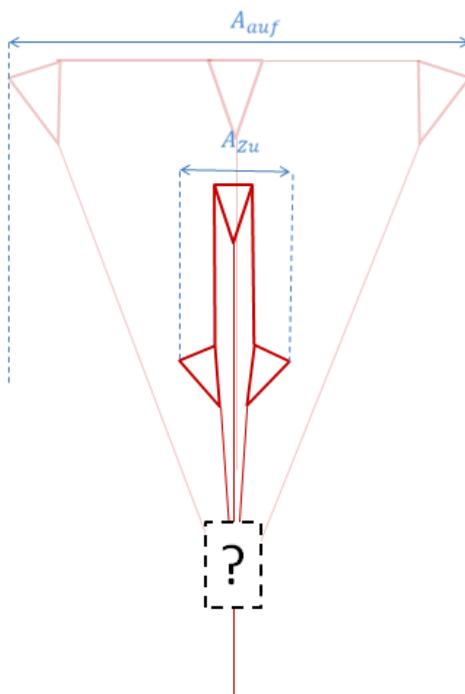


Abbildung 21: Faltpinzipp 2

In diesem Fall wird die angeströmte Fläche dadurch reduziert, dass die Außenteile des Drachens nach vorne klappen. Dies ist durch die Verkürzung der Seile (1) und (3) oder durch eine Verlängerung des Seiles (2) zu realisieren.

Zur Variation der Seillängen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Folgenden sollen dazu drei Ideen genauer erläutert werden. Das erste Faltsystem ist in Abbildung 22 zu sehen.

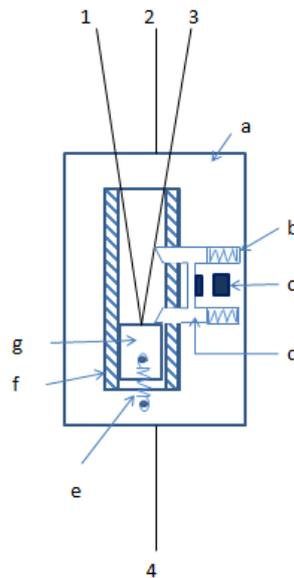


Abbildung 22: Faltsystem 1

Auf der Grundplatte (a) wird ein Profil (f) befestigt. In diesem Profil befindet sich ein Gleitstein (g). Die Seile (1) und (3) werden an dem Gleitstein, das mittlere Seil (2) an der Grundplatte befestigt. Der Drachen ist in dieser Stellung ausgeklappt, befindet sich also im Steigen. Während des Steigens wird der Gleitstein von einem Schieber (d) gehalten. Erreicht der Drachen seine maximale Flughöhe, wird der Elektromagnet (c) kurzzeitig angeschaltet und zieht den Schieber zurück. Der Gleitstein rutscht nach oben, wodurch die Seile (1) und (2) verlängert werden. Dadurch klappt der Drachen nach Faltsystem (1) ein. Die Feder (e) wird gespannt. Durch die Federn (b) wird der Schieber wieder in die Ausgangslage gebracht. Der Gleitstein bleibt dadurch in der oberen Position stehen. Erreicht der Drachen seine minimale Flughöhe, wird der Elektromagnet erneut geschaltet. Der Schieber gibt dadurch den Gleitstein frei. Die Feder (e) zieht den Gleitstein wieder in seine Ausgangsposition. Die Seile (1) und (3) werden wieder gekürzt und dadurch die Drachenfläche wieder vergrößert. Der Drachen steigt.

Dieses System bringt einige Vorteile mit sich. Einer dieser Vorteile ist der geringe Eigenstromverbrauch. Es wird nur dann kurzzeitig Strom benötigt, um den Elektromagneten zu schalten. Ein weiterer Vorteil besteht in dem geringen Gewicht des Systems, da beispielsweise kein schwerer Servomotor mitgeführt werden muss. Der Nachteil des Systems liegt in der Feder (e) begründet. Die Feder wird durch die an den Seilen anliegenden Kräfte gespannt. Diese Kräfte entstehen durch den Wind. In großen Höhen ist der Wind stärker als in niedrigeren. Man geht also davon aus, dass die Windkraft bei maximaler Flughöhe größer ist, als bei minimaler Flughöhe. Diese Annahme ist theoretisch korrekt. Praktisch ist die Umsetzung allerdings nur schwer zu realisieren. Die Windkraft bei minimaler Höhe könnte noch so groß sein, dass die gespannte Feder nicht in der Lage ist, den Gleitstein in die Ausgangsposition zu bringen. Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Windkraft in maximaler Flughöhe evtl. nicht ausreicht, um die Feder zu spannen. Daher müsste die Feder für verschiedene Windstärken ausgetauscht werden. Es wird jedoch ein System gesucht, das für verschiedene Windstärken einsetzbar ist. Ein solches System wird in Abbildung 23 dargestellt.

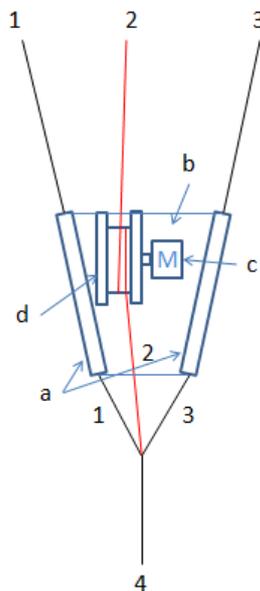


Abbildung 23: Faltsystem 2

Auf der Grundplatte (b) wird ein Servomotor (c) montiert. Dieser treibt eine Spule (d) an. Um diese Spule wird das Seil (2) gelegt. Die Seile (1) und (3) werden durch die Rohre (a) geführt und anschließend verknüpft. Erreicht der Drachen die maximale Flughöhe, wird der Motor eingeschaltet und verfährt das gesamte System in die

Richtung des Drachens. Die Seile (1) und (3) werden dadurch kürzer gefasst. Der Drachen klappt nach Faltpinzip (2) ein und sinkt. Erreicht der Drachen die minimale Flughöhe, verfährt der Servomotor das gesamte System wieder nach unten und der Drachen klappt aus. Dieses System wurde in der Praxis umgesetzt und getestet. Abbildung 24 zeigt den Mechanismus.



Abbildung 24: Praktische Umsetzung - Faltsystem 2

Während der Erprobung des Systems wurden einige Nachteile ersichtlich. Ein Problem ist die starke Reibung. Zum einen treten große Reibkräfte zwischen den Rohren und den Seilen (1) und (3) auf. Diese Reibkräfte muss der Servomotor überwinden. Zum anderen entsteht Reibung durch das Seil (2), das um die Spule gewickelt ist. Da das Seil um die Spule läuft, reibt es an einem Punkt gegenläufig an sich selbst. Die Belastung des Seiles ist sehr hoch und führt zu einer Beschädigung des Seiles. Im Betrieb kann diese Beschädigung zum Reißen des Seiles führen.

Ein weiteres Problem tritt bei der genauen Positionierung des Systems am Hauptseil (4) auf. Wird das System geschaltet, verfährt es auf dem Seil. Kommt es dabei jedoch zu Schlupf, ist die genaue Position des Systems nicht mehr gewährleistet. Der Drachen kann dann evtl. nicht mehr ein- oder ausklappen. Das Prinzip ist daher in dieser Form nicht umsetzbar.

Das Faltsystem drei ist in Abbildung 25 zu erkennen.

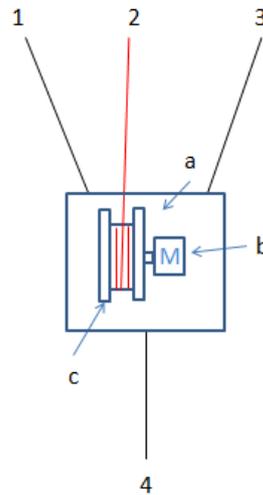


Abbildung 25: Faltsystem 3

Auf der Grundplatte (a) wird ein Servomotor (b) montiert. Dieser treibt eine Spule (c) an. An dieser Spule wird das Seil (2) befestigt. Die Seile (1) und (3), sowie das Hauptseil (4) werden an der Grundplatte befestigt. Erreicht der Drachen die maximale Flughöhe wird der Motor eingeschaltet und wickelt das Seil (2) auf. Seil (2) wird verkürzt und der Drachen klappt nach Falprinzip (1) ein und sinkt. Erreicht der Drachen die minimale Flughöhe wickelt der Servomotor das Seil (2) von der Spule ab und der Drachen klappt auf. Nun kann er wieder steigen.

Die praktische Umsetzung des Systems wird in Abbildung 26 gezeigt.



Abbildung 26: Praktische Umsetzung - Faltsystem 3

Um das System auf seine Leistungsfähigkeit zu testen, wurde ein Seil um die Spule gewickelt und der Mechanismus über ein zweites Seil am Boden fixiert. So kann die Anordnung während des Fluges simuliert werden. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 27 zu sehen.

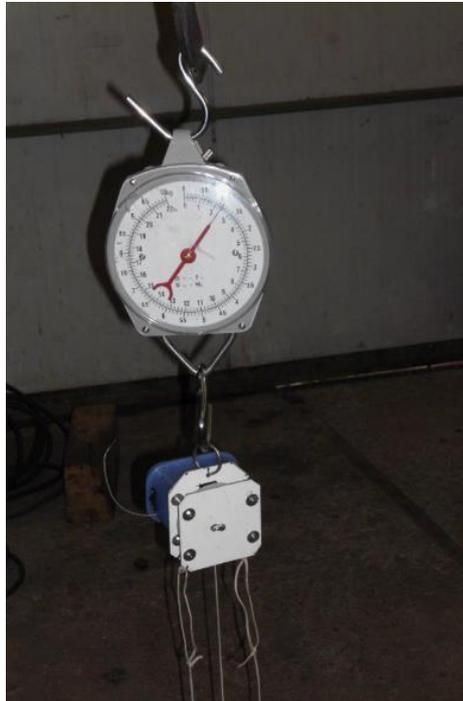


Abbildung 27: Kraftermittlung

Mithilfe einer Waage kann die Kraft ermittelt werden, mit der der Motor über die Spule das Seil aufwickelt. Bevor der Motor eingeschaltet wurde, wurde die Waage genullt, um das Gewicht des Systems nicht in die Kraftmessung mit einzubeziehen. Im Mechanismus wurde eine Spule mit einem Innendurchmesser von 60 Millimetern verbaut. Die Waage zeigt nach dem Einschalten des Motors ein Gewicht von einem Kilogramm an.

$$F = G * g$$

$$F = 1kg * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 9,81N$$

Damit ergibt sich eine Kraft beim Aufwickeln des Seiles von 9,81 Newton.

Während der weiteren Erprobung des Systems haben sich gute Flugeigenschaften des Drachens gezeigt. Es hat sich herausgestellt, dass sich das Eigengewicht des Faltsystems positiv auf die Flugeigenschaften des Drachens auswirkt. Durch das Gewicht wird der Drache beim Einholen stabilisiert und überschlägt sich nicht.

Ein Vorteil des Systems liegt in der Betriebssicherheit. Die Kraft des Servomotors wird für das Einklappen des Drachens verwendet, nicht für das Ausklappen. Ist der Drache eingeklappt, kann er sich nicht automatisch entfalten, da der Servomotor eine Sperrrichtung besitzt. Gibt die Fernsteuerung die Spule frei, wickelt sich das Seil durch die anliegenden Zugkräfte fast automatisch von der Spule ab. Schwierigkeiten beim Entfalten des Drachens treten daher in der Regel nicht auf. Die Gefahr des Abstürzens des Drachens, in Folge eines fehlgeschlagenen Entfaltens des Drachens, wird durch diese Form der Konstruktion minimiert und die Betriebssicherheit gesteigert.

7 Optimierung des gewählten Faltmechanismus

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, welche Kraft das System auf das Seil aufbringen kann. Diese Kraft kann weiter gesteigert werden, indem eine Spule mit einem geringeren Innendurchmesser verbaut wird. Da die Gesamtumdrehungszahl des Servomotors allerdings auf 7,5 Umdrehungen begrenzt ist und nicht erhöht werden kann, bedeutet ein kleinerer Innendurchmesser, dass weniger Seil auf der Spule aufgewickelt wird. Dies kann sich negativ auf die Flugeigenschaften des eingeklapperten Drachens auswirken. Es gilt abzuwiegen, welcher Innendurchmesser die größte Kraft entwickelt und noch unverändert gute Flugeigenschaften aufweist.

Dazu wurden mehrere Spulen (Abbildung 28) mit unterschiedlichen Durchmessern angefertigt und auf ihre Eigenschaften untersucht.



Abbildung 28: Verschiedene Spulendurchmesser

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, wurde zunächst eine Spule mit einem Innendurchmesser von 60 Millimetern verbaut, womit eine Kraft von 9,81 Newton erzeugt werden kann. Bei diesem Innendurchmesser können bei 7,5 Umdrehungen 188 Millimeter Seil aufgewickelt werden. Zunächst wurde der Innendurchmesser auf 50 Millimeter und anschließend sogar auf 45 Millimeter reduziert. Bei der Kraftmessung mit der 45-Millimeter-Spule, im gleichen Versuchsaufbau wie zuvor, ergibt sich eine Zugkraft von 19,62 Newton. Im Vergleich zur 60-Millimeter Spule bedeutet dies, dass die Kraft des Systems durch die Reduzierung des Innendurchmes-

sers auf 45 Millimeter um 100 Prozent gesteigert werden konnte. Mit der 45-Millimeter-Spule können allerdings nur noch 141 Millimeter Seil aufgewickelt werden. Bei der Erprobung im Betrieb hat sich jedoch gezeigt, dass die Flugeigenschaften des eingeklappten Drachens weiterhin positiv ausfallen.

Um die Energieverluste beim Steigen des Drachens zu minimieren, ist es wichtig, das Gewicht des Systems gering zu halten. Je schwerer das System ist, desto höher sind die Verluste, da die Gewichtskraft des Faltmechanismus der Steigkraft des Drachens entgegenwirkt. In Abbildung 29 ist das Gesamtgewicht des Systems zu erkennen.



Abbildung 29: Gewicht des Systems

Beim Bau des Systems wurde auf die Verwendung leichter Materialien geachtet. Daher wurden die Grundplatten aus Aluminium gefertigt. Dadurch ergibt sich ein Gesamtgewicht von 442 Gramm.

$$F_G = G * g$$

$$F_G = 0,442kg * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_G = 4,33N$$

Aus der Rechnung ergibt sich, dass der Faltmechanismus eine Gewichtskraft von 4,33 Newton aufweist.

Durch die Optimierung des Systems kann weiteres Gewicht eingespart werden. Dies ist in Abbildung 30 zu sehen.



Abbildung 30: Optimierung des Gewichts

In den Grundplatten wurden Bohrungen platziert, um das Gewicht des Systems weiterhin zu reduzieren. Durch die Aussparungen konnte das Gewicht um 67 Gramm auf 375 Gramm verringert werden.

Im System wurden handelsübliche AA-Batterien verwendet. Diese weisen ein Gewicht von 104 Gramm auf. Zum Antrieb des verbauten Elektromotors kann jedoch auch ein Modellflugakku mit einem Gewicht von 64 Gramm verwendet werden. Durch den Einsatz dieses Akkus könnte das Gewicht also um weitere 40 Gramm reduziert werden. Damit ergibt sich eine Gesamtersparnis von 107 Gramm.

$$F_G = 0,107kg * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$F_G = 1,05N$$

Umgerechnet in eine Kraft, bedeutet die Optimierung des Gewichts eine Ersparnis von etwa einem Newton beim Steigen des Drachens. Die optimierte Gewichtskraft des Faltmechanismus entspricht somit 3,28 Newton. Die Verluste des Systems durch das Gewicht des Faltmechanismus konnten demnach um etwa 25 Prozent reduziert werden.

8 Leistungsermittlung von Drachenkraftwerken

Nachdem der Faltmechanismus entwickelt und gebaut wurde, konnte eine Kraftmessung beim Flug des Drachens vorgenommen werden. Mit den aus der Messung ermittelten Werten, kann im folgenden Kapitel die Leistung des Drachenkraftwerkes berechnet werden.

Da sich die Wissenschaft erst seit wenigen Jahren mit der Energiegewinnung durch Flugdrachen beschäftigt, sind in diesem Bereich nur wenige Veröffentlichungen zu finden. Von Drachenherstellern sind ebenfalls keine verwertbaren Daten von Zugverhalten über bestimmte Windgeschwindigkeitsprofile der einzelnen Drachenformen zu bekommen.

Mit einigen Vereinfachungen lassen sich aber das Potenzial und das Leistungsvermögen solcher Drachen herleiten und können im Anschluss in der Praxis belegt werden. Im folgenden Kapitel wird die theoretische Herleitung der Drachenleistung, wie sie schon in der Ausarbeitung von Herrn Dr. Franetzki aus dem Jahre 2005 dargestellt wird und mit Grundsätzen aus der Strömungslehre, erläutert.

