



Studienarbeit 6. Semester  
SS 2013

# Nutzung der Windenergie mit einfachen Flugdrachen

- Drachenwiderstand in der Rückholphase -

Katharina Hauer  
Matrikelnummer: 9293193  
Kurs: TMB10EVT

Bearbeitungszeitraum: 10.01.2013 - 10.06.2013  
Studiengang: Maschinenbau - Verfahrenstechnik  
Abgabedatum: 10.06.2013  
Betreuer: Prof. Dr. Felix Hausmann

# Ehrenwörtliche Erklärung

Gemäß §5 der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom 18. Mai 2009 versichere ich hiermit ehrenwörtlich, dass die vorgelegte Studienarbeit mit dem Thema:

Nutzung der Windenergie mit einfachen Flugdrachen

selbständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt wurde und keine anderen als die aufgeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus benutzten Quellen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Bei der geistigen Ausarbeitung der vorliegenden Arbeit waren keine weiteren Personen beteiligt. Diese Studienarbeit wurde bisher in gleicher oder in ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.



Mannheim, den 22.04.2013

# Abstract

There's a need of breaking new grounds in power plant technology to ensure the energy supply of a growing human population in an economic and environmental friendly way. One great possibility for this are airborne wind energy systems. These are harvesting wind energy in great heights and aren't mounted on a pole. They have no fixed connection to the ground, instead of that they are connected to a ground station via a simple line. Airborne wind energy systems use the lift force to keep their flight height. In this way airborne wind power can reach stronger and steadier wind streams in greater heights than regular wind power systems on poles.

This Thesis deals with the development of an extremely low coast power kite system, which should contribute to an easy, independent, cheap and environmental friendly power supply. At first the aerodynamic and meteorological basics are shown. The operating principle of the power kite will be explained and the single components are described.

theoretical calculations of all applied forces to forecast the tensile force of the line during different maneuver in flight are done. Additionally the real tensile forces are measured during some flight experiments and will be compared to the theoretical calculated values. Through this procedure the maneuver in flight with reduced kite expanse revealed as most potential to get to an economic plant service.

For implementation of the favored maneuver in flight in the automatic operating principle a control mechanism is needed. This will be presented at the end of this thesis. Several possibilities will be worked out and the advantages and disadvantages of each will be explained. To complete the recent thesis an outlook for the next steps, needed to be taken to keep on developing M. Franetzki's power Kite, will be given.

# Zusammenfassung

Um Energieversorgung ressourcenschonend und möglichst kostengünstig zu decken, müssen neue Wege in der Kraftwerkstechnik eingeschlagen werden. Eine vielversprechende Möglichkeit dafür sind Flugwindkraftwerke. Das sind Windenergieanlagen, welche die Energie des Windes in großen Höhen nutzen und dabei nicht an einem Masten fest mit dem Boden verbunden sind. Flugwindkraftwerke sind lediglich über ein Seil mit einer Bodenstation verbunden und werden durch Auftriebskraft in der Luft gehalten. So können diese Kraftwerkstypen stärkere und beständigere Winde in größeren Höhen nutzen als Windräder, die auf Türme montiert sind.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines besonders einfachen Fesseldrachen-Flugwindkraftwerk-Systems das für eine kostengünstige und umweltverträgliche Energiegewinnung genutzt werden soll. Zunächst wird auf die aerodynamischen und meteorologischen Grundlagen eingegangen, die dem Funktionsprinzip solcher Anlagen zugrunde liegen. Das Funktionsprinzip und der Betriebsablauf einer solchen Anlage wird erläutert und die einzelnen Anlagenkomponenten näher beschrieben.

Es werden theoretische Berechnung aller wirkenden Kräfte am Drachen durchgeführt, um die Zugkraft des Drachens an der Leine bei verschiedenen Flugmanövern zu ermitteln. Anschließend werden die tatsächlichen Kräfte in praktischen Flugversuchen an dem Drachen gemessen und mit den berechneten Werten verglichen. So hat sich die Variante mit verringerter Drachenfläche als vielversprechendste herausgestellt, um einen möglichst effektiven Kraftwerksbetrieb zu ermöglichen.

Zur Implementierung des favorisierten Flugmanövers in den automatisierten Betriebsablauf ist ein Steuerungskonzept nötig. Dies wird am Ende dieser Arbeit dargestellt. Es werden verschiedene Möglichkeiten erarbeitet und jeweils Stärken und Schwächen der unterschiedlichen Varianten herausgearbeitet. Zum Abschluss gibt die vorliegende Studienarbeit einen Ausblick über die nächsten Schritte, die zur Weiterentwicklung des Kraftwerkssystems von M. Franetzki notwendig sind.

# Symbolverzeichnis

Symbol	Bezeichnung	Einheit
A	Fläche	$m^2$
$v$	Geschwindigkeit	$m/s$
$v_r$	Relativgeschwindigkeit	$m/s$
$C_L$	Auftriebsbeiwert	-
$C_D$	Widerstandsbeiwert	-
E	Energie	J
$F_L$	Auftriebskraft	N
$F_D$	Widerstandskraft	N
$F_{D,D}$	Formwiderstand	N
$F_{D,R}$	Flächenwiderstand	N
$F_{Seil}$	Seilkraft	N
h	Höhe	m
s	Strecke	m
$z_0$	Rauhigkeitslänge	m
$\alpha$	Anstellwinkel	°
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Theoretische Grundlagen</b>	<b>6</b>
3.1	Aerodynamik . . . . .	6
3.1.1	Auftrieb . . . . .	7
3.1.2	Widerstand . . . . .	9
3.1.3	Seilkraft . . . . .	11
3.2	Windgeschwindigkeit . . . . .	13
3.2.1	Windstärke . . . . .	13
3.2.2	Windgeschwindigkeitseinflüsse . . . . .	13
<b>4</b>	<b>Anlagenbeschreibung</b>	<b>16</b>
4.1	Betriebsablauf . . . . .	16
4.2	Drachen . . . . .	19
4.3	Bodenstation . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Widerstandsermittlung</b>	<b>25</b>
5.1	Theoretische Berechnung . . . . .	25
5.2	Experimentelle Überprüfung . . . . .	29
5.2.1	Versuchsaufbau . . . . .	29
5.2.2	Versuchsdurchführung . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Steuerungskonzepte</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>39</b>