8.1 Theoretische Leistung von Drachensystemen

Da das hier beschriebene System aus einer Bodenstation besteht, die die vom Drachen geleistete Arbeit über ein Halteseil in elektrische Energie umwandelt, ist die Leistung am Seil von zentraler Bedeutung. Die mechanische Arbeit bzw. Leistung, die aus diesem System entnommen werden kann, setzt sich zusammen aus Seilkraft und Seilweg s bzw. Seilgeschwindigkeit und wird in Formel (3) [7] aus Kapitel 6 und Formel (5) [7] dargestellt:

$$\text{Energie:} \quad E = F_w * s \quad (5)$$

$$\text{Leistung:} \quad P = F_w * u \quad (3)$$

Wie diesen Formeln zu entnehmen ist, ist die Seilkraft F_w von zentraler Bedeutung. Diese setzt sich, wie bei allen Flugkörpern, aus einer Auftriebskomponente F_L und einer Anströmkomponente F_D zusammen (Abbildung 31: Seilkraftkomponenten1). Die Kräfte F_L und F_D lassen sich nach den Formeln (6) und (7) bestimmen [7]:

$$\text{Auftriebskraft:} \quad F_L = \frac{1}{2} * \delta * c_L * A * (w - u)^2 \quad (6)$$

Anströmkraft:
$$F_D = \frac{1}{2} * \delta * c_D * A * (w - u)^2 \quad (7)$$

Da diese Kräfte ein Kräfte Dreieck bilden, lässt sich F_w mit der bereits gelieferten Formel (4) [7] ermitteln:

Seilkraft:
$$F_w = \frac{1}{2} * \delta * c_w * A * (w - u)^2 \quad , \text{ mit } c_w = c_L + c_D \quad (4)$$

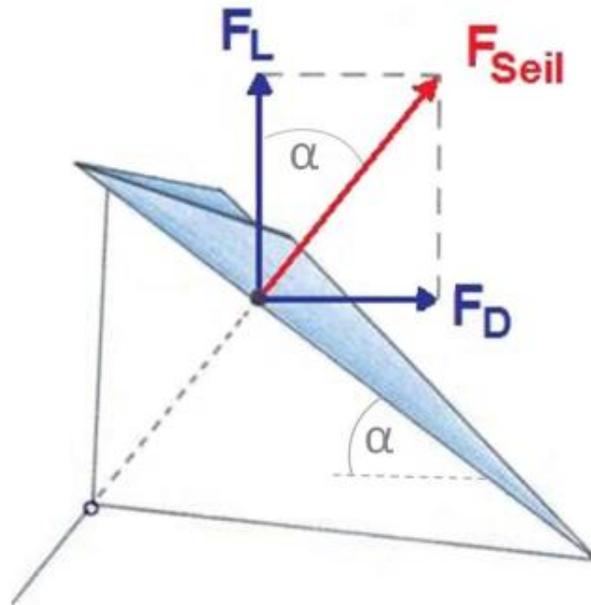


Abbildung 31: Seilkraftkomponenten²²

Mit Kombination der Formeln (3) und (4) kann nun die, der Bodenstation im Steigvorgang des Drachens zugeführte, mechanische Leistung nach Formel (8) [17] bestimmt werden:

Mech. Leistung am Seil:
$$P = \frac{1}{2} * \delta * c_w * A * (w - u)^2 * u \quad (8)$$

Um das bereits beschriebene Problem mit nicht vorhandenen Werten verwendeter Drachen zu umgehen, wird Einfachheit halber ein spezifischer Drachenbeiwert z , mit $z = \frac{1}{2} * \delta * c_w$, eingeführt [17]. Der Drachenbeiwert z kann in anschließenden Versuchen leicht ermittelt werden, wodurch sich mit Formel (9) [17] die Leistung während der Steigphase ermitteln lässt:

Leistung:
$$P_{(u)} = z * A * (w - u)^2 * u \quad (9)$$

²² Enthalten in: Hauer, K. (2013), S.26

Um die theoretische Maximalleistung eines Drachens pro Quadratmeter Drachenfläche zu ermitteln, wird Formel (9) differenziert, um das Extremum zu ermitteln [17]:

$$P_{(u)} = z * (w - u)^2 * u, \text{ mit } A = 1 \text{ m}^2$$

$$P_{(u)} = z * (w^2 - 2wu + u^2) * u$$

$$P_{(u)} = z * (w^2u - 2wu^2 + u^3)$$

Ableitung: $P'_{(u)} = w^2 - 4wu + 3u^2$ (10)

Extrema bei: $P'_{(u)} = 0$

$$\Rightarrow 0 = w^2 - 4wu + 3u^2$$

$$\Rightarrow u_1 = w$$

$$u_2 = \frac{1}{3}w$$

Nach logischer Betrachtung entfällt $u_1 = w$, da lokales Minimum, somit wäre die Leistung gleich Null. Dies wäre ebenfalls der Fall bei stillstehendem Drachen ($u = 0$).

Somit ist die theoretische Maximalleistung bei dem Verhältnis $\frac{u}{w} = \frac{1}{3}$ zu erwarten.

Dieses Verhältnis eingesetzt in Formel (9) ergibt die Maximalleistung in der Steigphase, Formel (11) [17]:

Maximalleistung: $P_{max} = z * A * \frac{4}{27} w^3$ (11)

Um das Maximum aus der Windleistung entnehmen zu können, muss allerdings gewährleistet sein, dass die Drachengeschwindigkeit u über der gesamten Steigphase $1/3$ der Windgeschwindigkeit w beträgt. Die Umsetzung dieser Anforderung scheint allerdings auf Basis eines Low-Tech- Kraftwerkes für Entwicklungs- und Schwellenländer schwer umsetzbar.

Leichter umsetzbar und mit weniger technischem Aufwand zu betreiben, scheint die Möglichkeit den Drachen mit konstanter Geschwindigkeit steigen zu lassen. Nachteil hierbei ist, dass alle Windgeschwindigkeiten unterhalb der angesetzten Drachengeschwindigkeit nicht energetisch genutzt werden können.

Ebenso scheint es möglich und leichter umsetzbar, den Drachen mit konstanter Seilkraft (= Windendrehmoment) steigen zu lassen. Um die benötigte Drachengeschwin-

digkeit bei konstanter Kraft F_w berechnen zu können, wird in Gleichung (4) z eingesetzt und nach Drachengeschwindigkeit u umgestellt. Dies ergibt:

$$\text{Drachengeschwindigkeit bei } F_w = \text{const.:} \quad u = w - \sqrt{\frac{F_w}{z * A}}$$

Dies würde aber ebenfalls bedeuten, dass alle Kräfte unterhalb, dieser angesetzten Seilkraft nicht nutzbar sind [17].

Tabelle 5 zeigt die theoretischen Leistungen, der oben beschriebenen Varianten, bezogen auf die jeweiligen Windgeschwindigkeiten.

Tabelle 5: Kräfte/ Leistungen idealer Drachen²³

Windstärke		Ruhender Drachen Windkraft pro m ²	Maximal entnehmbare Steigleistung pro m ²	Leistung bei konstanter Geschwind. u = 2m/s	Konstante Kraft Fw = 3 N u	Konstante Kraft Fw = 3 N Leistung	Konstante Kraft Fw = 30 N u	Konstante Kraft Fw = 30 N Leistung
Beaufort	m/s	N = kg m/s ²	W	W	m/s	W	m/s	W
0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	0,9	0,5	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0	2,5	3,6	1,3	0,2	0,2	0,6	0,0	0,0
3,0	4,4	11,6	7,6	6,9	2,2	6,5	0,0	0,0
4,0	7,2	31,1	33,2	32,4	5,0	14,9	0,1	3,9
5,0	10,0	60,0	88,9	76,8	7,8	23,3	2,9	87,9
6,0	12,5	93,0	171,5	131,0	10,2	30,6	5,4	161,4
7,0	15,5	144,2	331,0	218,7	13,3	39,8	8,4	252,8
8,0	19,0	216,6	609,7	346,8	16,8	50,3	11,9	357,8
9,0	22,7	307,8	1032,9	511,7	20,4	61,2	15,6	467,3
10,0	26,5	419,8	1644,8	717,4	24,2	72,6	19,4	581,2
11,0	31,0	576,6	2648,1	1009,2	28,8	86,3	23,9	717,7
12,0	35,0	735,0	3811,1	1306,8	32,8	98,3	27,9	837,6

Alle Werte dieser Tabelle beziehen sich auf die Annahme, dass der theoretische Drachen einen z- Wert von $0,6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ besitzt. Vereinfachter Weise wurde angenommen, dass ein kreisförmiger Drachen rechtwinklig angeströmt wird. In diesem Fall wäre der c_w -Wert = 1 und aus $z = \frac{1}{2} * \delta * c_w$, mit $\delta = 1,2 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ ergibt sich $z = 0,6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.

²³ Enthalten in: Franetzki, Dr. M. (2013)

Ebenso werden alle Werte auf die Drachenfläche von $A = 1 \text{ m}^2$ bezogen, da sich die Kräfte/Leistungen proportional zur Fläche verhalten [17].

Wie zu erkennen ist, wird bei einem Betrieb mit konstanter Drachengeschwindigkeit und konstanter Kraft ein Großteil der möglichen Leistung nicht ausgeschöpft. Dies hat zur Folge, dass es notwendig ist, die Steiggeschwindigkeit im Optimum von $u = 1/3w$ zu betreiben.

8.2 Reale Kräfte

Um die möglichen Leistungen des hier verwendeten Sled- Drachens berechnen zu können, muss der z-Wert des Sled-Drachens ermittelt werden. Da der Drache zwei unterschiedliche Flugformen während des Betriebes (Steig-, bzw. Sinkphase) einnehmen wird, besitzt dieser ebenfalls zwei unterschiedliche z-Werte.

Diese z-Werte lassen sich praktisch in einem Versuch ermitteln.

8.2.1 Versuchsaufbau: z-Wertermittlung

Da die Seilkraft eine Funktion der Windgeschwindigkeit, der Drachenfläche und des z-Wertes ist, kann umgekehrt auch so der z-Wert errechnet werden. Hierzu wird die Seilkraft bei bekannter Windgeschwindigkeit ermittelt. Um gleichzeitig mehrere Windgeschwindigkeiten im Versuch realisieren zu können, wird diese, wie in Abbildung 32, mittels eines Fahrzeuges simuliert und die Seilkraft mit einer Waage ermittelt. Somit entspricht die Fahrzeuggeschwindigkeit a der Windgeschwindigkeit w und das gemessene Gewicht an der Waage der Seilkraft in Kilopond.

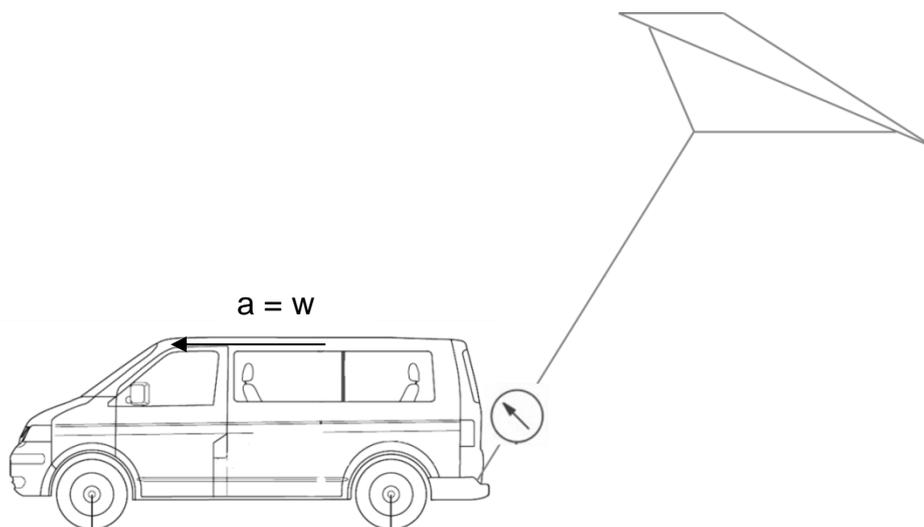


Abbildung 32: Versuchsaufbau z-Wert-Ermittlung

Da dieser Versuch nicht bei vollkommener Windstille durchgeführt werden kann und der natürliche Wind bei diesem Versuch als Störquelle fungiert, müssen pro simulierte Geschwindigkeit zwei Fahrten durchgeführt werden. Eine mit und eine gegen den Wind. Dieser Versuch wurde ebenfalls bei eingeklapptem Drachen durchgeführt, da sich hierbei ein anderer z-Wert einstellt. Bei diesem Versuch wurden folgende Werte ermittelt.

Tabelle 6: gemessene Seilkräfte

Powersled 24 mit elek. Klappvorrichtung							
Autogeschw a		Kraft geg. Wind	Kraft mit Wind	w	Kraft geg. Wind	Kraft mit Wind	w
ausgeklappt (steigend)				eingeklappt (fallend)			
km/h	m/s	kp	kp	m/s	kp	kp	m/s
10	2,77						
15	4,16						
20	5,55	2			0*		
25	6,94	3,6	1		0*	0*	
30	8,33	4,8	2		<0,1*	0*	
36	10,00						
40	11,11	8,6	3,5		0,4	<0,1*	
50	13,89				1	0,5	
		Zgemittelt=	0,02686		Zgemittelt=	0,004586877	
* mit vorhandener Kraftmesstechnik nicht ermittelbar							

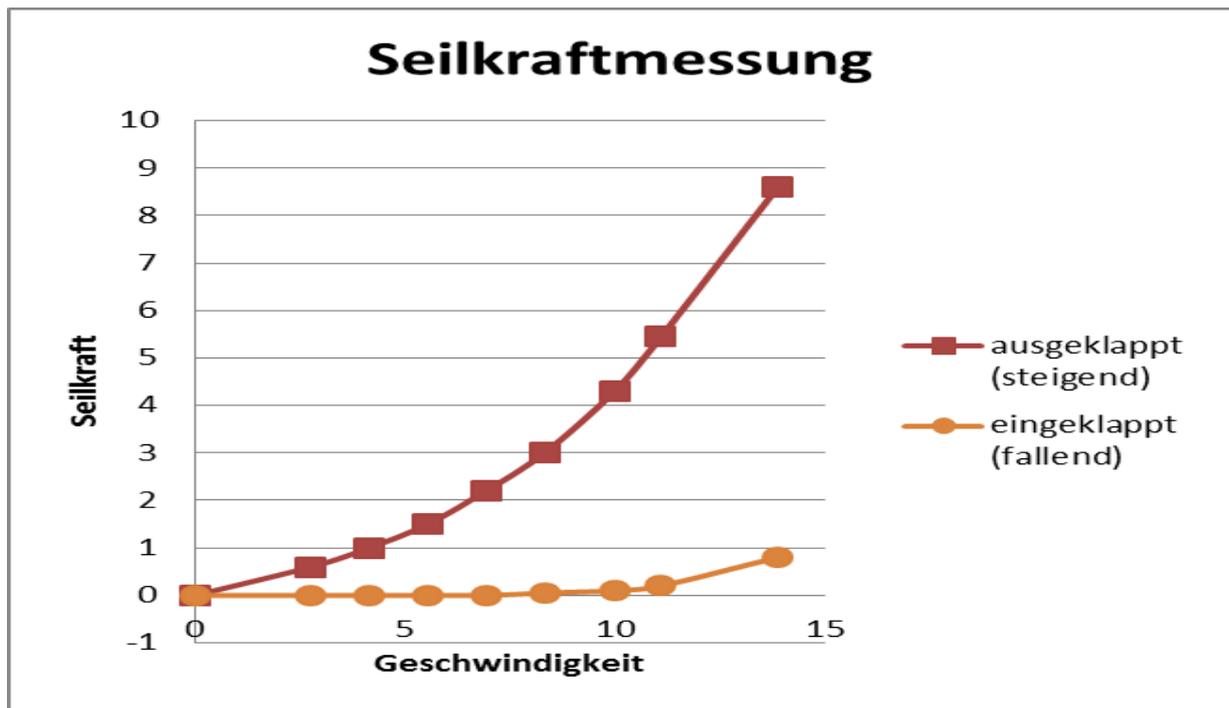


Abbildung 33: gemittelte Seilkräfte

Die gemessenen Seilkräfte aus Tabelle 6 sind in Abbildung 33 gemittelt dargestellt. An beiden Graphen ist der quadratische Verlauf zu erkennen, was vor allem bei hohen Windgeschwindigkeiten eine deutlich positive Leistungsdifferenz bzw. Nutzleistung erwarten lässt. Die z-Werte konnten nach folgender Formel (12) ermittelt werden:

z-Wert:
$$z = \frac{F_w}{A \cdot w^2} \tag{12}$$

z-Wert des ausgeklappten Sled's mit 1,81m² Fläche: $z = 0,02686 \frac{\text{kp} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \approx 0,2686 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

z-Wert des eingeklappten Sled's mit 0,34 m² Fläche: $z = 0,004589 \frac{\text{kp} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} \approx 0,04589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

Wenn diese Werte mit dem oben angenommenen z-Wert von $0,6 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ verglichen werden, weichen die realen Werte sehr stark von den angenommenen Werten ab. Dies liegt einerseits an der sehr stark vereinfachten Annahme, es handele sich bei dem Drachen um eine horizontal angeströmte kreisförmige Platte und andererseits wurden die theoretischen Leistungen alle auf einem Quadratmeter Drachenfläche bezogen. Dagegen wird bei dem Versuch ein realer Drachen verwendet. Die nachstehende Tabelle 7 zeigt die Steigleistungen bei realen z- Werten.