# 1 Einleitung

Weder ein moderner Lebensstil noch die Entwicklung auf ein solches Niveau wäre ohne elektrische Energie denkbar. Elektrische Energie ist das Fundament wirtschaftlicher und sozialer Entwicklung eines Landes. Die Entstehung eines primären Wirtschaftssektors mit gewerblichem Anbau von Lebensmitteln, der Bereitstellung von Trinkwasser in großen Mengen und der Fleischproduktion wird durch elektrische Energie erst möglich. Ebenso der Betrieb industrieller Produktionsstätten als Sekundärsektor wird durch Energiewirtschaft ermöglicht. Wirtschaftliche Entwicklung in diesen beiden Sektoren und damit die Entstehung von Arbeitsplätzen bringt immer auch eine Entwicklung des tertiären Sektors als Dienstleistungssektor mit sich. Dies beinhaltet die Bereitstellung von Wohnraum, Verkehrsinfrastruktur, Krankenhäuser, Bildungseinrichtungen und sonstigen sozialen Institutionen. Wirtschaftlicher und sozialer Lebensstandard stehen in direktem Zusammenhang mit der Verfügbarkeit von Energie. Ohne Energie ist eine Entwicklung von Regionen und Ländern undenkbar. Ein Fünftel der Weltbevölkerung hat keinen Zugang zu Elektrizität. Das bindet Ressourcen, denn ohne Strom muss auf andere Energieträger, z.B. Holz, ausgewichen werden um Grundbedürfnisse zu decken. Die Beschaffung von Holz und anderen Energieträgern ist vor allem zeitaufwendig und teuer. Zeit, die vor allem Frauen und Kinder aufbringen, in der keiner anderen Arbeit nachgegangen werden kann, keine Schule besucht werden kann und Geld das nicht anderweitig investiert werden kann. Es entsteht ein Teufelskreis aus Einkommensarmut und Energiearmut, in dem das eine durch das andere bedingt wird.

Der Aufbau einer zuverlässigen, langfristigen und nachhaltigen Stromversorgung in Entwicklungsländern ist damit eine Voraussetzung für die Einhaltung der Millenniumsziele. Die Millenniumsziele sind eine Liste mit acht Entwicklungszielen nach einer UN-Erklärung die bis im Jahr 2015 umgesetzt sein sollen. Mit ökologischer Nachhaltigkeit als siebtes Entwicklungsziel wird die Schonung der natürlichen Ressourcen als eigenständiges Ziel festgehalten und die Industrieländer dazu angehalten ihr Wissen und technische Möglichkeiten zur Steigerung der Nachhaltigkeit an die Entwicklungsländer weiterzugeben. Dieses Vorhaben hat im Hinblick auf energiepolitische Entwicklungsarbeit ei-

ne besonders große Bedeutung. [4] Denn die Folgen einer wirtschaftlichen Entwicklung zahlreicher Entwicklungs- und Schwellenländer auf das Niveau heutiger Industrieländer zu Lasten fossiler Energieträger wären undenkbar. Die Umsetzbarkeit gesetzter Klimaschutzziele, wie beispielsweise dem 2-Grad-Ziel<sup>1</sup> wäre schlichtweg unmöglich. Weltweit ist also die Politik gefragt, intelligente energiepolitische Strategien zu entwickeln und diese erfolgreich umzusetzen. Auf lange Sicht kann dies nur der Aufbau eines klimaschonenden, von fossilen Brennstoffen unabhängiges, Energiesystems sein. [6]

Ein innovativer Bestandteil eines leistungsstarken, klimaschonenden und zukunftsorientierten Energiesystems können Flugwindkraftwerke sein. Flugwindkraftwerke sind Windenergieanlagen, welche die Energie des Windes in großen Höhen nutzen und dabei nicht an einem Masten fest mit dem Boden verbunden sind. Flugwindkraftwerke sind lediglich über ein Seil mit einer Bodenstation verbunden und werden durch statischen oder dynamischen Auftrieb in der Luft gehalten. So können diese Kraftwerkstypen stärkere und beständigere Winde in größeren Höhen nutzen als Windräder, die auf Türme montiert sind.

Die konstruktive Umsetzung solcher Flugwindkraftwerke kann sehr unterschiedlich sein. Die verschiedenen Bauformen können grob in zwei Gruppen eingeteilt werden. Flugwindkraftwerke können aussehen wie Drachen oder Segelflugzeuge, die durch den Auftrieb des Winds getragen werden und Energie über die Zugkraft am Seil, durch periodisches Ein- und Ausziehen des Seils erzeugen. Oder Flugwindkraftwerke sind an einen Ballon angebrachte Rotoren, die frei in der Luft schweben können. Der Wind wird dann dazu genutzt, Turbinen in Rotation zu versetzen, die Stromerzeugung findet also bereits in der Luft statt und der Strom muss über ein Kabel zur Bodenstation transportiert werden. Innerhalb dieser beiden Prinzipien unterscheiden sich die verschiedenen Systeme bei der Wahl der unterschiedlichen Flugkörper.

Energiegewinnung durch Rotationsbewegung:

- schwebende Turbine
- Gyrokopter
- Segelflieger mit Flugwindturbine
- Rotationszylinder
- Leitemühle

---

<sup>1</sup>Ziel internationaler Klimapolitik, die globale Erwärmung auf weniger als zwei Grad, gegenüber dem Niveau vor Beginn der Industrialisierung, zu begrenzen.



Abbildung 1.1: verschiedene Bauformen [9]

- Energy Glider

Energiegewinnung durch Zugkraft am Seil:

- Fesseldrachen
- Segelflieger

In Abbildung 1.1 sind unterschiedliche Bauformen von Flugwindkraftwerken zu sehen. Konventionelle Windräder werden aufgrund der hohen Kosten für den Mastbau in der Regel nicht größer als bis zu 150 Meter Nabenhöhe gebaut. Das enorme Potential der stärkeren und beständigeren Höhenwinde bleibt ihnen damit verwehrt. Für Flugwindkraftwerke gibt es prinzipiell kein Höhenlimit. Dadurch wird ein enormer wirtschaftlicher Vorteil dieses Kraftwerkstyps erwartet. Auch in anderen Bereichen, wie z.B. der Belastung von Mensch und Natur in der direkten Umgebung der Windkraftanlage rechnet man bei Flugwindkraftwerken mit geringeren Auswirkungen als bei herkömmlichen Windturbinen. Auf weitere Unterschiede zwischen den Modellen und den jeweiligen Vor- und Nachteilen, auch im Vergleich zu konventionellen Windkraftanlagen, wird in [9] näher eingegangen.