Tabelle 7: reale Steigleistungen

Windstärke		Ruhender Drachen Windkraft pro 1,81m ² Drachenfläche	Maximal entnehmbare Steigleistung pro m ²	Leistung bei konstanter Geschwind. u = 2m/s	Konstante Kraft Fw = 0,3 N u	Konstante Kraft Fw = 0,3 N Leistung	Konstante Kraft Fw = 3 N u	Konstante Kraft Fw = 3 N Leistung
Beaufort	m/s	N = kg m/s ²	W	W	m/s	W	m/s	W
0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,0	0,9	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,0	2,5	2,9	1,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
3,0	4,4	9,4	6,1	3,1	1,9	3,2	0,0	0,0
4,0	7,2	25,2	26,9	14,5	4,7	7,8	0,0	0,0
5,0	10,0	48,6	72,0	34,4	7,5	12,5	2,1	35,5
6,0	12,5	75,4	139,0	58,7	10,0	16,5	4,6	76,2
7,0	15,5	116,8	268,2	97,9	13,0	21,6	7,6	126,7
8,0	19,0	175,5	494,0	155,3	16,5	27,4	11,1	184,7
9,0	22,7	249,4	836,9	229,1	20,2	33,4	14,8	245,2
10,0	26,5	340,1	1332,8	321,1	24,0	39,7	18,6	308,2
11,0	31,0	467,2	2145,7	451,8	28,5	47,3	23,1	383,6
12,0	35,0	595,6	3088,1	585,0	32,5	53,9	27,1	449,9

Allerdings zeigen die ermittelten z-Werte auch, dass aus der Differenz der beiden z-Werte eine theoretische maximale Nutzleistung zu errechnen wäre, mit der Annahme, dass der Drachen mit gleicher Geschwindigkeit aus- und einfahre. Diese Annahme ist aber nicht realistisch, denn wenn Steig- und Sinkgeschwindigkeit gleich wären, könnte der Drachen nie eingeholt werden. Daher ist eine Erhebung der optimalen Einholgeschwindigkeit, die Folge dessen größer sein muss als die Steiggeschwindigkeit, unerlässlich.

8.2.2 Optimale Einholgeschwindigkeit

Wie bereits erwähnt, ermittelt sich die abgreifbare mechanische Nutzleistung pro Zyklus, also pro einmaligem Steigen und Zurückholen des Drachens, aus der Differenz der in der Steigphase produzierten Leistung und der benötigten Einholleistung. Um diesen Vorgang möglichst effizient zu gestalten, muss die optimale Einholgeschwindigkeit ermittelt werden. Diese muss folglich größer als die Steiggeschwindigkeit sein, um möglichst schnell wieder die Steigphase einleiten zu können. Ebenfalls ist zu erwarten, dass es eine maximale Einholgeschwindigkeit gibt, ab der es unwirtschaftlich ist den Drachen einzuholen, da proportional zur Windgeschwindigkeit in

der 3. Potenz (w^3) zu viel Leistung zum Einholen benötigt wird [17]. Formel (13) [17] zeigt den Ansatz der Nutzleistungsberechnung.

Ansatz:
$$P_{ges} = P_1 - P_2 = \frac{E_1 - E_2}{t_1 + t_2} \quad (13)$$

mit
$$E_1 = \frac{4}{9} * z_1 * A_1 * (w)^2 * s \quad ; \quad t_1 = \frac{s}{u_1} = \frac{3s}{w}, \quad u_1 = \frac{1}{3}w$$

und
$$E_2 = z_2 * A_2 * (w + u_2)^2 * s \quad ; \quad t_2 = \frac{s}{u_2}$$

wird:

$$P_{ges} = \frac{\frac{4}{9} * z_1 * A_1 * (w)^2 - z_2 * A_2 * (w + u_2)^2}{\frac{3}{w} + \frac{1}{u_2}}$$

Nun wird ein Einholverhältnis eingeführt, welches das Verhältnis von Steig- und Einholgeschwindigkeit beschreibt: $u_2 = \gamma * u_1 = \frac{\gamma}{3}w$

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

Vereinfacht wird daraus:

$$P_{ges} = \frac{\frac{4}{9} * z_1 * A_1 - z_2 * A_2 * (1 + \frac{\gamma}{3})^2}{1 + \frac{1}{\gamma}} * \frac{1}{3} w^3 \quad (14)$$

Um das maximale Einholverhältnis ermitteln zu können wird die Formel (14) nach γ abgeleitet und man erhält:

$$P'_{ges} = \frac{\frac{\frac{4}{9} * z_1 * A_1 - z_2 * A_2 * (1 + \frac{\gamma}{3})^2}{\gamma^2} - \frac{2 * z_2 * A_2 * (1 + \frac{1}{\gamma})(\frac{\gamma}{3} + 1)}{3}}{(\frac{1}{\gamma} + 1)^2} * \frac{1}{3} w^3 \quad (15)$$

Mit Formel (15) werden nun die Extrema errechnet:

$$P'_{ges} = 0$$

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

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

mit: $z_1 = 0,2686 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$

$$z_2 = 0,04589 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$A_1 = 1,81 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0,34 \text{ m}^2$$

wird:

$$0 = 3,433 * 10^{-4} * \gamma^4 + 1,559 * 10^{-3} * \gamma^3 + 2,078 * 10^{-3} * \gamma^2 - 0,02 * \gamma$$

Lösungen: $\gamma_1 = -3,5 + 3,34j \rightarrow$ nicht möglich; imaginär

$\gamma_2 = -3,5 - 3,34j \rightarrow$ nicht möglich; imaginär

$\gamma_3 = 0 \rightarrow$ nicht realistisch

$\gamma_4 = 2,48 \rightarrow$ optimales Einholverhältnis

Die Lösung zeigt, dass die optimale Einholgeschwindigkeit bei dem im Versuch verwendeten Drachen bei dem ungefähr 2,5-fachen der Steiggeschwindigkeit liegt. Um diese Lösung zu überprüfen, zeigt Tabelle 8 die Werte der numerischen Ermittlung.

Tabelle 8: numerische Kontrolle der Einholverhältnisse

Windstärke		Ruhender Drachen Windkraft pro m ² Drachenfläche	Drachenges chwindigkeit u	Maximal entnehmbare Steigleistung pro m ²	Leistung pro Intervall bei festem Verhältnis Sink- zu Steiggeschwindigkeit in Watt					
Beaufort	m/s	kp		W	u ₂ =u ₁	u ₂ =0,5u ₁	u ₂ =2u ₁	u ₂ =2,4u ₁	u ₂ =2,5u ₁	u ₂ =2,6u ₁
0,0	0,1	0,0	0,033	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,0	0,9	0,0	0,300	0,1	0,023	0,016	0,028	0,028	0,028	0,028
2,0	2,5	0,4	0,817	1,1	0,462	0,318	0,565	0,573	0,573	0,573
3,0	4,4	1,2	1,467	6,1	2,674	1,844	3,270	3,318	3,319	3,317
4,0	7,2	3,2	2,400	26,9	11,717	8,081	14,329	14,539	14,544	14,533
5,0	10,0	6,1	3,333	72,0	31,391	21,650	38,390	38,952	38,966	38,936
6,0	12,5	9,5	4,150	139,0	60,579	41,779	74,083	75,168	75,195	75,137
7,0	15,5	14,7	5,167	268,2	116,898	80,620	142,958	145,051	145,103	144,991
8,0	19,0	22,1	6,333	494,0	215,314	148,495	263,314	267,169	267,265	267,059
9,0	22,7	31,4	7,550	836,9	364,767	251,568	446,085	452,617	452,779	452,429
10,0	26,5	42,8	8,817	1332,8	580,882	400,615	710,379	720,780	721,039	720,482
11,0	31,0	58,8	10,333	2145,7	935,182	644,964	1.143,664	1.160,408	1.160,825	1.159,929
12,0	35,0	74,9	11,667	3088,1	1.345,907	928,228	1.645,953	1.670,052	1.670,652	1.669,361

Die numerische Kontrolle zeigt ebenfalls, dass sich die optimale Einholgeschwindigkeit bei dem 2,5-fachen der Steiggeschwindigkeit befindet.

Dies lässt sich praktisch mittels einer Übersetzung zwischen Winde und Rückholeinheit oder einer elektrischen Ansteuerung der Rückholeinheit umsetzen.

Die Tabelle 8 zeigt aber auch, dass mit diesem Sled deutlich zu wenig mechanische Leistung erzeugt wird. Da die Leistung des Drachensystems allerdings proportional zur Drachenfläche und zum z- Wert ist, ist die Leistung noch steigerbar. Drachen mit Flächen bis zu 15m³ (Nutzfläche allerdings geringer) sind im Handel erhältlich. Des Weiteren gilt es die ermittelten z-Werte in weiteren Versuchsreihen, eventuell mit anderer Messeinrichtung nochmals zu bestätigen und/ oder andere Drachenformen hinsichtlich ihrer z-Werte zu untersuchen. Ein weiterer Einflussfaktor, der die Nutzleistung eines Drachenkraftwerkes beeinträchtigt, ist der Leistungsbedarf beim Einholen des Drachens. Ein Faltsystem am Drachen, welches die Fläche und/oder den z-Wert noch weiter minimiert, hätte eine geringere Einholleistung zur Folge, welches die Nutzleistung erhöht.

8.1 Drachendimensionierung

In diesem Kapitel soll auf den Grundlagen vorheriger Kapitel aufgezeigt werden, welches theoretische Potenzial in Drachensystemen steckt. Wie aus dem vorherigen Kapitel hervorgeht, müsste die Nutzleistung bei niedrigeren Windstärken deutlich höher sein, um ein Drachenkraftwerk für Schwellenländer zu betreiben. Ebenfalls wurde schon erwähnt, dass die Nutzleistung, abgesehen von der Windstärke, abhängig ist von:

- Drachenfläche
- Drachentyp (z-Wert)
- Drachenfläche während Einholphase
- z-Wert während der Einholphase

Die nachstehenden Tabellen 9 und 10 zeigen die angesprochenen Potenziale von Sled- Drachen.

Tabelle 9: Leistungen in Abhängigkeit der Drachenfläche

	Maximal entnehmbare Steigleistung pro 1,81 m ²	Leistung pro Intervall A = 1,8m ²	Maximal entnehmbare Steigleistung pro 7,5m ²	Leistung pro Intervall A = 7,5m ²	Maximal entnehmbare Steigleistung pro 12,5m ²	Leistung pro Intervall A = 12,5m
A1	1,81		7,5		12,5	
z1	0,2686		0,2686		0,2686	
A2	0,34		0,4		0,5	
z2	0,04589		0,04589		0,04589	
m/s	W	W	W	W	W	W
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,9	0,1	0,0	0,2	0,1	0,4	0,2
2,5	1,1	0,6	4,4	2,9	7,3	5,0
4,4	6,1	3,3	25,4	16,9	42,4	28,7
7,2	26,9	14,5	111,4	74,1	185,7	125,8
10,0	72,0	39,0	298,4	198,5	497,4	336,9
12,5	139,0	75,2	575,9	383,0	959,9	650,2
15,5	268,2	145,1	1.111,4	739,2	1.852,3	1.254,7
19,0	494,0	267,3	2.047,0	1.361,5	3.411,7	2.311,1
22,7	836,9	452,8	3.467,9	2.306,5	5.779,9	3.915,2
26,5	1332,8	721,0	5.522,6	3.673,0	9.204,3	6.234,9
31,0	2145,7	1.160,8	8.891,0	5.913,3	14.818,3	10.037,7
35,0	3088,1	1.670,7	12.795,8	8.510,3	21.326,3	14.446,2

In Tabelle 7 werden handelsübliche Sled- Drachen von 9m² (schätzungsweise 7,5m² Nutzfläche) und 15m² (12,5m²) mit dem hier verwendeten Drachen verglichen. Angenommen wird ebenfalls, dass die Drachenbeiwerte gleich bleiben und sich nur A₂ von Drachentyp zu Drachentyp ändert. Tabelle 10 zeigt ein ähnliches Vorgehen. Hier wurden die z-Werte in realistischer Größe geändert, um abschätzen zu können welche Veränderung der Leistung sich hierbei einstellt.

Tabelle 10: Leistungen in Abhängigkeit der z-Werte

	Maximal entnehmbare Steigleistung	Leistung pro Intervall	Maximal entnehmbare Steigleistung	Leistung pro Intervall	Maximal entnehmbare Steigleistung	Leistung pro Intervall
A1	1,81		1,81		1,81	
z1	0,2686		0,35		0,4	
A2	0,34		0,34		0,34	
z2	0,04589		0,04		0,035	
m/s	W	W	W	W	W	W
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,9	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
2,5	1,1	0,6	1,4	0,8	1,6	1,0
4,4	6,1	3,3	8,0	4,8	9,1	5,7
7,2	26,9	14,5	35,0	21,0	40,0	25,0
10,0	72,0	39,0	93,9	56,2	107,3	67,1
12,5	139,0	75,2	181,1	108,4	207,0	129,5
15,5	268,2	145,1	349,5	209,1	399,4	249,8
19,0	494,0	267,3	643,7	385,2	735,7	460,2
22,7	836,9	452,8	1.090,6	652,5	1.246,3	779,6
26,5	1332,8	721,0	1.736,7	1.039,1	1.984,8	1.241,5
31,0	2145,7	1.160,8	2.795,9	1.672,9	3.195,4	1.998,7
35,0	3088,1	1.670,7	4.023,9	2.407,6	4.598,7	2.876,5

Die Tabellen zeigen, dass in handelsüblichen Drachen in ihren Windgeschwindigkeitsbereichen von 2,5- 15,5 m/s durchaus Potenzial steckt, allerdings könnten größere, hinsichtlich dieses Konzepts optimierte Drachen dieses Potenzial noch steigern.

9 Ermittlung der Seillänge

Teil der Bodenstation des Drachenkraftwerkes muss ein System sein, welches die Seillänge und gegebenenfalls die Seilgeschwindigkeit erfassen kann. Benötigt wird dies um per Fernsteuerung dem Drachen in den entsprechenden Flughöhen das Signal zum Ein- und Ausklappen weiterzuleiten.

9.1 Mechanische Variante über Taster auf der Seilrolle

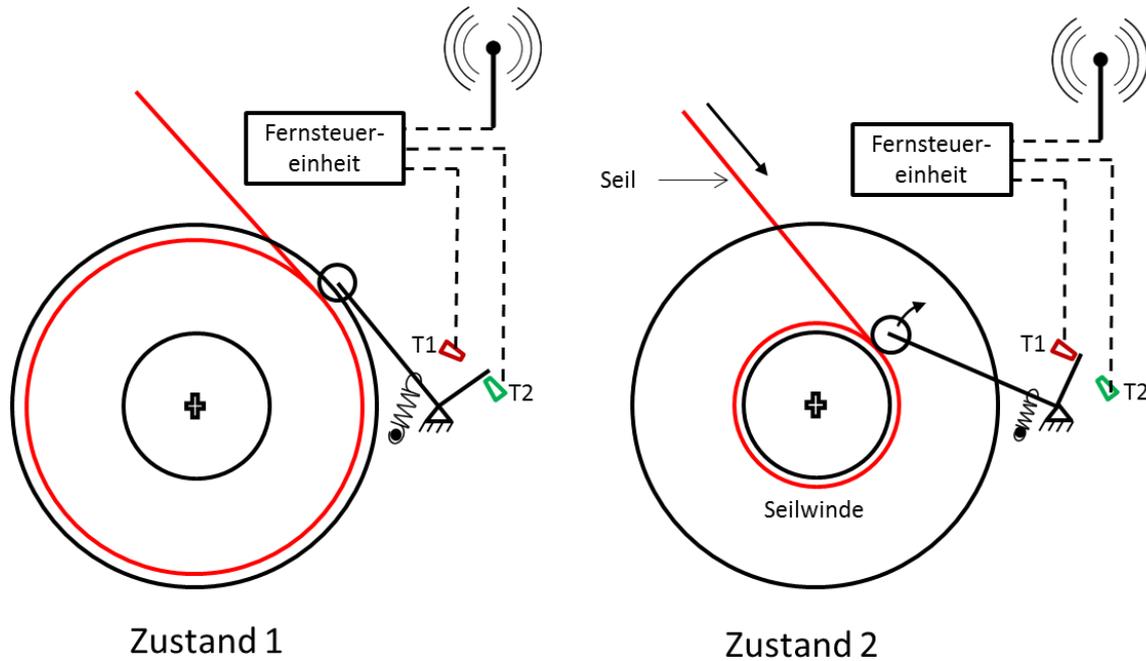


Abbildung 34: Prinzipskizze Variante 1

Abbildung 34 zeigt die Prinzipskizze dieser Variante. Das System besteht aus einem Rollentaster, der auf dem Seil in der Winde angebracht ist. Dieser Taster befindet sich an einem Kipphebel der gelenkig an einem Fixpunkt befestigt ist. Am Kipphebel ist rechtwinklig ein Betätigungshebel angebracht, der in der entsprechenden Schaltposition das Schaltsignal auf jeweils einen der beiden Endschaltkontakte (T1 oder T2) leitet. Über dieses Endschaltsignal wird mittels der Fernsteuereinheit der Drachen angesteuert. Um einen sicheren Lauf der Tastrolle zu gewährleisten, ist der Kipphebel über eine Zugfeder vorgespannt. Es ist sinnvoll entweder die Position der Endschaltkontakte oder den Winkel zwischen Kipphebel und Betätigungshebel variieren zu können, um sowohl max. Steighöhe als auch den tiefsten Punkt des Dauerbetriebes festlegen zu können. Die Abbildung zeigt die beiden wichtigen Schaltstellungen.

Betriebsablauf:

Start:

1. Drachen in niedrigster Position,
T2 aktiv,
Drachen ausgeklappt, Rückholeinrichtung aus, Erregung des Generators an.
2. Steigphase beginnt,
T2 nicht aktiv,
Zustand Drachen, Rückholeinrichtung und Generator bleibt bestehen (Selbsthaltung).
3. Drachen in höchster Position,
T1 wird betätigt,
Drachen wird eingeklappt und Generatorerregung ist aus,
nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert ($t = \text{Dracheneinklappzeit}$).
4. Drachen wieder in niedrigster Position = ein Intervalldurchlauf,
5. weiter bei Punkt 1.

Stop über dritten Handtaster (nicht dargestellt):

1. Generatorerregung aus und Drachen wird eingeklappt,
2. nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert ($t = \text{Dracheneinklappzeit}$) bis T2 aktiv.

9.2 Mechanische Variante mittels Markierung am Seil

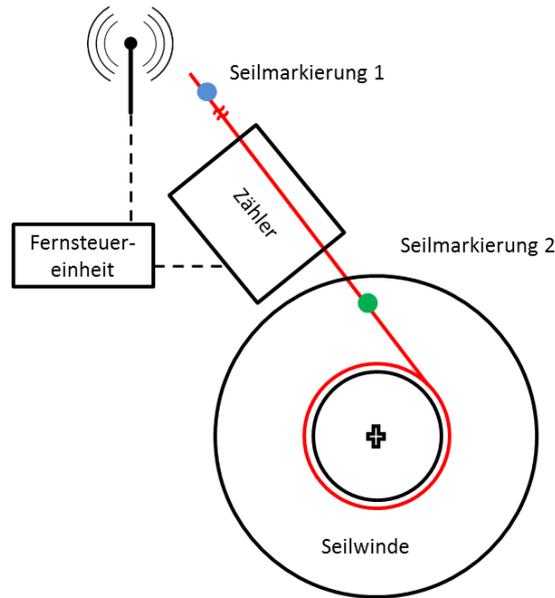


Abbildung 35: Prinzipskizze Variante 2

Variante 2 der Seillängenermittlung (in Abbildung 35 dargestellt) besteht aus mindestens zwei kugelförmigen Markierungen (Blau und Grün dargestellt) am Seil. Diese Markierungen könnten geklebt werden oder aus zwei auf das Seil geklemmten Halbschalen bestehen. Hauptaugenmerk liegt bei diesem System auf der Zählrichtung, die die Markierungen zählt und ein verwertbares Signal ermittelt.

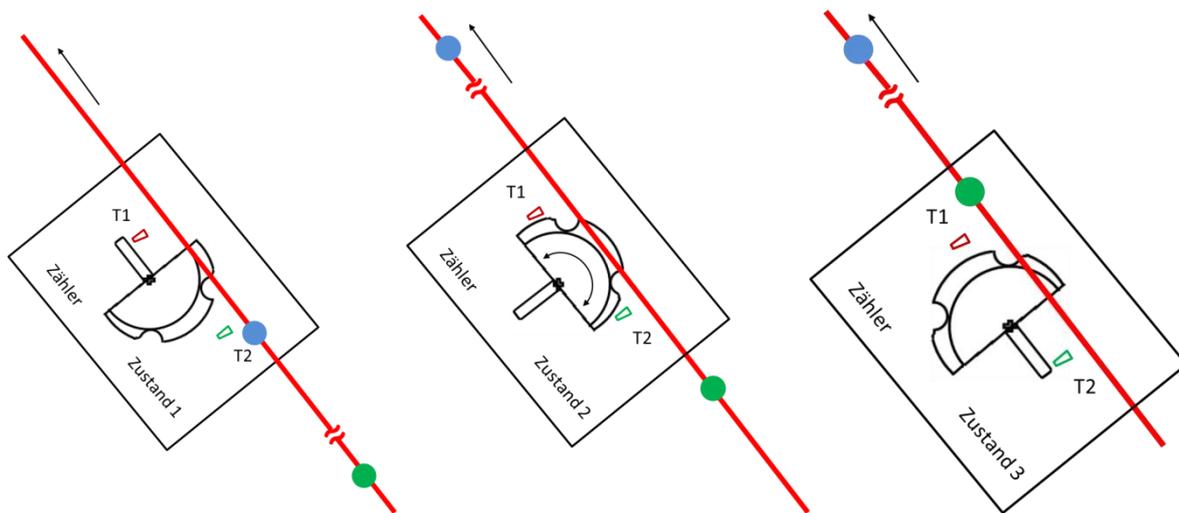


Abbildung 36: Die drei Zählerzustände in Steigphase

Abbildung 36 zeigt dabei die drei Zählerstellungen während der Steigphase. Die Seillänge zwischen der ersten Seilmarkierung (Blau dargestellt) und dem Drachen entspricht der unteren Flughöhe im Betrieb. Diese Kugel leitet die Steigphase ein, indem

sie das Signal von Endtaster 1 (Öffner) nimmt. Dies geschieht über einen drehbaren Mitnehmer, den die Kugel beim Vorbeigleiten eine Stellung weiterdreht (Zustand 2). Gleichzeitig positioniert die erste Markierung den Mitnehmer so, dass die zweite Kugel den Mitnehmer in Endposition drehen kann und der Taster 2 betätigt wird. Die Entfernung zwischen der zweiten Kugel (Grün dargestellt) und dem Drachen entspricht der max. Steighöhe. Sie leitet die Rückholphase ein. Die Signalfolge läuft nun rückwärts ab. Ebenfalls wie bei Variante 1 leiten die beiden Taster die Signale an die Fernsteuereinheit weiter.

Betriebsablauf:

Start:

1. Drachen in niedrigster Position,
T1 aktiv,
Drachen ausgeklappt, Rückholeinrichtung aus, Erregung des Generators an.
2. Steigphase beginnt,
T1 nicht aktiv,
Zustand Drachen, Rückholeinrichtung und Generator bleibt bestehen (Selbsthaltung).
3. Drachen durchläuft untere Flughöhe,
Markierung 1 (Blau) dreht Mitnehmer in Zustand 2,
Zustand Drachen, Rückholeinrichtung und Generator bleibt bestehen.
4. Drachen erreicht max. Flughöhe,
Markierung 2 (Grün) dreht Mitnehmer in Zustand 3,
T2 wird betätigt,
Drachen wird eingeklappt und Generatorerregung ausgeschaltet,
nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert ($t = \text{Dracheneinklappzeit}$).
5. Drachen sinkt, Seil wird eingeholt,
Markierung 2 (Grün) dreht Mitnehmer in Zustand 2.
6. Drachen durchläuft niedrigste Flughöhe = ein Intervalldurchlauf,
Markierung 1 (Blau) dreht Mitnehmer in Zustand 1,
T1 wird betätigt,
Drachen klappt auf, Rückholeinrichtung aus, Erregung des Generators an.
7. Beginnend bei Punkt 1.

Stop über dritten Handtaster (nicht dargestellt):

1. Generatorerregung aus und Drachen wird eingeklappt,
2. nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert ($t = \text{Dracheneinklappzeit}$) bis T1 aktiv.

9.3 Mechanische Variante mit Gewindespindel

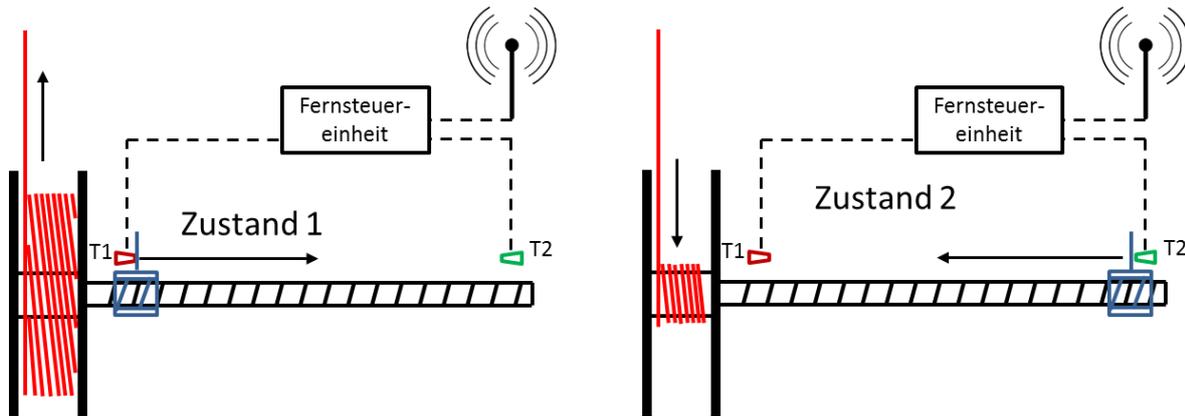


Abbildung 37: Prinzipskizze Variante 3

Wie Abbildung 37 erkennen lässt, zeichnet sich die dritte Variante durch einen sehr einfachen, mechanischen Aufbau aus. Das System besteht aus einer Gewindespindel, die direkt formschlüssig mit der Windenwelle verbunden ist. Bei Bedarf ist auch eine Übersetzung zwischen Windenwelle und Gewindespindel, die die Drehzahl der Spindel verringert, möglich. Mit der Gewindespindel ist ein Gleitstein mit Innengewinde gekoppelt, welcher nicht drehbar in einer Führungsschiene, parallel an der Spindel entlangläuft und die beiden justierbaren Endkontakte (T1 und T2) betätigt. Wie bei Variante 1 sind auch hier die Endkontakte verstellbar, um die jeweiligen Flughöhen einstellen zu können.

Start:

1. Drachen in niedrigster Position,
T1 aktiv,
Drachen ausgeklappt, Rückholeinrichtung aus, Erregung des Generators an.
2. Steigphase beginnt,
T1 nicht aktiv,
Zustand Drachen, Rückholeinrichtung und Generator bleibt bestehen (Selbsterhaltung).
3. Drachen in höchster Position,

T2 wird betätigt,

Drachen wird eingeklappt und Generatorerregung ist aus,

nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert (t = Dracheneinklappzeit).

4. Drachen wieder in niedrigster Position = ein Intervalldurchlauf,

5. wieder beginnend bei Punkt 1.

Stop über dritten Handtaster (nicht dargestellt):

3. Generatorerregung aus und Drachen wird eingeklappt,

4. nach Zeit t wird Rückholeinrichtung aktiviert (t = Dracheneinklappzeit) bis T1 aktiv.

9.4 Elektronische Variante mittels SPS

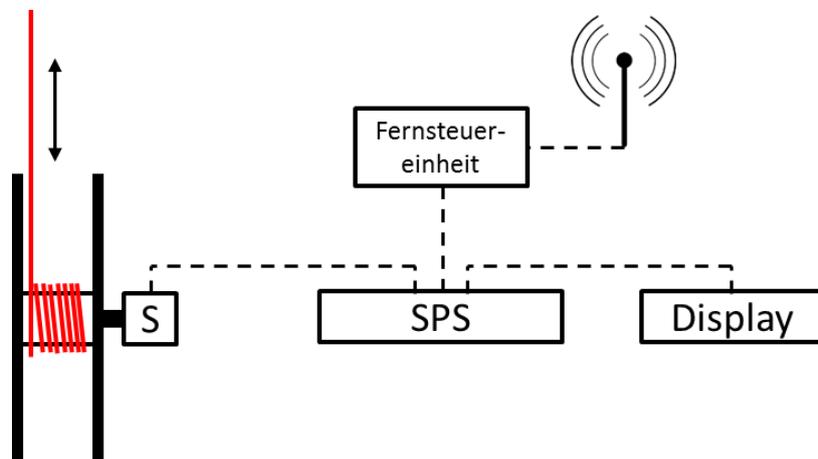


Abbildung 38: Prinzipskizze Variante 4

Dieser Lösungsweg, wie in Abbildung 38 zu erkennen, benötigt nahezu gar keine mechanischen Elemente. Dafür allerdings ein großes Knowhow in der Mechatronik und SPS- Programmierung. Das System besteht aus einem digitalen Drehsensor S, der formschlüssig an der Seilwinde befestigt ist. Dieser ist in der Lage die Umdrehungen der Winde zu zählen und diese Information, in Form von elektrischen Impulsen, an eine SPS (Speicherprogrammierbare Steuerung, wie z.B. Siemens LOGO) weiterzuleiten. Mit einem selbst entwickelten Programm, auf welches die SPS zugreifen kann, ermittelt das System aus dem Impulssignal die Anzahl der Umdrehungen. In erster Näherung entspricht jede Umdrehung einer Seillänge $s = \pi * d_{Winde}$. Genauer wird diese Ermittlung, wenn beachtet wird, dass sich der Windendurchmesser nach x Umdrehungen vergrößert.

Mit $x = \frac{\text{Windbreite } b}{\text{Seildurchmesser } d_{\text{Seil}}}$ lässt sich die Anzahl der Umdrehungen bis zur nächsten Durchmesserergrößerung berechnen. Danach berechnet sich s mit:

$$s = \pi * d_{\text{Winde}} \quad ; \text{ für } \frac{d_{\text{Seil}}}{b} < 1$$

$$s = \pi * (d_{\text{Winde}} + 2 * d_{\text{Seil}}) \quad ; \text{ für } 1 < \frac{d_{\text{Seil}}}{b} < 2, \text{ usw.}$$

Ebenfalls kann im SPS-Programm festgehalten werden, ab welcher Umdrehung/Seillänge der Drachen ein Signal zum ein- oder ausklappen bekommt und die Rückholssysteme und der Generator an- und ausgeschaltet werden.

Das System könnte als Einziges nicht nur Seillänge, sondern auch Drachengeschwindigkeit berechnen. Dies wäre in diesem Fall die veränderte Seillänge pro Zeiteinheit. Des Weiteren ist dieses System in der Lage, solange es im Programm festgelegt wurde, den Drachen bei einer Windflaute automatisch zur Bodenstation zurückzuholen und ihn, falls Winddaten vorliegen, automatisch bei genügend Wind zu starten.

Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit alle Daten (auch Batteriezustände, erzeugte Leistungen, etc.) zu berechnen, zu speichern und in einem Display anzeigen zu können.

9.5 Nutzwertanalyse der Systeme

In der folgenden Nutzwertanalyse (Tabelle 11) werden die Eigenschaften der Varianten 1 – 4 subjektiv bewertet und gegenüber gestellt. Zuerst wurden die Eigenschaften, die das System erfüllen sollte, in eine sinnvolle Rangfolge gebracht und mit Noten 1 – 6 bewertet, wobei 6 für „sehr wichtig“ und 1 für „nicht notwendig“ steht. Im zweiten Schritt kann jede Variante nach Erfüllung jeder Eigenschaft bemessen werden (10 Punkte für „sehr gut“, bzw. „voll erfüllt“ bis zu 0 Punkte „ungenügend“, bzw. „nicht erfüllt“). Im Anschluss wird die Bewertung gebildet, indem die Rangfolge mit der Erfüllung multipliziert wird. Aufaddiert erhält jede Variante ihre Gesamtpunktzahl und kann verglichen werden.