Werden Drachenkraftwerksysteme mit einfachsten Mittel realisiert, können sie als kleine dezentral arbeitende Kraftwerksstationen besonderes Potential für weniger weit entwickelte Regionen bieten. Denn gerade in ländlichen Gebieten schwach entwickelter Länder

spielen erneuerbare Energien eine große Rolle. Kleinkraftwerke können den lokalen Bedarf decken und arbeiten unabhängig von großen Energieversorgern. So kann eine Preis- und Versorgungsstabilität gewährleistet werden, die zur langfristigen Entwicklung unentbehrlich ist. Kleinkraftwerke können genau auf den jeweiligen Bedarf ausgelegt werden, arbeiten wirtschaftlich und sind umwelt- und klimaschonend. Auf diese Weise helfen sie, dem Teufelskreis aus Armut und fehlender Stromversorgung zu entkommen. [6] In dieser Arbeit wird auf ein spezielles als Fesseldrachensystem realisiertes Flugwindkraftwerk näher eingegangen. Dabei liegt ein besonderer Augenschein auf der kostengünstigen Beschaffung und einfachen Instandsetzung des Gerätes. Dieses Drachenkraftwerk soll, sobald alle grundlegenden Probleme in der Umsetzung gelöst sind, in weniger entwickelten Ländern eingeführt werden, und die Technologie samt Wissen der einheimischen Bevölkerung übergeben werden. Mit diesem Wissenstransfer wird ein Beitrag zur Einhaltung der Millenniumsziele geleistet.

## 2 Aufgabenstellung

Thema dieser Studienarbeit ist die Nutzung der Windenergie mit einfachen Flugdrachen. Die Aufgabe besteht darin, die Rückholphase im Betriebsablauf dieser Flugdrachen genauer zu betrachten. Ziel ist die Vorhersage der benötigten Kraft beim Zurückholen des Drachens. Dies soll zunächst theoretisch berechnet werden, zur Überprüfung dieser Berechnung muss die Zugkraft an der Drachenleine mit einem Kraftmesssystem ermittelt werden.

Die Kräfte beim Ausrollen der Drachenleine wurden in vorhergehenden Untersuchungen gemessen.

Um ein wirtschaftlich rentables Kraftwerkssystem zu entwickeln, ist die Kenntniss der Einholkraft unbedingt notwendig. Nur mit entsprechenden Werten über die Rückholphase kann eine vollständige Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden. In einem optimalen Fesseldrachenkraftwerkssystem ist die benötigte Kraft in der Rückholphase minimal, um den Energieaufwand des Rückholvorgangs möglichst gering zu halten und damit den Gesamtenergiegewinn zu steigern.

# 3 Theroretische Grundlagen

## 3.1 Aerodynamik

Die Kräfte die auf einen Drachen während dem Flug einwirken, sind denen eines Flugzeugs sehr ähnlich. Diese Affinität haben sich bereits die Luftfahrtpioniere Wilbur und Orville Wright zunutze gemacht, indem sie ihre Flugobjekte an Leinen festhielten, um die aerodynamischen Kräfte zu messen. Wie ein Flugzeug ist auch ein Drache schwerer als Luft und ist auf die Bewegung der Luft angewiesen, um den nötigen Auftrieb zu erfahren, der die Gewichtskraft des Drachens ausgleicht. Die Luftbewegung hinter dem Drachen verursacht eine Widerstandskraft, die durch die Zugkraft an der Leine ausgeglichen wird. Das Zusammenspiel dieser Kräfte bestimmt das Flugverhalten eines Drachens im Wesentlichen. [1] Die Richtung der Auftriebs- und Widerstandskraft, sowie die daraus resultierende Zugkraft am Seil beim Drachenflug ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Auch die Winkelbenennungen, die im weiteren Verlauf genutzt werden, sind in Abbildung 3.1 zu sehen.

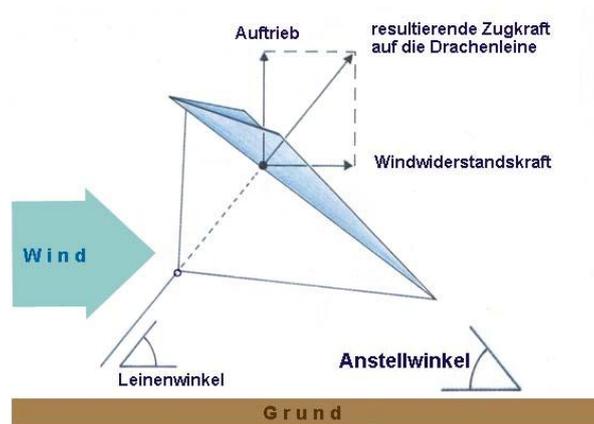


Abbildung 3.1: Kräfte und Winkel beim Drachenflug [12]

### 3.1.1 Auftrieb

Der Auftrieb wirkt der Gewichtskraft des Flugobjekts entgegen. Es wird zwischen dynamischem und statischem Auftrieb unterschieden. Der statische Auftrieb hat für den in dieser Arbeit behandelten Kraftwerkstypen keine Bedeutung. Es wird lediglich die Wirkung des dynamischen Auftriebs genutzt. Dieser wird durch die Bewegung des Flugzeuges oder des Drachens durch die Luft erzeugt und ist immer senkrecht zur Flugrichtung. Die Grundlagen dessen werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