Tabelle 11: Nutzwertanalyse

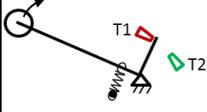
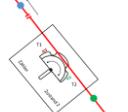
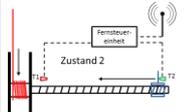
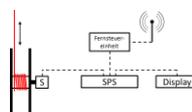
Variante		1	2	3	4
Bezeichnung		mit Rollentaster	mit Markierung am Seil	mit Gewindespindel	SPS-Lösung
Skizze					
Eigenschaften:	Gewichtung:	Bewertung			
Einfachheit	5	10	8	8	0
Kosten	6	10	10	8	0
Ermittlung Höhe	6	8	8	8	10
Ermittlung Geschwindigkeit	4	0	0	0	10
Automatische Abschaltung bei Windflaute	4	0	0	0	10
Betriebssicherheit	4	6	6	6	8
Erweiterbarkeit	1	0	0	0	10
	Ergebnis	182	172	160	182
Legende:	Gewichtung	Bedeutung		Bewertung	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

Tabelle 11 zeigt, dass für die Umsetzung eines solchen Systems nur Variante 1 und Variante 4 in Frage kommen, weil sie entweder einfach und günstig sind oder eine hohe Betriebssicherheit garantieren. Hierbei ist anzumerken, dass diese subjektive Bewertung nicht mit der Annahme gemacht wurde, ein solches Kraftwerk in Industrienationen errichten zu wollen. In Industrienationen ließe sich nur die sichere und zugleich aufwendige Variante 4 etablieren, da diese den Stand der Technik erfüllt. Die Tatsache, dass Variante 4 technisch sehr aufwendig ist und Elemente benötigt, die nicht ohne weiteres in Schwellenländern zu beschaffen sind, macht dieses gute Ergebnis von Seiten der Technik zunichte. Es bleibt abzuwägen, ob die Vorteile diesen Aufwand rechtfertigen.

10 Auswahl des Generators und des Rückholsystems

Zur Stromerzeugung während der Steigphase wird ein Generator benötigt. Das Rückholssystem, um den Drachen wieder zur Bodenstation oder zum niedrigsten Betriebspunkt zurückholen zu können, kann mehrere Formen annehmen. Folgende Kombinationen dieser beiden Systeme sind denkbar.

- Kompaktgenerator und Gleichstrommotor
- Startergenerator
- Kompaktgenerator und Schwungscheibe
- Kompaktgenerator und Schwungscheibe, (Hilfs-)Gleichstrommotor
- Startergenerator und Schwungscheibe

10.1 Die Generatoren

Um das anliegende Moment an der Seilwinde in elektrischen Strom wandeln zu können, benötigt ein Drachenkraftwerk einen Generator. Um die anliegende mechanische Leistung von 30 W- 1500W optimal wandeln zu können, kommen für ein Kraftwerk unseres Typs nur Kfz-Lichtmaschinen in Frage. Ein weiterer Vorteil von Kfz-Generatoren ist, dass sie Gleichstrom erzeugen, welcher sich sehr gut mit einfacher Technik in Akkumulatoren speichern lässt. Dennoch unterscheidet man Kfz-Generatoren in zwei grundlegende Kategorien:

10.1.1 Gleichstromgeneratoren

Der Name „Gleichstromgenerator“ ist in erster Linie irreführend, denn wie alle Generortypen erzeugen sie ebenfalls Wechselstrom. Wechselstrom basiert auf der Lorenzkraft. Bewegt sich ein Leiter quer zu einem Magnetfeld, so wirkt die Lorenzkraft auf die Elektronen in diesem Leiter und setzt diese in Bewegung. In einem Generator wird diese Eigenschaft genutzt indem eine bzw. mehrere Spulen mechanisch in einem Magnetfeld gedreht werden. Somit entsteht an den Leiterenden der Spulen eine Spannung. Die Richtung der Spannung hängt davon ab, ob das induzierte Magnetfeld in der Spule größer oder kleiner wird. Die Größe der magnetischen Feldstärke ist von der Stellung der Spule zum Erregermagnetfeld abhängig. So entsteht pro Umdrehung eine Sinuswelle der Spannung.

Gleichstromgeneratoren unterscheiden sich von Wechselstromgeneratoren nur mit dem sogenannten Kommutator. Dieser Kommutator polt mechanisch die drehende

Spule (Rotor) nach jedem Null-Durchgang der Sinuswelle um. Somit entsteht nach dem Kommutator Gleichstrom. Die Umpolung geschieht über Schleifkontakte. Nachteilig an diesen Schleifkontakten, meist Kohlebürsten, ist, dass sie erstens einem hohen Verschleiß unterliegen und zweitens die komplette erzeugte elektrische Leistung über diese Bürsten abgeführt werden muss [18].

Dies hat zur Folge, dass alle größeren Lichtmaschinen Wechselstromlichtmaschinen sind.

10.1.2 Wechselstromgeneratoren

Heutzutage sind die meisten Kfz-Lichtmaschinen Wechselstromgeneratoren. Die Wirkungsweise ist die gleiche wie bei der Gleichstromlichtmaschine. In der Regel erzeugen Wechselstromgeneratoren 3 Phasen-Wechselstrom. Drehstromgeneratoren für Kraftfahrzeuge sind für Ladespannungen von 14V (Volt) und bei Nutzfahrzeugen auf 28V Ladespannung ausgelegt. Somit sind Generatoren für 12V und 24V Bordnetzspannung handelsüblich.

Da für die Aufladung des Akkumulators, wie schon im vorherigen Unterkapitel erwähnt, Gleichstrom benötigt wird, muss der drei-phasige Wechselstrom gleichgerichtet werden.

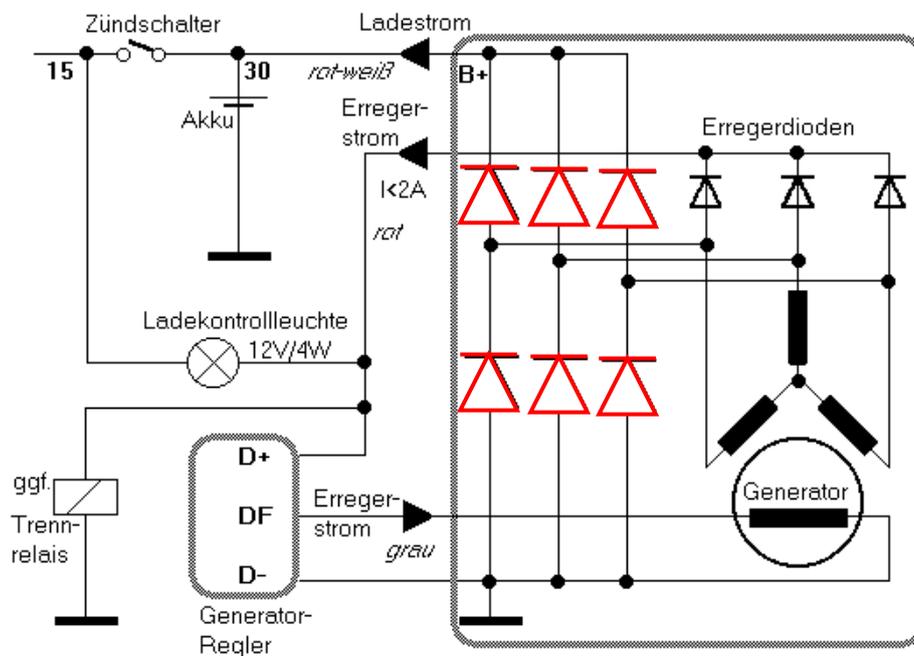


Abbildung 39: Schaltung Drehstromgenerator²⁴

²⁴ Enthalten in: o.V. (2013)

In einer Drehstromlichtmaschine geschieht die Gleichrichtung über Gleichrichtdioden einer Gleichrichtbrückenschaltung. In Abbildung 39 sind diese rot gekennzeichnet.

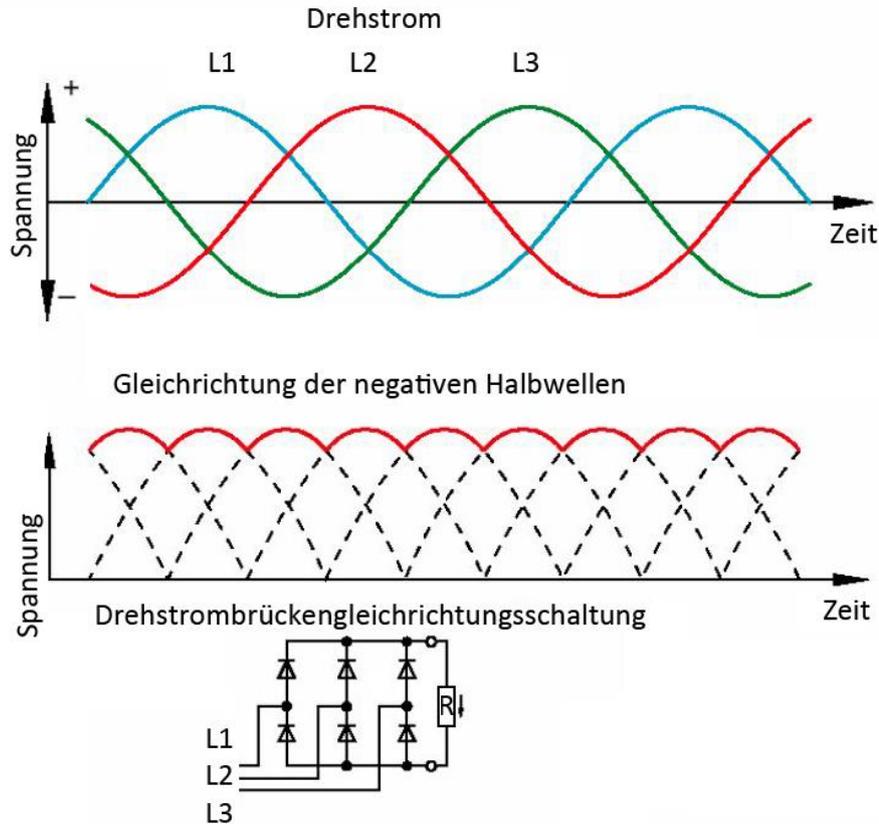


Abbildung 40: Gleichgerichteter Drehstrom²⁵

Wie in Abbildung 40: Gleichgerichteter Drehstrom zu erkennen ist, blockieren die Dioden die negativen Halbwellen des 3-Phasen-Drehstroms. Es bleibt ein Gleichstrom mit leichten Spannungsschwankungen [18].

10.2 Auslegung des Generators

Der Generator muss so gewählt werden, dass er in jedem vorkommenden Betriebszustand des Drachenkraftwerkes genügend Strom an das Verbrauchernetz liefert, sodass mindestens die Akkumulatoren ausreichend geladen sind. Auslegungsziel ist dabei eine positive Ladebilanz, d.h. der Generator soll entsprechend seiner Kennlinie und der Verteilung der Drehzahlhäufigkeit in der Steigphase des Drachens mindestens so viel Energie erzeugen, wie die angehängten Verbraucher, inklusive Rückholmechanismus, benötigen.

²⁵ Enthalten in: Technikprojekt.de (2013)

Wenn die anstehende Windleistung dies nicht ermöglicht, müssen Verbraucher abgeschaltet werden und im Extremfall der Flugbetrieb eingestellt werden. Daraus ergibt sich, dass der Generator immer in einem Drehzahlbereich betrieben werden muss in dem er:

- a. Genug Ladestrom erzeugt, um Verbraucher zu versorgen
- b. Einen optimalen Wirkungsgrad hat.

Punkt a. kann hierbei umgangen werden, indem man Steuerungstechnisch diverse Verbraucher (z.B. Akkumulatoren, Pumpen, etc.) zu- und abschaltet, je nach Leistungsbereitstellung durch den Drachen.

10.2.1 Wirkungsgrad und Verluste

Bei einer Energieumwandlung sind Verluste unvermeidbar. So ist es auch bei der Umwandlung von mechanischer in elektrischer Energie durch einen Generator. Hierbei ist anzumerken, dass Kleinstgeneratoren, wie sie Lichtmaschinen darstellen, im Vergleich zu Großgeneratoren in Bezug auf den Wirkungsgrad deutlich schlechter abschneiden. Dies kann man auch an Abbildung 41 erkennen. Die rote Kennlinie beschreibt den Wirkungsgradverlauf von modernen Drehstromgeneratoren. Die blaue Kennlinie hingegen bezieht sich auf Kurbelwellengeneratoren mit integriertem Anlasser (ISAD = Integrierter Starter-Alternator-Dämpfer, Continental AG) [21].

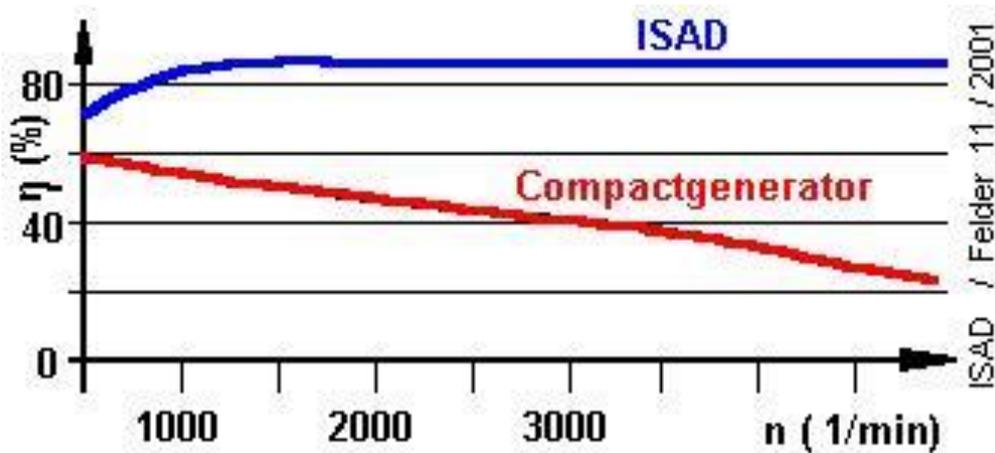


Abbildung 41: Wirkungsgrade KFZ- Generatoren²⁶

²⁶ Enthalten in: Felder, H. (2013), S.67

Wie zu erkennen ist, fällt die rote Kennlinie mit steigender Drehzahl stark ab. Dies hängt damit zusammen, dass bei höheren Drehzahlen sämtliche Verluste des Generators steigen. Verlustarten sind:

- Reibungsverluste in den Lagern
- Reibungsverluste an den Schleifringen
- Lüfterverluste
- Wicklungsverluste (Eisen- und Kupferverluste)
- Hystereseverluste (Magnetisierungsverluste)
- elektrische Verluste im Gleichrichter

Im Gegensatz dazu erreichen Startergeneratoren durchaus Wirkungsgrade von modernen Großgeneratoren. Interessant wird dies dadurch, dass solche Startergeneratoren auch in Motorrädern verbaut werden und dadurch ähnliche Leistungsaufnahmen bieten müssten, wie von einem Drachenkraftwerk zu erwarten sind. Ein weiterer Vorteil dieser Startergeneratoren ist, dass sie in der Rückholphase des Drachens die Rückholeinrichtung bilden könnten.

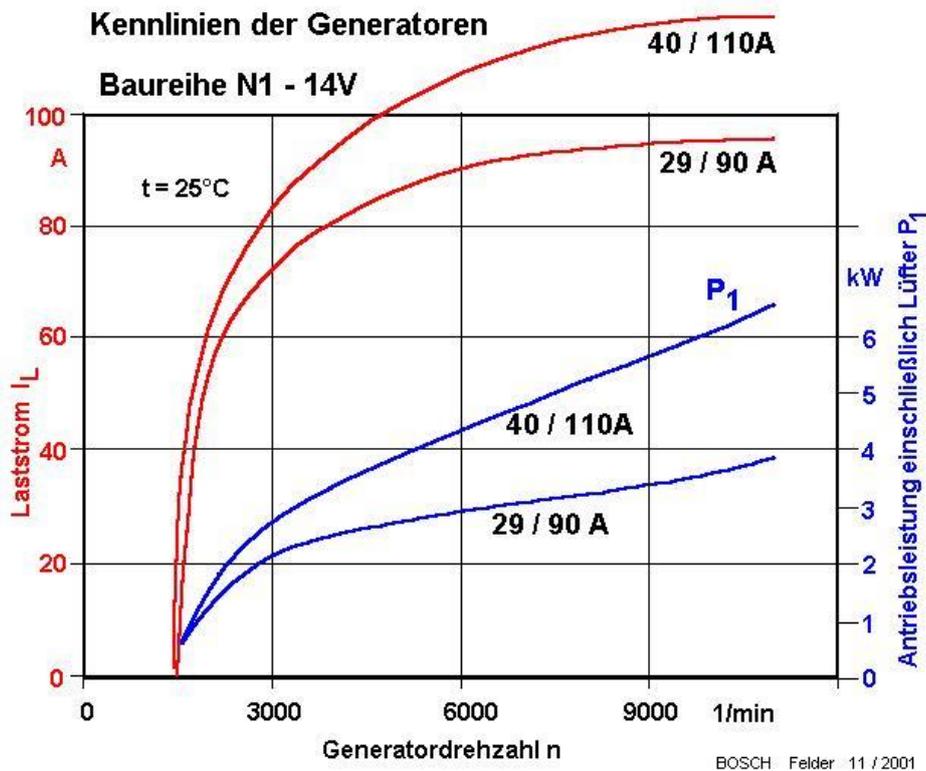


Abbildung 42: Generatorkennlinie²⁷

²⁷ Enthalten in: Felder, H. (2013), S.67

In Abbildung 42 sind die Kennlinien zweier Standard-Kfz- Lichtmaschinen abgebildet. Stellt das Kraftwerk eine mechanische Leistung von z.B. 3KW bereit, so leistet der Generator bei seiner Nenndrehzahl 6000 U/min 90A. Der Wirkungsgrad ließe sich dann mit den Formeln

$$\eta = \frac{P_{el}}{P_{mech}}$$

und

$$P_{el} = U * I$$

berechnen. In diesem Beispiel berechnet sich ein Wirkungsgrad von 42%, welcher deutlich unter den üblichen Wirkungsgraden von Großgeneratoren liegt, aber sich zugleich in Abbildung 42 widerspiegelt [21].