#### Magnuseffekt

Rotiert ein Zylinder um die eigene Achse, kommt es zur Ausbildung eines der stationären Kreisströmung sehr ähnlichen Strömungsbildes. Wird ein kreisförmig umströmter Zylinder zusätzlich quer angeströmt, kommt es zu einer Überlagerung der beiden Strömungen, zur Superposition. Dieser Fall ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Oberhalb des kreisförmigen Querschnittes bewegen sich die Queranströmung und die Kreisströmung in die gleiche Richtung. Die Geschwindigkeiten addieren sich. Die höhere Geschwindigkeit ist an dem geringeren Stromlinienabstand zu erkennen. Nach der Bernoulli-Gleichung hat eine Geschwindigkeitsänderung bei sonst konstanten Umgebungsbedingungen eine Druckänderung zur Folge. Durch die erhöhte Geschwindigkeit auf der Oberseite entsteht ein Unterdruck. Auf der Unterseite des kreisförmigen Querschnittes, also an der Unterseite des Zylinders, ist die Anströmung entgegen gesetzt zur Kreisströmung. Die beiden Strömungen behindern sich gegenseitig. Eine verringerte Gesamtgeschwindigkeit, und damit ein Überdruck, ist die Folge. Die Stromlinien haben in diesem Bereich, unterhalb des Kreisquerschnitts, einen größeren Abstand zueinander. Die Druckunterschiede zwischen Unter- und Oberseite wirken quer zur Anströmrichtung auf das kreisförmige Objekt. Herrscht, wie hier beschrieben, oben der Unterdruck, bewirkt der Druckunterschied eine Querkraft  $F_L$  nach oben, auch dynamischer Auftrieb genannt.

#### Dynamischer Auftrieb

Der in vorangegangenem Abschnitt 3.1.1 beschriebene Magnuseffekt ist die Grundlage für den dynamischen Auftrieb von umströmten Tragflächen und Propellerflügeln. Genau wie bei kreisförmigen Zylindern muss auch bei flügelförmigen Geometrien eine Anströmung als auch eine Zirkulationsbewegung um den Körper vorhanden sein, damit Auftrieb entsteht. In Abbildung 3.3 wird die Überlagerung von linearer und zirkularer Strömungen an einem Flügel dargestellt. Die Auftriebskraft hängt ab von der Größe und Form

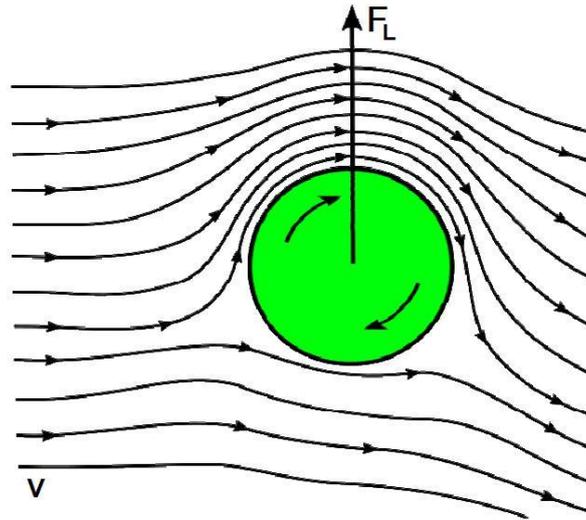


Abbildung 3.2: wirkende Querkraft [13]

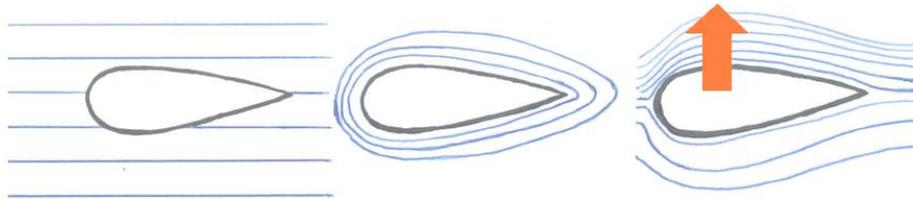


Abbildung 3.3: Überlagerung von Strömungen

des fliegenden Objekts, von der Geschwindigkeit, der Masse, sowie von Viskosität und Kompressibilität der Luft. Die daraus resultierende Auftriebskraft  $F_L$  berechnet sich wie folgt

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * A * C_L * v_r^2 \quad (3.1)$$

Die Auftriebskraft  $F_L$  steigt mit dem Quadrat der Relativgeschwindigkeit  $v_r$  zwischen Flugobjekt und dem umgebenden Fluid. Die Dichte des Fluids wird mit  $\rho$  angegeben,  $A$  ist die Flügelfläche und  $C_L$  der Auftriebsbeiwert. Dies ist ein dimensionsloser Beiwert für den dynamischen Auftrieb eines umströmten Körpers [2].

Bei bekanntem Auftriebsbeiwert  $C_L$  ist die Berechnung des Auftriebs unkompliziert. Die gesamte Komplexität der Auftriebsberechnung ist im Auftriebsbeiwert zusammengefasst. Die Ermittlung des genauen Auftriebsbeiwertes ist sehr aufwendig. Er ist abhängig vom Anstellwinkel  $\alpha$  und der Geometrie des Flugkörpers. Durch Modelle im Windkanal wird er in der Regel experimentell ermittelt. Ist eine Messung von  $C_L$  im Windkanal

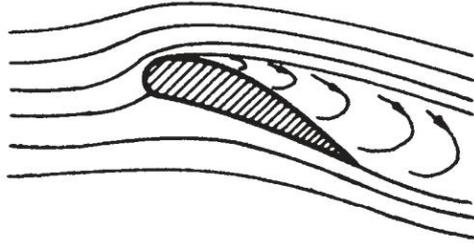


Abbildung 3.4: Strömungsablösung infolge großer Anstellwinkel [8]

nicht möglich, kann dieser Wert durch Anlehnung an möglichst ähnliche Flügelgeometrien geschätzt werden.

### Einfluss des Anstellwinkels

Durch die Vergrößerung des Anstellwinkels kann die Auftriebskraft maßgeblich erhöht werden. Dies gilt allerdings nur für relativ kleine Anstellwinkel. Denn mit zunehmendem Anstellwinkel erhöht sich neben der Auftriebskraft auch die Gefahr von Strömungsablösungen auf der Saugseite des Profils. Bei Anstellwinkeln bis etwa  $10^\circ$  verläuft die Strömung auf beiden Seiten des Flügels entlang der Kontur ohne Ablösungen. Bei dem Anstellwinkel mit maximaler Auftriebskraft beginnen sich gleichzeitig erste Ablösungen der Strömung an der Profilloberfläche auszubilden. Bei einem Anstellwinkel von etwa  $15^\circ$  tritt meist ein vollständiges Abreißen der Strömung ein. In Abbildung 3.4 ist dieser Fall an einem Flügelprofil dargestellt. Die Zirkulationsströmung wird dabei unterbrochen, der Auftrieb des Flügels bricht zusammen, da diese Strömungsform keinen dynamischen Auftrieb erzeugen kann. Der Widerstand  $C_W$  des Flügels nimmt durch die Ablösungen an der Oberseite deutlich zu. [8]

Der exakte Wert des Anstellwinkels, bei dem ein Ablösen der Strömung und damit ein Ende der Auftriebskraft einsetzt, ist formabhängig. Abbildung 3.5 zeigt den qualitativen Zusammenhang zwischen dem Auftriebsbeiwert  $C_L$  und dem Anstellwinkel  $\alpha$ .