Würde allerdings die gleiche Lichtmaschine in einem kleineren Drachenkraftwerk eingesetzt, z.B. ein Kraftwerk mit 2 KW mechanischer Leistung, und würde das Übersetzungsverhältnis von Spule zu Lichtmaschine so gewählt werden, dass der Generator bei genannter Leistung mit 3000 U/min betrieben wird, so würde ein theoretischer Wirkungsgrad von ca. 50% erreicht.

Aus diesem Beispiel lässt sich ableiten, dass es Sinn macht, eine Lichtmaschine auszuwählen, die mit ihren Nenndaten deutlich über den erreichbaren Leistungen des Drachens liegt. Somit wird der Generator unter seinem Nennlastbereich in einem Punkt betrieben, in dem er den größten Wirkungsgrad hat.

10.2.2 Dimensionierung des Generators

Wie bereits erwähnt, kommen zwei Typen von Generatoren für dieses Kleinkraftwerk in Frage:

- Kompaktgeneratoren (ugs. Lichtmaschine) und
- Startergeneratoren.

Beide Typen haben für diese Verwendung sowohl Vor- als auch Nachteile.

Kompaktgeneratoren sind günstiger und sowohl gebraucht, als auch neu, leicht zu beschaffen. Ebenfalls ist anzunehmen, dass diese handelsüblichen Lichtmaschinen auch in Schwellenländern in allen benötigten Leistungsbereichen verfügbar sind. In Anlage A1 [21] sind die im Handel verfügbaren Kompaktgeneratoren aufgeführt. Je

nach Leistungsbereich des Drachensystems ist der passende Kompaktgenerator zu wählen. Nachteil dieser Lichtmaschinen ist der niedrige Wirkungsgrad.

Startergeneratoren finden in den letzten Jahren vor allem in der Hybridfahrzeugtechnik vermehrt Verwendung. Wie der Name vermuten lässt, fungieren diese Bauteile sowohl als Generator zur Stromversorgung, als auch als Starter- oder Zusatzmotor. Es gibt diverse Ausführungen. Entweder als Kurbelwellen-Startergenerator, der direkt auf der Kurbelwelle des Verbrennungsmotors aufgef lanscht ist, oder Startergeneratorsystem, welches mittels (Keil-)Riemen mit der Kurbelwelle verbunden ist [22]. Die Startergeneratoren aus der Hybridfahrzeugtechnik befinden sich allerdings in anderen Leistungsklassen als Drachenkraftwerke und kommen demnach nicht in Frage. Kleinere Varianten, bekannt als Dynastarter, kommen aber in folgenden Kleinkraftfahrzeugern zum Einsatz:

- BMW 600 (Isetta),
- Heinkel Kabine,
- NSU Prinz,
- Goggomobil,
- Messerschmitt Kabinenroller,
- Steyr-Puch 500 -650,
- Steyr Puch Haflinger
- Vespa 50 Elestart (seit 1969) und
- diverse weitere

Diese Startergeneratoren befinden sich in Leistungsbereichen, die ein Drachenkraftwerk nach Tabelle 7 bereitstellen kann und sind sowohl als Ersatzteil, als auch gebraucht erhältlich [23].

Die Firma Hirth bietet dagegen kundenspezifische Gesamtlösung im Bereich Startergeneratoren. Ihr Produktportfolio an Dynastartern liegt im Bereich von 0,7-5,5KW elektrischer Leistung bei 28 Volt Gleichstrom. Die Versorgung bei Motorbetrieb benötigt dagegen 12 Volt Gleichstrom [24]. Diese Variante würde sich im besten Falle bei größeren Stückzahlen als wirtschaftlich erweisen.

Dies zeigt, dass diese Bauteile meist deutlich teuer als die Kombination von Kompaktgenerator und Gleichstrommotor sind. Ihre Vorteile liegen aber bei einem höhe-

ren Wirkungsgrad und der Möglichkeit den Startergenerator ohne Übersetzung mittels Riemen- oder Kettentrieb direkt an der Seilwindenwelle anbringen zu können.

10.3 Die Rückholeinrichtung

Wie schon erwähnt sind diverse Kombinationen möglich. Im folgenden Kapitel sollen Gleichstrommotor und Schwungrad genauer betrachtet werden.

10.3.1 Gleichstrommotor

Der Gleichstrommotor, auch Kommutatormotor, ist eine rotierende elektrische Maschine, die mit Gleichstrom versorgt werden muss, um mechanische Leistung abgeben zu können. Benötigt wird diese Art von Arbeitsmaschine, um den Drachen nach der Steig- und Einklappphase, wieder auf eine niedrigere Höhe zu befördern.

Im Prinzip ist der Aufbau ähnlich oder sogar gleich des Gleichstromgenerators. Die Maschine besteht ebenfalls aus Stator, Rotor und Kommutator (Polwender). Es wird zwischen mehreren Erregungsarten unterschieden, welche in folgenden Abbildungen 43 bis 45 dargestellt sind [18]:

- permanenterregte,

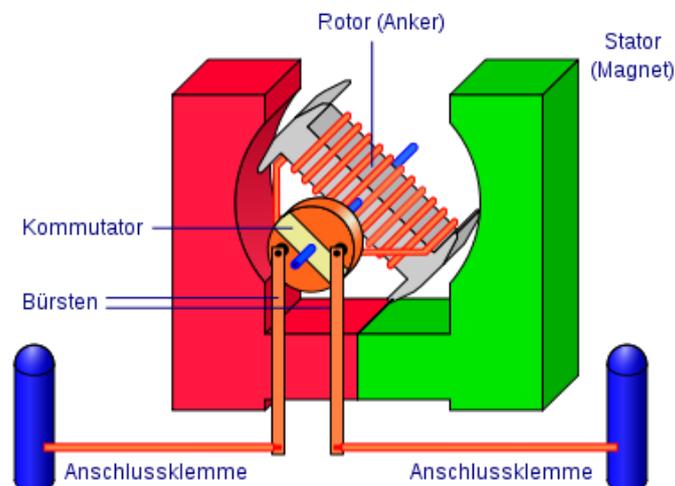


Abbildung 43: permanenterregte Gleichstrommaschine²⁸

²⁸ Enthalten in: Honina (2014)

- selbsterregte,

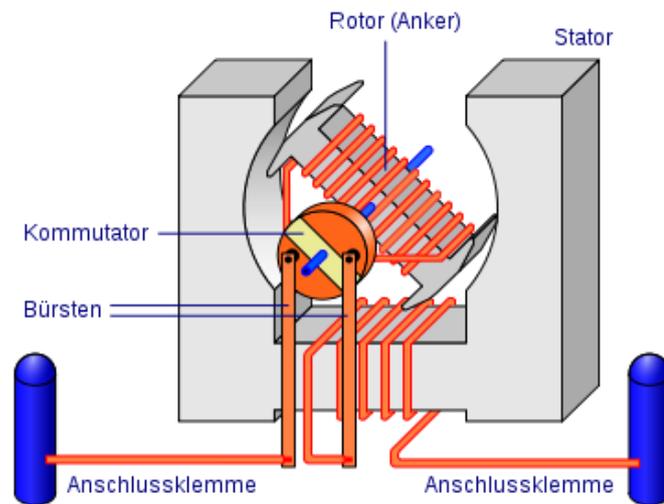


Abbildung 44: selbsterregte Gleichstrommaschine²⁹

- fremderregte

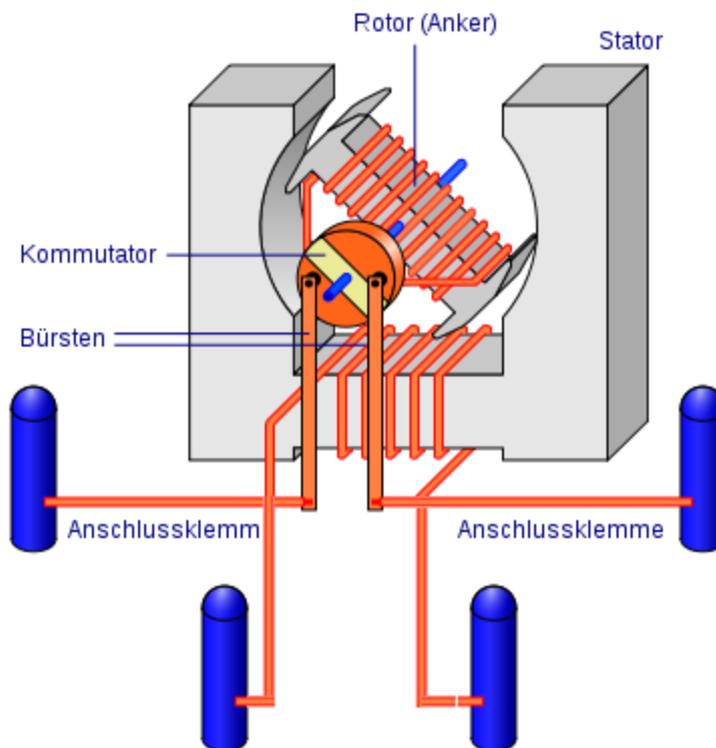


Abbildung 45: fremderregte Gleichstrommaschine

Bei permanenterregten Gleichstrommotoren wird die Stator-Erregung über einen Dauermagneten erreicht. Dies hat den Vorteil, dass hierbei keine elektrische Leis-

²⁹ Enthalten in: Honina (2014)

tung benötigt wird und der Gesamtwirkungsgrad dieser Maschinen besser ist als der anderer Bauarten. Schwerwiegender Nachteil, vor allem bei der Verwendung in Drachenkraftwerken, ist die Tatsache, dass diese Erregung dauerhaft anliegt und während der Steigphase als Magnetbremse wirken würde, da der Reversiermotor reib- oder formschlüssig mit der Seilwinde verbunden ist.

Diesen Nachteil hätten selbst- oder fremderregte Maschinen nicht. Bei diesen Varianten könnte die Erregung während der Steigphase abgeschaltet werden und der Rotor würde „leer“ mitlaufen.

Alle Varianten sind preiswert und in allen Größen erhältlich.

10.3.2 Rückholssystem mit Schwungscheibe

Schwungräder sind mechanische Energiespeicher, die Bewegungsenergie, in Form einer rotierenden Masse, kurzzeitig sehr energieeffizient speichern können. Verwendung finden diese Energiespeicher im (Schienen-)Fahrzeugbau und ersetzen hierbei kondensatorische oder elektrochemische Speicher.

Dasselbe Grundprinzip könnte in einem Drachenkraftwerk in der Bodenstation integriert werden und dem Rückholmotor teilweise oder ganz ersetzen. Anstatt eines Rückholmotors wird während der Steigphase ein selbst konstruiertes Schwungrad „aufgeladen“ und die gespeicherte Energie für die Reversierung des Drachens eingesetzt.

Die im Schwungrad gespeicherte Energie E_{rot} lässt sich aus dem Massenträgheitsmoment J und der Winkelgeschwindigkeit ω des Schwungrades zu $E_{\text{rot}} = 1/2 \cdot J \cdot \omega^2$ berechnen. Das Massenträgheitsmoment J ist dabei proportional zur Masse und zu dem Quadrat ihres Abstandes r von der Drehachse. Je nach Form des Schwungradkörpers lässt sich diese unterschiedlich berechnen. Bei einem Schwungrad mit symmetrischer Schwungscheibe kann dies durch den Formfaktor K_f vereinfacht werden.

Der Wert des Formfaktors K_f liegt, jeweils bezogen auf den gleichen Außendurchmesser, z.B. bei einem dünnen Kreisring bei 1, bei einer gelochten Kreisscheibe bei der der Innendurchmesser halb so groß ist wie der Außendurchmesser bei 0,75 und bei einem massiven Zylinder bei 0,5.

Die gespeicherte Energie lässt sich somit mit $E_{\text{rot}} = 1/2 \cdot K_f \cdot m \cdot v_{\text{max}}^2$ (v_{max} = max. Umfangsgeschwindigkeit der Schwungscheibe) berechnen [26]. Schwungradspeicher

werden im Betrieb nicht ganz entladen, da bei niedrigen Drehzahlen nur noch kleine Leistungen übertragen werden können.

Mit der minimalen Winkelgeschwindigkeit ω_{\min} und der maximalen Winkelgeschwindigkeit ω_{\max} ergibt sich der technisch nutzbare Energieinhalt des Schwungrades zu $E_{\text{rot}} = 1/2 * J * (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2)$.

Liegt die minimale Drehzahl bei der Hälfte der Maximaldrehzahl, kann dreiviertel der insgesamt speicherbaren Energie technisch genutzt werden [27].

Nachteilig an diesem System bei der Verwendung in einem Drachenkraftwerk ist der unsichere Betriebszustand, denn Schwungradspeicher eignen sich nur als Kurzzeitspeicher und verlieren in 2 Stunden ohne Ladung ca. 50% ihrer Speicherenergie. Dies ist auf eine hohe Lagerreibung zurückzuführen, welche sich mit konventionellen und günstigen Lösungen kaum reduzieren lassen [28]. Das würde bedeuten, dass während einer Windflaute die Schwungradscheibe an Energie verliert und nicht mehr in der Lage ist den Drachen vollständig einzuholen. Ein elektrischer Zusatzmotor wäre unabdingbar. Ebenso erhöht das Trägheitsmoment der Schwungradscheibe das Anlaufmoment des Drachensystems, welches wiederum den Start bei niedrigen Windgeschwindigkeiten erschwert.

Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass Schwungräder nicht die Betriebssicherheit gewährleisten, die ein Kraftwerk verlangt. Konventionelle Verfahren, wie das Einholen mittels Elektromotor oder Startergenerator würden sicherlich benötigt werden, um diese Betriebssicherheit zu erreichen.

11 Montage und Betrieb

In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, wie das Faltsystem montiert und am Dra-
chen befestigt wird. Das System ist generell im fertig montierten Zustand vorhanden.
Eine Demontage ist daher nur zu eventuellen Reparaturzwecken oder zum Um- und
Nachbau notwendig. Weiterhin wird aufgezeigt, wie das System in der Praxis funkti-
oniert. Es werden Hinweise gegeben, die einen störungsfreien Ablauf ermöglichen.

11.1 Montageanleitung

In Abbildung 46 ist zu erkennen, dass der Elektromotor (4) und der Ein-/Ausshalter
(2) fest im Gehäuse (3) verschraubt sind.

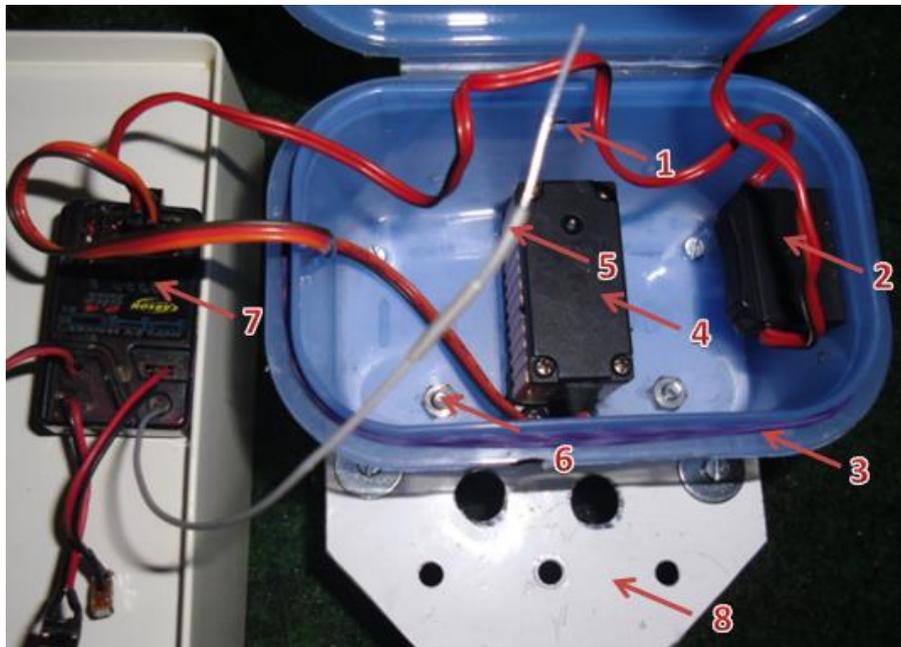


Abbildung 46: Gehäuse

Der Empfänger (7) mit der Antenne (5) wird nicht im Gehäuse verschraubt. Um eine
möglichst große Reichweite der Fernbedienung zu gewährleisten, muss die Antenne
beim Zusammenbau durch die Bohrung (1) aus dem Gehäuse herausgeführt wer-
den. Die Grundplatte (8) wird mithilfe der Schrauben (6) am Gehäuse befestigt.



Abbildung 47: Gehäuse 2

In Abbildung 47 ist das vollständig montierte Gehäuse zu erkennen. Es ist darauf zu achten, dass der Empfänger (7) unter dem An-/Ausschalter (2) zu positionieren ist. Der Akku (9) ist links neben dem Elektromotor (4) zu platzieren.



Abbildung 48: Führungs-schrauben - Seitenansicht

In Abbildung 48 sind die Führungs-schrauben (10) in der Seitenansicht zu erkennen. Sie werden mit einer Unterlegscheibe von unten durch die Grundplatte (8) geführt und von oben mithilfe einer Mutter (11) verschraubt. Um ein Losdrehen zu verhin-

dem, wird unter der Mutter eine Unterlegscheibe positioniert und die Mutter mit einer Kontermutter (12) gesichert. Dies wird in Abbildung 49 ersichtlich.

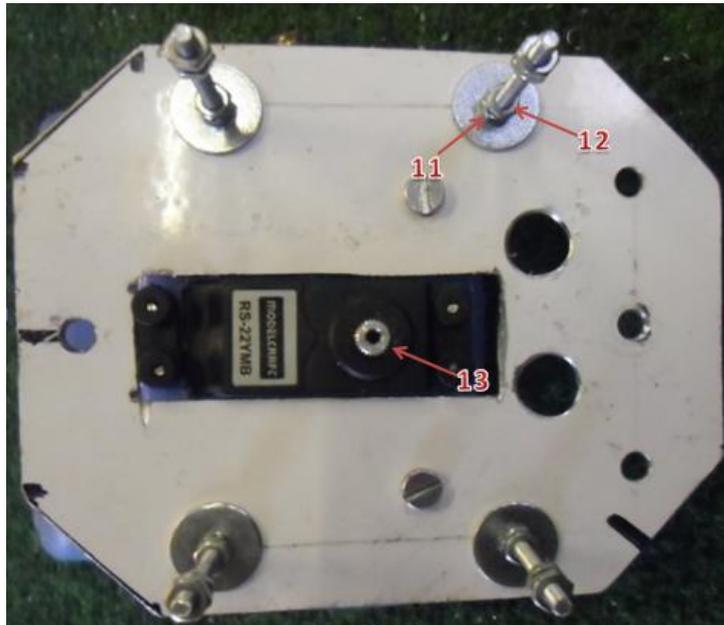


Abbildung 49: Führungsschrauben - Draufsicht

Auf der Verzahnung (13) wird die Spindel (14) mithilfe einer Innensechskantschraube fixiert. Die genauere Einbauposition der Spindel ist in Abbildung 50 zu erkennen.



Abbildung 50: Einbauposition – Spindel

Die Spindel ist leicht nach links verdreht auf der Verzahnung zu positionieren. Dies liegt darin begründet, dass die Spule das Seil im Uhrzeigersinn aufwickelt und der Servomotor gegen den Uhrzeigersinn eine Sperrrichtung aufweist. Es ist darauf zu achten, dass sich der Servomotor in der ausgefahrenen Endstellung befindet.

Um dies zu überprüfen muss erst die Fernsteuerung und dann der Motor eingeschaltet werden. Dann wird die Fernbedienung auf „Steigen“ geschaltet. Anschließend wird zuerst der Motor deaktiviert und danach die Fernsteuerung ausgeschaltet. Der Motor befindet sich nun im ausgefahrenen Zustand.

Das Hauptseil (15) wird mithilfe einer Schlinge und die Spindel (14) gelegt. Die Schrauben (16) gewährleisten die Position des Seils auf der Spindel. Bevor das Seil um die Spindel gelegt wird, muss es jedoch zunächst durch die Seilführung (17) gesteckt werden. Dies wird in Abbildung 51 deutlich.

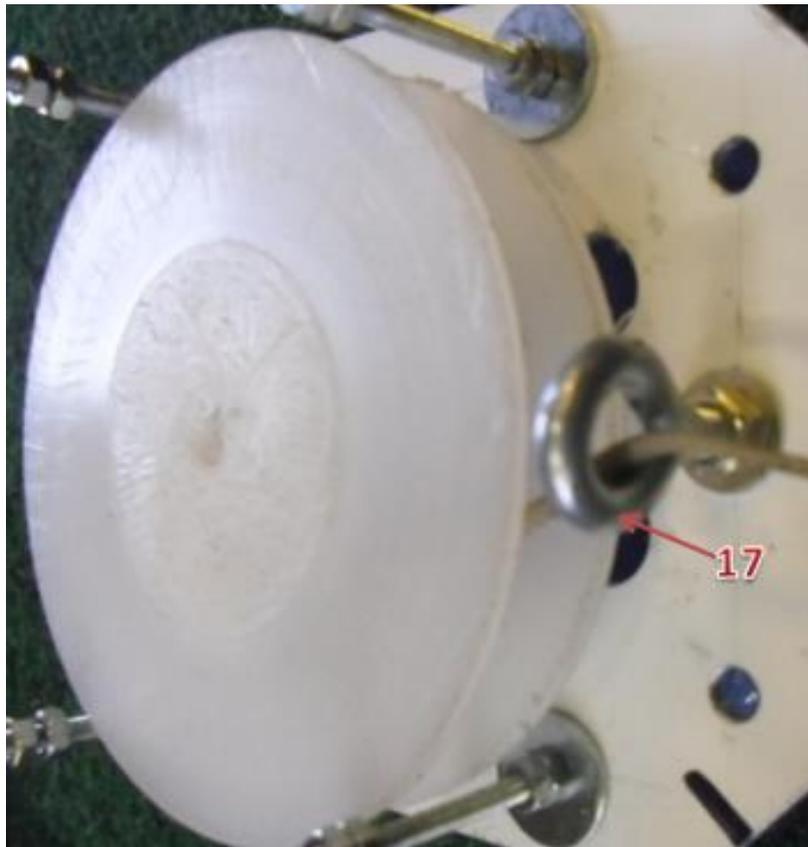


Abbildung 51: Seilführung

In Abbildung 52 wird die Montage der oberen Grundplatte (18) dargestellt. Die Führungsschrauben (10) werden durch die dafür vorgesehenen Bohrungen geführt. Die genaue Positionierung der Grundplatte erfolgt über die Muttern (19). Es ist darauf zu achten, dass die Spindel im Betrieb frei drehen kann und die Muttern nicht berührt, um unnötige Reibungsverluste zu vermeiden. Das Losdrehen der Muttern (19) wird durch die Kontermuttern (20) verhindert.

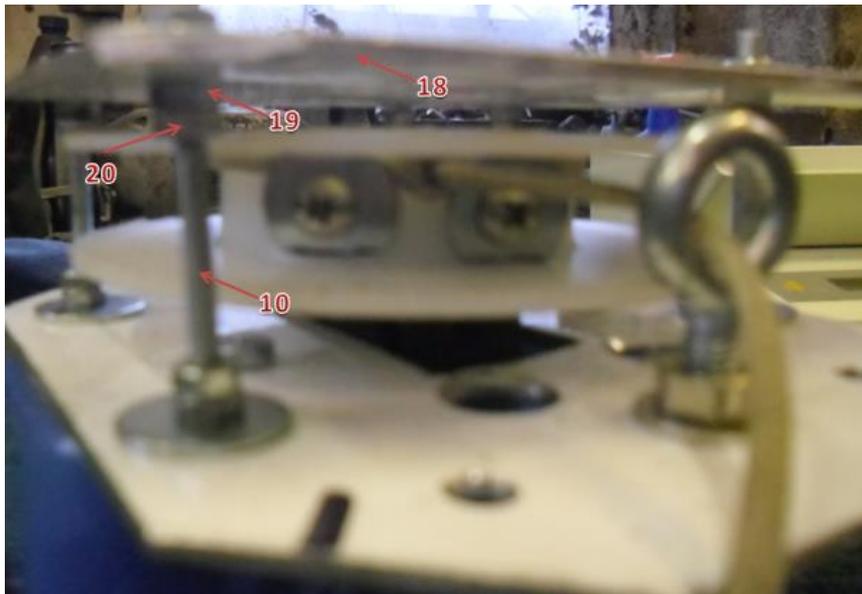


Abbildung 52: Obere Grundplatte

In Abbildung 53 ist die Draufsicht der oberen Grundplatte zu sehen.

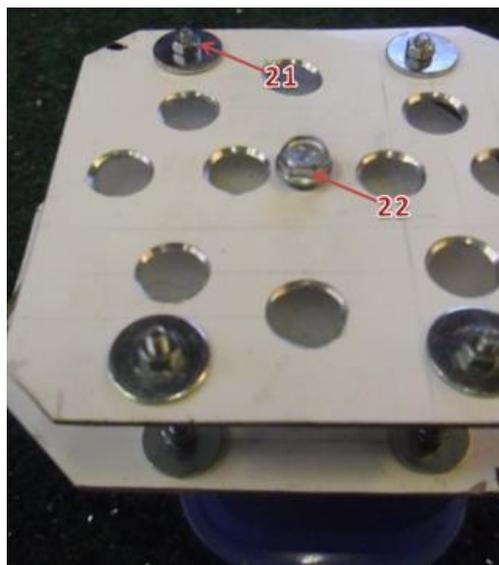


Abbildung 53: Obere Grundplatte - Draufsicht

Durch die Muttern (21) und die Unterlegscheiben, wird die Grundplatte fixiert. Die Schraube (22) wird von oben in die Spindel gedreht, um diese axial zu stabilisieren. Außerdem wird die Spindel horizontal abgestützt. Es ist zu vermeiden, die Schraube zu fest zu drehen, da sonst große Reibkräfte zwischen Grundplatte und Schraube entstehen. Es sollte noch ein kleiner Spalt zwischen den Bauteilen vorhanden sein.

Die Befestigung des Faltsystems am Drachen wird in Abbildung 54 dargestellt.

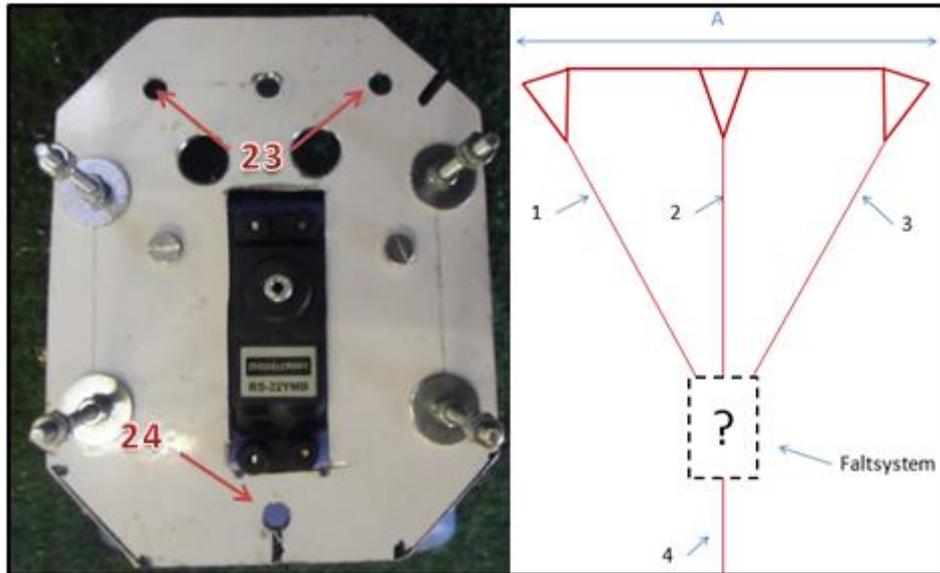


Abbildung 54: Befestigung am Drachen

Die Drachenseile (1) und (3) sind an den Bohrungen (23) zu befestigen. Das Seil (4) wird an der gegenüberliegenden Seite an der Bohrung (24) angebracht. Im Betrieb ist Seil (4) das Seil, welches zum Boden geführt wird. Das Hauptseil (2) wird bei der Montage um die Spule gewickelt (siehe Abbildung 50).

11.2 Betriebshinweise

Hinweis: Bei der Inbetriebnahme des Faltmechanismus ist darauf zu achten, dass zunächst die Fernsteuerung aktiviert wird, bevor der Empfänger eingeschaltet wird. Beim Ausschalten verhält es sich andersherum. Zunächst muss der Empfänger ausgeschaltet werden und im Anschluss die Fernsteuerung. Steht der Motor unter Spannung, aber erhält kein Signal von der Fernsteuerung, verfährt er automatisch in die Mittelstellung. Da das Hauptseil bei der Inbetriebnahme bzw. beim Ausschalten in der Regel nicht unter Zug steht, kann es sich beim automatischen Verfahren leicht verknoten.

Der Betrieb des Drachens lässt sich in eine Steig- und in eine Sinkphase unterteilen. Entsprechend weist die Fernsteuerung des Systems zwei Schaltpositionen auf. Diese sind in Abbildung 55 zu erkennen.

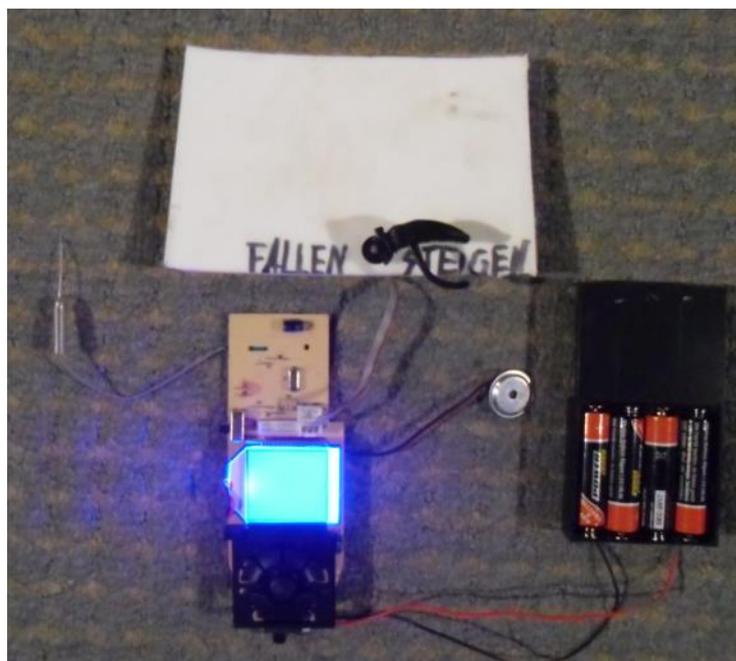


Abbildung 55: Fernsteuerung

Steigphase: Während der Steigphase ist die Fernsteuerung auf die Position „Steigen“ zu schalten. Das Seil auf der Spule ist dabei vollständig abgewickelt und der Drachen kann seine volle Fläche zum Steigen nutzen.

Hat der Drachen seine höchste Flugposition erreicht, ist die Fernsteuerung auf „Fallen“ zu schalten.

Sinkphase: Nachdem die Fernsteuerung betätigt wurde, wickelt die Spule des Fallsystems das Seil auf und klappt den Drachen somit ein. Die Drachenfläche wird reduziert und der Drachen kann eingeholt werden.

Hinweis: Bei stärkeren Winden kann es vorkommen, dass die Kraft des Elektromotors nicht ausreicht, um das Seil (2) (siehe Abbildung 54) vollständig aufzuwickeln. Um ein vollständiges Aufwickeln und damit das Einklappen des Drachens zu ermöglichen, genügt es, nach dem Betätigen der Fernsteuerung auf die Stellung „Fallen“, etwas Seil nachzugeben, anstatt es einzuholen. Dies wird im späteren Automatikbetrieb durch ein Zeitschaltrelais gelöst (siehe Kapitel 9). Durch diese Maßnahme wird Zug vom Seil genommen. Der Elektromotor schafft es nun, das Seil aufzuwickeln. Der Drachen kann eingeholt werden.

Wurde der Drachen auf eine bestimmte Flughöhe eingeholt, wird die Fernsteuerung wieder auf die Stellung „Steigen“ geschaltet. Das aufgewickelte Seil wird abgerollt und der Drachen entfaltet sich auf seine volle Fläche. Die Steigphase kann nun wieder beginnen.