### 3.1.2 Widerstand

Die Widerstandskraft  $F_D$  wirkt, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, der Bewegungsrichtung des Flugobjekts entgegen. Widerstand erfährt das Flugobjekt nur dann, wenn es sich relativ zur umgebenden Luft bewegt. [1] Die Widerstandskraft ist abhängig von

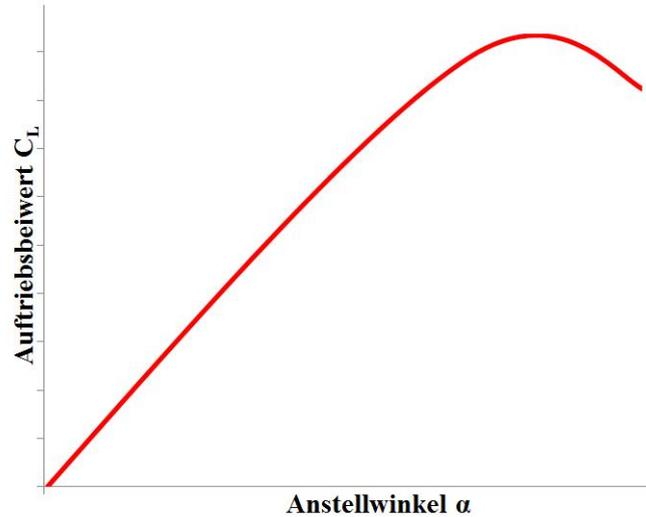


Abbildung 3.5: Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Form	$F_{D,R}$	$F_{D,D}$
ebene Platte, parallel zur Strömung	100 %	0 %
Stromlinienform (Tragflügel)	90 %	10 %
Kreis	10 %	90 %
ebene Platte, senkrecht zu Strömung	0 %	100 %

Tabelle 3.1: Zusammensetzung der Widerstandskraft verschiedener Formen [8]

der Profilloberfläche und der Profilform. Sie setzt sich aus dem Flächenwiderstand  $F_{D,R}$  aufgrund von Reibung und dem Formwiderstand  $F_{D,D}$  aufgrund von Druck zusammen.

$$F_D = F_{D,R} + F_{D,D} \quad (3.2)$$

Bei einer längs angeströmten Platte hat der Formwiderstand keinen Einfluss, die Widerstandskraft bildet sich in diesem Fall zu 100 % aus dem Flächenwiderstand. Bei einer quer angeströmten Platte seien die Verhältnisse umgekehrt, der Anteil des Formwiderstandes an der Widerstandskraft  $F_W$  beträgt 100 %. Bei Körpergeometrien zwischen diesen beiden Extremen (z.B. Kugel, Zylinder, Stromlinienkörper), setzt sich die Widerstandskraft aus beiden Teilen zusammen. Die Anteile des Flächen- und Formwiderstandes am Gesamtwiderstand für verschiedene Profilformen sind in Tabelle 3.1 zusammengestellt. [9]

Die gesamte Widerstandskraft  $F_D$  hängt von der Relativgeschwindigkeit  $v_r$  zwischen Flugobjekt und der umgebenden Luft ab. Des Weiteren wird  $F_D$  durch die Luftangriffs-

Form	$C_D$
ebene Platte (Rechteck)	1,17
Kugel	0,47
Halbkugelschale (konkave Seite zum Wind)	1,42
Halbkugelschale (konvexe Seite zum Wind)	0,38

Tabelle 3.2: Widerstandsbeiwerte verschiedener Formen [11]

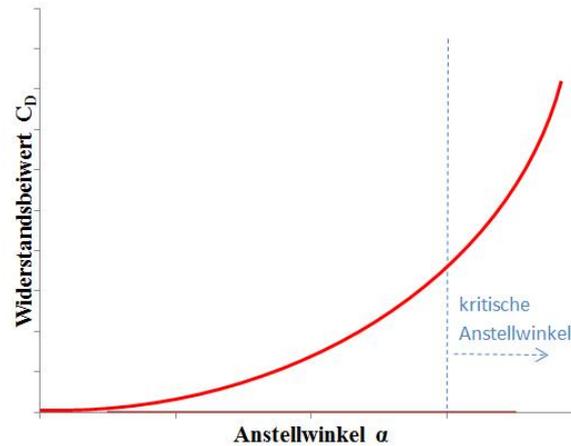


Abbildung 3.6: Widerstandsbeiwert in abhängigkeit vom Anstellwinkel

fläche  $A$ , der Luftdichte  $\rho$  und dem Widerstandsbeiwert  $C_D$  bestimmt. Analog zum Auftriebsbeiwert ist der Widerstandsbeiwert ein dimensionsloser Beiwert, der den komplizierteren Teil der Widerstandgleichung (3.3) zusammenfasst. [11]

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * A * C_D * v_r^2 \quad (3.3)$$

Der Widerstandsbeiwert fasst das Zusammenwirken der Flügelform, des Anstellwinkels und der Oberflächenbeschaffenheit des Körpers zusammen. Für gewöhnlich wird dieser Wert experimentell bestimmt. Wie beim Auftriebsbeiwert kann der Widerstandsbeiwert durch Variation des Anstellwinkels verändert werden. Abbildung 3.6 zeigt diesen Zusammenhang. Die Tabelle 3.2 gibt Beispiele für Widerstandsbeiwerte einfacher geometrischer Formen mit glatter Oberfläche an. [1]