12 Kostenabschätzung

Die Kosten des Gesamtsystems lassen sich in zwei Hauptkomponenten aufteilen. Um ein funktionierendes Drachenkraftwerk zu betreiben, ist neben dem in dieser Studienarbeit entwickelten Faltsystem auch eine Bodenstation notwendig. Im Folgenden sollen zunächst die entstandenen Kosten für den gebauten Faltmechanismus erläutert werden und anschließend eine Kostenabschätzung für den Bau einer Bodenstation getätigt werden.

Für den Bau des Faltmechanismus sind sieben einzelne Komponenten notwendig. Diese sind in der Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 12: Kosten Faltmechanismus

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

Der größte Kostenträger des Faltmechanismus ist die verbaute Fernsteuerung für 55 Euro (auch für 29Euro mit gleichen Funktionen erhältlich). Der Servomotor mit 35 Euro, sowie der Akku mit 30 Euro tragen ebenfalls deutlich zu den Kosten bei. Zusammen verursachen diese drei Komponenten 85 Prozent der Zwischensumme. Die Kosten für Spindelmaterial, Gehäuse, Bleche und Kleinteile, wie Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben verursachen die restlichen 15 Prozent. Für den Bau des Faltmechanismus ergibt dies eine Zwischensumme von 140 Euro. Um einen kontinuierlichen Betrieb des Drachenkraftwerkes zu ermöglichen, ist die Anschaffung eines Akkuladegerätes, sowie eines Austauschakkus notwendig. Zusammen mit diesen Kos-

tenträgern ergibt sich eine Gesamtsumme von 205 Euro für die Komponenten des Faltmechanismus.

Die voraussichtlich für den Bau der Bodenstation benötigten Komponenten sind in der Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13: Kostenschätzung Bodenstation

Komponente	Kosten
Dynastarter	200 €
Haspel	10 €
Kettensatz	30 €
Seil (300m)	45 €
Bodenplatte	25 €
Erdanker	20 €
Schalter & Elektrik	50 €
Kugellager, Kleinmaterial	20 €
Drachen (1,81 m ²)	65 €
Steuerbatterie	20 €
Rückholssystem	15 €
Zwischensumme	500 €
Autobatterie	50 €
Kabel	20 €
DC/AC Wandler	55 €
Geamtsumme	625 €

Die größten Kosten der Bodenstation entstehen durch den Dynastarter mit 200 Euro. Allerdings funktioniert dieser zum einen als Motor beim Einholen des Drachens, zum anderen als Generator beim Steigen des Drachens. Somit ersetzt er sowohl den Motor als auch die Lichtmaschine der Bodenstation. Im Vergleich zur Verwendung eines Motors und einer Lichtmaschine ist ein Dynastarter zwar teurer, jedoch rentiert sich diese Anschaffung durch seinen besseren Wirkungsgrad. Die weiteren Kosten teilen sich generell gleichmäßig auf die einzelnen Komponenten des Systems auf. Für den Bau der Bodenstation entsteht so eine Zwischensumme von 500 Euro. Für die Rückholeinrichtung wurde bei dieser Kostenrechnung die einfachste, mechanische Variante mit Kosten von etwa 15 Euro angenommen. Die Lösung mithilfe eines SPS-Systems würde voraussichtlich 200 Euro kosten.

Für die Speicherung des produzierten Stroms im Betrieb fallen weitere Kosten durch eine Batterie und Kabel an. Um andere Verbraucher direkt an die Bodenstation anschließen zu können, ist ein Stromwandler notwendig. Zusammen mit diesen Kosten entsteht eine Gesamtsumme von 625 Euro für den Bau der Bodenstation. In Addition mit den Aufwendungen für den Faltmechanismus ergeben sich für die Produktion des Drachenkraftwerkes Kosten von 830 Euro. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass es sich nur um Materialkosten handelt. Stundenlöhne für die Produktion des Kraftwerkes wurden nicht berücksichtigt. Ebenso wurde in die Kostenrechnung keine Reserve mit einbezogen. Zur Sicherheit sollte eine Kostenreserve von etwa 150 Euro angenommen werden.

Im Punkt 8.1 wird erläutert, dass die Leistung des Drachenkraftwerkes durch eine Vergrößerung der Drachenfläche erhöht werden kann, da die Drachenfläche proportional zur entnehmbaren Leistung ist. Die in dieser Ausarbeitung ermittelten Werte, wurden mit einem Sled mit einer Drachenfläche von $1,81\text{m}^2$ gemessen. Dieser kostet 65 Euro. Zusammen mit dem verwendeten Seil ergeben sich Kosten von 110 Euro. Zur Leistungssteigerung des Drachenkraftwerkes kann ein Drachen mit einer Fläche von $15,3\text{m}^2$ verwendet werden. Im Handel kann dieser für 399 Euro erworben werden. Das für diesen Drachen notwendige Seil kostet etwa 135 Euro. Bei der Verwendung dieser Komponenten und inklusive der Reserve würden die Kosten des Systems auf 1504 Euro steigen. Da die Kräfte an den Seilen durch die größere Drachenfläche ansteigen, wird die Leistung des im Faltmechanismus verbauten Servomotors nicht ausreichen, um den Drachen einzuklappen. Die Anschaffung eines stärkeren Motors würde weitere Kosten verursachen. Weiterhin ist darauf zu achten, dass bei einer größeren Drachenfläche evtl. mehr als eine Autobatterie nötig ist, um die entstehende Energie zu speichern. Zusammen mit einem stärkeren Servomotor steigen die Materialkosten auf voraussichtlich über 1600 Euro.

13 Fazit

In dieser Studienarbeit wurde eingehend dargestellt, dass Drachenkraftwerke durch das stärkere und konstantere Windangebot in großen Höhen das Potenzial haben, sich als erneuerbares Energieerzeugungssystem am Markt zu etablieren. Daher wurde ein Blick auf verschiedene Drachenkraftwerksysteme mehrerer Hersteller geworfen und diese erläutert. Von dem am Markt vorhandenen Drachenkraftwerken grenzt sich diese Arbeit ab.

Das übergeordnete Ziel ist die Entwicklung eines Drachenkraftwerkes für die Benutzung in wirtschaftsschwachen Ländern. In Anbetracht dieses Zieles wurde die Aufgabenstellung formuliert. Die zentrale Aufgabe war die Entwicklung eines ferngesteuerten Faltmechanismus. Um dem Einsatzgebiet in wirtschaftsschwachen Ländern gerecht zu werden, sollen die Kosten des Systems so gering wie möglich und die Bedienung simpel gehalten werden. Ein solches Drachenkraftwerk soll regional verwendet werden, um beispielsweise Wasserpumpen zu betreiben oder Beleuchtungseinrichtungen mit Elektrizität zu versorgen. Zum Erreichen dieser Ziele wurden zunächst verschiedene Ideen ausgearbeitet und auf ihre Eigenschaften untersucht. Nachdem die einzelnen Ideen bewertet wurden, wurde ein Faltsystem in der Praxis umgesetzt.

Das gebaute System erfüllt die in der Aufgabenstellung formulierten Anforderungen. Zum einen kann es mit einem Materialaufwand von 140 Euro kostengünstig hergestellt werden, zum anderen sind der Aufbau und die Bedienung simpel, da der gesamte Mechanismus aus nur sechs Bauteilen (zuzüglich Kleinteilen) besteht. Außerdem wurden bei der Herstellung des Systems keine Spezialanfertigungen verbaut. Alle Komponenten sind mit einfachen Mitteln herstellbar. Der simple Aufbau und die unkomplizierte Bedienung des Systems werden in dieser Ausarbeitung im Kapitel 11 genauer erläutert.

Bei der Erstellung der Studienarbeit wurden, neben den in der Aufgabenstellung beschriebenen Anforderungen an das Faltsystem, noch weitere Randbedingungen an den Mechanismus herausgearbeitet. Es wird dargestellt, dass der Mechanismus auch die an ihn gestellten Randbedingungen bezüglich Betriebssicherheit, Gewicht und Flugverhalten erfüllt.

Nachdem das System in der Praxis umgesetzt wurde, konnten Kraftmessungen während des Fluges des Drachens durchgeführt werden. Mit den Daten dieser Messungen konnte ein z-Wert für den ein- und ausgeklappten Drachen ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass der z-Wert im eingeklappten Zustand mithilfe des Faltsystems auf 17 Prozent des Ausgangswertes reduziert werden kann. Auf Basis dieser Werte konnte eine theoretische Leistungsberechnung für das Drachenkraftwerk durchgeführt werden. In diesem Zusammenhang wird im Kapitel 8.2.2 die optimale Einholgeschwindigkeit für den Drachen berechnet. Auf Grundlage der Ergebnisse der Berechnungen kann ein Generator zur Stromproduktion ausgewählt werden. Dazu wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen von verschiedenen Generatortypen eingegangen. Mithilfe der Ergebnisse der Berechnungen kann ein Generator ausgewählt und der optimale Arbeitspunkt festgelegt werden.

Zum Einholen des Drachens bieten sich zwei Möglichkeiten an. Zum einen das Einholen per Motor, zum anderen ein Rückholssystem mit Schwungscheibe. Die theoretischen Grundlagen der verschiedenen Systeme werden erläutert.

Während der Berechnung der Einholgeschwindigkeit kommt man zu der Erkenntnis, dass die maximale Leistungsentnahme bei einer Einholgeschwindigkeit möglich ist, die um das 2,5-fache höher ist als die Ausfahrgeschwindigkeit. Das Ergebnis der maximalen Leistung ist sehr gering. Im Punkt 8.1 wird jedoch darauf hingewiesen, dass diese Leistung durch die Verwendung eines größeren Drachens erhöht werden kann, da sich die entnehmbare Leistung proportional zur Drachenfläche verhält.

Sollte im Hinblick auf eine weitere Studienarbeit ein größerer Drachen verwendet werden, müssen die in dieser Arbeit berechneten Werte für den neuen Drachen erneut ermittelt werden. Um die Leistungsentnahme zu verbessern, kann das Faltsystem weiter optimiert werden. Sollte es gelingen, den z-Wert des eingeklappten Drachens durch die Verbesserung des Systems um einen größeren Faktor zu verringern, ist eine höhere Leistung des Kraftwerkes möglich. Bei dem Ziel weiterführender Arbeiten ein vollautomatisches Kraftwerk zu entwickeln, kann das in dieser Arbeit entstandene Wissen als Grundlage dienen. Für den Bau der Bodenstation können die in der Kostenabschätzung aufgeführten Komponenten verwendet werden. Die Erläuterungen bezüglich der verschiedenen Systeme zur Erkennung der Seillänge dienen als Basis zur Entwicklung eines automatisierten Drachenkraftwerkes.

14 Quellenverzeichnis

- [1] Quaschnig, Volker; Erneuerbare Energien und Klimaschutz – Hintergründe, Techniken, Anlagenplanung, Wirtschaftlichkeit; 1. Auflage; München 2008
- [2] Oettigmann, Bernd; Airborne Wind Energie zur Stromerzeugung und als Antriebshilfe - Funktionsweise der Techniken und exemplarische Anwendung in der beruflichen Bildung; Münster 2011
- [3] Stieglitz, Roland; Heinzl, Volker; Thermische Solarenergie – Grundlagen, Technologie, Anwendungen; 1. Auflage; Berlin Heidelberg 2012
- [4] United Nations; <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37037/umfrage/anzahl-der-menschen-ohne-zugang-zu-elektrizitaet-nach-regionen/>; 2014; Einsichtnahme: 27.11.2013
- [5] Kafka, Bernd; http://www.interfahren.com/fileadmin/user_upload/download/beaufort_scala/Beaufort_Skala.jpg; 2014; Einsichtnahme: 02.12.2013
- [6] Kaltschmitt, Martin; Streicher, Wolfgang; Wiese, Andreas (Hrsg.); Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte; 4. Auflage ; Berlin Heidelberg 2006
- [7] Hauer, Katharina; Nutzung der Windenergie mit einfachen Flugdrachen – Drachenwiderstand in der Rückholphase; Mannheim 2013
- [8] Deutsches CleanTech Institut (Hrsg); Studienreihe - Band 2 - Windenergie; Bonn 2009
- [9] Bormann, Dr. Alexander; Enerkite – Windenergie neu definiert; Kleinmachnow 2011
- [10] FH Münster (Hrsg);<http://www.ibl.fhmuenster.de/kitewiki/index.php/Hauptseite>; 2013; Einsichtnahme: 25.10.2013
- [11] Provost, James; commons.wikimedia.org/wiki/File:Airborne_wind_generator-en.svg; 2008; Einsichtnahme: 25.10.2013
- [12] Gille, Denny; <http://www.erneuerbareenergien.de/google-will-die-fliegende-wind-turbine/150/469/63014>; 2013; Einsichtnahme: 25.10.2013
- [13] Sky Windpower (Hrsg); http://www.skywindpower.com/science_windpower.htm?_p=Y ; 2013; Einsichtnahme 26.10.2013

- [14] Vargas Evans, Manuel; <http://skigh-energy.com/?author=1>; 2013;
Einsichtnahme: 25.10.2013
- [15] West, Gilbert; <http://greencrowding.com/de/blog/clean-tech/airborne-wind-energy-overview>; 2013; Einsichtnahme: 25.10.2013
- [16] Hausmann, Felix; Nachhaltige Energiesysteme – Windenergie; Vorlesungsskript; Mannheim 2013
- [17] Franetzki, Dr. Manfred; www.ibfranetzki.de; 2013; Einsichtnahme: 12.12.2013
- [18] Moritz, Michael; Antriebstechnik; Vorlesungsskript; Mannheim 2013
- [19] o.V.; <http://www.donau-boote.de/showthread.php?t=3190&page=2>; 2013;
Einsichtnahme: 04.06.2013
- [20] Technikprojekt.de (Hrsg); <http://www.technikprojekt.de/technik/metall/schweissen/schweissen.htm>; 2013; Einsichtnahme: 04.06.2013
- [21] Felder, Helmut; <http://www.fahrzeug-elektrik.de/Edee.htm>, Seite 67; 2013;
Einsichtnahme: 27.11.2013
- [22] Felder, Helmut; <http://www.fahrzeug-elektrik.de/Edee.htm>, Seite 69; 2013;
Einsichtnahme: 27.11.2013
- [23] Tiedemann, Carsten; <http://www.auto-elektrik.de/content/dynastarter-datenblatt.pdf>; 2014; Einsichtnahme: 05.01.2014
- [24] Göbler Hirthmotoren KG (Hrsg); <http://www.hirth-motoren.de/de/starter-generator.html>; 2014; 05.01.2014
- [25] Honina; <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gleichstrommaschine.svg>; 2014;
Einsichtnahme: 05.01.2014
- [26] Widmer J., Asper H.K; Woven ribbon composite flywheel with self-centering hub. Proceedings of the 20th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference IECEC; 1.Auflage; Warendale, USA 1985
- [27] Sprengel, U., et al; Positionspapier zur Energieversorgung in der Raumfahrt. Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLVR); Stuttgart 1986
- [28] Schulz, Dr. Volker; Nachhaltige Energiesysteme – Energiespeicher; Vorlesungsskript; Mannheim 2013

15 Anhang

A1: Liste verfügbarer Kompaktgeneratoren [22]

Typ	n_0	I_{\max}	n_{\max}
GC-14V 27/ 50A	1000	55	18000
GC-14V 27/ 60A	1000	62	18000
GC-14V 30/ 70A	1000	73	18000
GC-14V 37/ 70A	1000	73	18000
K1-14V 20/ 45A	1000	46	15000
K1-14V 23/ 55A	1000	56	15000
K1-14V 23/ 65A	1400	66	12000
K1-14V 28/ 70A	1000	71	15000
K1-14V 30/ 85A	1000	93	15000
K1-14V 20/ 95A	1400	102	12000
K1-14V 2/120A	1500	130	12000
KC-14V 40/ 70A	800	74	18000
KC-14V 40/ 80A	800	83	18000
KC-14V 45/ 80A	800	90	18000
KC-14V 45/ 90A	800	105	18000
N1-14V 36/ 80A	1000	85	15000
N1-14V 29/ 90A	1400	93	12000
N1-14V 34/ 90A	1000	95	15000
N1-14V 40/110A	1400	117	11000
N1-14V 40/115A	1000	122	15000
N1-14V 25/140A	1000	147	15000
NC-14V 50/100A	1000	111	18000
NC-14V 60/120A	1000	140	18000
NC-14V 40/140A	1000	150	18000
NC-14V 70/120A	1000	125	18000
NC-14V 90/150A	1000	150	18000
K1-28V 10/ 35A	1200	36	12000
K1-28V 3/ 45A	1500	47	12000
K1-28V 5/ 55A	1500	60	12000
N1-28V 10/ 55A	1300	58	11000
N1-28V 20/ 65A	1350	67	11000
N1-28V 10/ 85A	1380	85	11000
T1-28V 58/105A	1000	110	7000
T1-28V 65/120A	1000	122	7000
T1-28V 70/140A	1000	147	7000
T1-28V 110/180A	1000	182	7000