### 3.1.3 Seilkraft

Die aus Auftrieb und Widerstand resultierende Kraft zieht an der Drachenleine, sie wird hier Seilkraft genannt  $F_{Seil}$ , siehe Abbildung 3.7. Dieser Kraft muss die Leine standhalten.  $F_{Seil}$  ist auch die Kraft, die zur Energiewandlung in der Bodenstation zur Verfügung

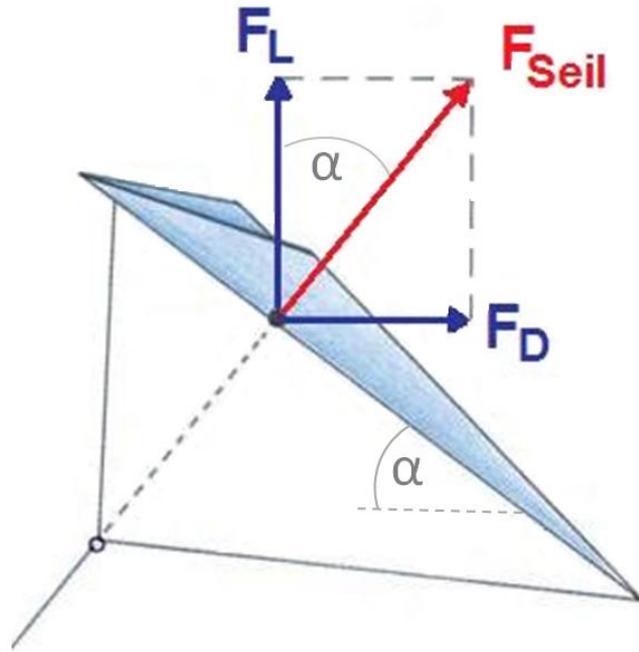


Abbildung 3.7: Kräfte am Drachen [12]

steht. Ist der Anstellwinkel und eine der beiden Kräfte Auftrieb (Gleichung (3.1)) oder Widerstand (Gleichung (3.3)) bekannt, kann die resultierende Seilkraft folgendermaßen berechnet werden:

**Auftriebskraft bekannt**

$$F_{Seil} = \frac{F_L}{\cos(\alpha)} \quad (3.4)$$

**Widerstandskraft bekannt**

$$F_{Seil} = \frac{F_D}{\sin(\alpha)} \quad (3.5)$$

Die Energie  $E$  welche die Bodenstation aus der Seilkraft aufnehmen kann hängt von der Ausrolllänge  $\Delta s$  des Seiles während eines Arbeitszyklus ab.

$$E = F_{Seil} * \Delta s \quad (3.6)$$

Bft	Bezeichnung	km/h	Binnenland	See
0	Windstille	< 1	Rauch steigt senkrecht auf	Spiegelglatte See
1	leiser Zug	1 – 5	Rauch zeigt Windrichtung	kleine Kräuselwellen
2	leichte Brise	6-11	Blätter bewegen sich	Kleine kurze Wellen
3	schwacher Wind	12-19	dünne Zweige bewegen sich	glasiger Schaum
4	mäßiger Wind	20-28	Staub wird verweht	weiße Schaumköpfe
5	frischer Wind	29-38	kleine Bäume schwanken	mäßige Wellen
6	starker Wind	39-49	Wind pfeift	größerer Wellen
7	steifer Wind	50-61	Hemmungen beim Gehen	See geht höher
8	stürmischer Wind	62-74	Zweige brechen	Wellenberge türmen
9	Sturm	75-88	Äste brechen	Sicht beeinträchtigt
10	schwerer Sturm	89-102	Wind bricht Bäume	See weiß vor Schaum
11	orkanartiger Sturm	103 – 117	Wind entwurzelt Bäume	riesige Wellenkämme
12	Orkan	> 118	schwere Verwüstungen	sehr geringe Sicht

Tabelle 3.3: Einteilung nach Beaufort [7]

## 3.2 Windgeschwindigkeit

### 3.2.1 Windstärke

Die Windgeschwindigkeit wird in Meter pro Sekunde gemessen und kann entweder direkt als Messwert in m/s oder km/h, seltener auch in Knoten, angegeben werden oder, wie oft gebräuchlich, die Windgeschwindigkeit wird indirekt als Windstärke angegeben. Zur Klassifizierung der Windstärke wird die Beaufort-Skala<sup>1</sup> verwendet. Die Beaufort-Skala ordnet jeder Windstärke eine Bezeichnung für den Wind sowie die Auswirkungen auf Binnenland bzw. auf die See zu. So kann mit ihrer Hilfe die aktuelle Windgeschwindigkeit einfach geschätzt werden. Die Skala reicht von 0, Windstille, bis zu 12, was als Orkan die höchste Stufe auf dieser Einteilung ist. Tabelle 3.3 gibt die Beaufort-Skala wieder. [14]

### 3.2.2 Windgeschwindigkeitseinflüsse

Der Betrag der Windgeschwindigkeit nimmt von oben nach unten ab und erreicht am Boden den Wert Null. Ursache für diese Geschwindigkeitsabnahme ist die Rauigkeit des Oberflächenprofils, also die Größe und Anzahl der Hindernisse, über die sich der Wind bewegt. Maßgeblich für den Verlauf der Geschwindigkeitsabnahme ist die Oberflächenbeschaffenheit des betrachteten Standortes. Die Existenz dieser Geschwindigkeitsdifferenz

<sup>1</sup>Die Beaufort-Skala wurde 1806 von dem Engländer Francis Beaufort (1774 – 1857) erstellt und nach ihm benannt.

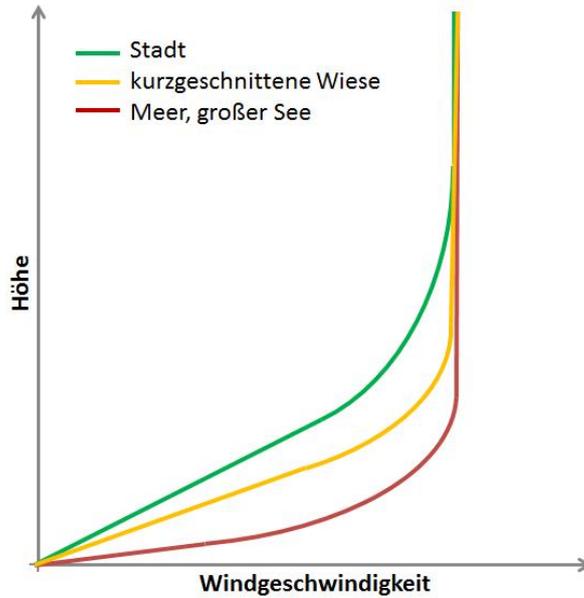


Abbildung 3.8: Höhenabhängigkeit der Windgeschwindigkeit [9]

des Windes in verschiedenen Höhen nutzen Flugwindkraftwerke aus, um effizienter zu arbeiten als reguläre Windkraftwerke.

Für den genauen Verlauf der Abhängigkeit zwischen Windgeschwindigkeit und Höhe existieren verschiedene Modelle, die Umgebungsbedingungen wie Topografie, Bodenrauigkeit und atmosphärische Temperaturschichtung berücksichtigen. Zur Näherung dieses Zusammenhangs kann ein logarithmisches Windprofil verwendet werden. Diese Näherung gilt zumindest in einer bodennahen Schicht bis zu 60 m. Abbildung 3.8 zeigt den qualitativen Verlauf der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Höhe über dem Grund für verschiedene Umgebungsbedingungen.

Das höhenabhängige logarithmische Windprofil wird durch

$$v(h_2) = v(h_1) * \frac{\ln \frac{h_2}{z_0}}{\ln \frac{h_1}{z_0}} \quad (3.7)$$

beschrieben.

Dabei ist  $v$  die Windgeschwindigkeit in der jeweiligen Höhe. In der Höhe  $h_1$  wird die Windgeschwindigkeit gemessen und mit Gleichung (3.7) auf die Windgeschwindigkeit in der Höhe  $h_2$  hochgerechnet. Die Rauigkeitslänge  $z_0$  hängt von der Oberflächenbeschaffenheit ab. Umso unebener ein Profil ist, desto größer ist dessen Rauigkeitslänge.

<b>Oberfläche</b>	$z_0$ [m]
Großstadt mit Wolkenkratzer	1,6
Stadt	1
Dorf, Wald	0,4
kurzgeschnittene Wiese	0,01
Meer, großer See	0,003

Tabelle 3.4: Rauigkeitslänge  $z_0$  [5]

<b>Oberfläche</b>	$a$
offenes Gelände (Wasser, Ackerland, Wüste)	0,16
Gelände mit Hindernissen (Wald, Siedlung)	0,28
große Hindernisse (Großstadt)	0,40

Tabelle 3.5: Richtwerte Exponent  $a$

Beispielhaft sind in Tabelle 3.4 einige Werte für die Rauigkeitslänge angegeben. Vereinfacht kann das höhenabhängige Windprofil durch

$$v(h_2) = v(h_1) * \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^a \quad (3.8)$$

ausgedrückt werden. Für den Exponenten  $a$  bestehen Richtwerte nach Kleemann und Meliß, siehe Tabelle 3.5 [5]. [9]

# 4 Anlagenbeschreibung

Das in dieser Arbeit vorgestellte Drachenkraftwerk ist unter den Flugwindkraftwerken als Fesseldrachensystem einzuordnen. Es besteht lediglich aus Drachen, Seil und Bodenstation. In Abbildung 4.1 ist der Aufbau des Drachenkraftwerks skizziert. Der Drache wird hier, zum Zwecke der besseren Anschaulichkeit, als ebene, rechteckige Fläche dargestellt. Tatsächlich stehen aber verschiedene Drachenmodelle zur Wahl, die abweichende Geometrien aufweisen.

Das Grundprinzip dieses Kraftwerksystems ist es, den effektivsten Teil eines Windrades, die Spitzen der Rotorblätter, nachzuahmen und den Rest einfach weg zu lassen. Die Rotorblattspitzen werden durch einen Drachen ersetzt. Der übrige Flügelteil, der Mast und das Fundament des Windrades muss so nicht mehr gebaut werden, das Maschinenhaus wird auf den Erdboden verlagert. Dies bringt Material- und damit Kosteneinsparung und eine gestiegene Flexibilität mit sich. In Abbildung 4.2 wird dieses Prinzip dargestellt.

## 4.1 Betriebsablauf

Das so genannte Jo-Jo-Prinzip, nach dem die hier beschriebene Anlage arbeitet, beruht auf dem periodischen Ein- und Ausziehen des Seils. Durch diese sich wiederholende Bewegung, ähnlich einem Jo-Jo, bei dem die Schnur ein- und ausgerollt wird, wird Energie gewonnen. Jeder Betriebszyklus teilt sich in eine Ausroll- und eine Rückholphase. In der Ausrollphase wird, durch die Zugkraft des Drachens an der Leine, Energie gewonnen. In Abbildung 4.3 beginnt die Ausrollphase bei 1 und endet bei 2. Durch das Ausziehen der Leine wird ein Generator angetrieben, der die kinetische Energie des Seilausziehvorgangs in elektrische Energie umwandelt. Ist das Seil vollständig ausgerollt wird der Drache auf möglichst widerstandarme Art und Weise wieder in die Nähe der Bodenstation zurückgeholt, Position 1 in Abbildung 4.3. Für diesen Vorgang muss Energie aufgewendet werden. Eine vollständige Rückholung in die Startposition ist nicht erwünscht, da der Start- und Landevorgang eine besonders große Herausforderung an ein automatisiertes Steuerungs-

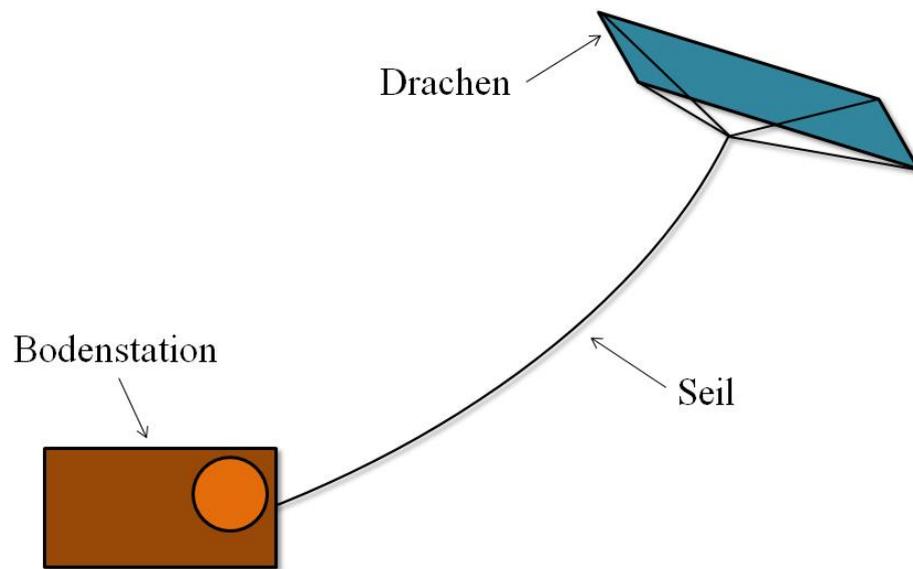


Abbildung 4.1: Gesamtsystem Drachenkraftwerk



Abbildung 4.2: Grundprinzip eines Energiedrakens [2]

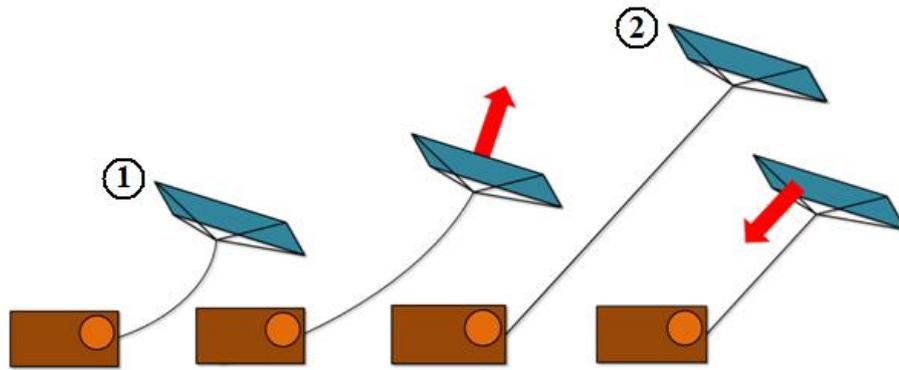


Abbildung 4.3: Aus- und Einrollvorgang

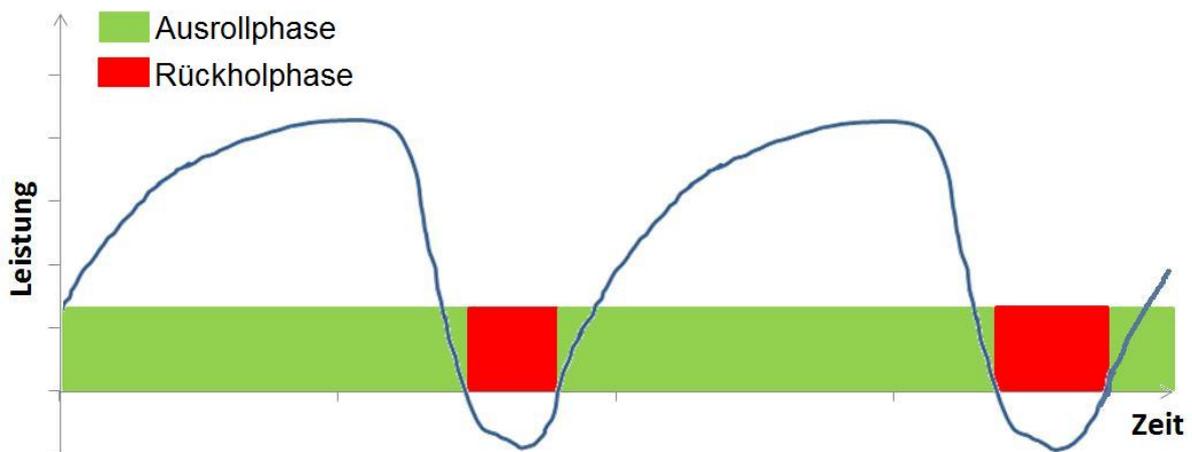


Abbildung 4.4: Leistungsgewinn während des Aus- und Einrollvorgangs

konzept darstellt. Zum Zurückholen des Drachens wird ein Teil der in der Ausrollphase erzeugten Energie wieder eingesetzt. Ziel ist es, den Energieaufwand in der Rückholphase zu minimieren, um ein Maximum der Gesamtausbeute an Energie zu erreichen.

Für einen Praxiseinsatz dieses Drachenkraftwerks muss der Wechsel zwischen Rückhol- und Ausrollphase vollautomatisch stattfinden. Momentan muss an der Bodenstation manuell, per Knopfdruck, zwischen Ausrollen und Einziehen der Leine gewechselt werden. Eine Steuerung der Anlage muss also erkennen, wann die maximale Seillänge erreicht ist, den Drachen in Rückholposition bringen, das Seil eine gewisse Länge einziehen und danach den Drachen wieder in Steigposition bringen und die Leine erneut ausrollen lassen.

## 4.2 Drachen

Für den Drachen stehen verschiedene Ausführungen zur Wahl, die derzeit getestet werden. Im Folgenden werden zwei Drachentypen genauer beschrieben, beides handelsübliche Kleindrachen. Voraussetzung für die verwendeten Drachen ist, dass es sich dabei um Einleiner handelt. Dies sind Drachen, bei denen nur eine Leine bis zur Bodenstation führt. Mehrere Leinen würden zwar die Steuerung des Drachens erleichtern, allerdings wäre das Einrollen durch die Gefahr der Verknotung und ineinander Verwicklung der Leinen schwieriger. Außerdem stellt jede zusätzliche Leine, die bis zum Boden führt ein zusätzliches Gewicht dar, das vom Drachen mit getragen werden muss.

### Rokkaku

Beim Rokkaku handelt es sich um einen sechseckigen Drachen, dessen Ursprung in Japan liegt. Er wird häufig, mittlerweile auch international, bei Drachenkämpfen als Kampfdrachen eingesetzt oder in etwas gezähmter Ausführung als Träger für KAP<sup>1</sup> verwendet. Das Grundgerüst des Rokkakus bilden ein gerader Längsstab und zwei kleinere Querstäbe. Die Querstäbe werden durch Anziehen zweier Leinen, die in ungespanntem Zustand parallel zu den Querstäben verlaufen, leicht gebogen. Der Aufbau des Drachens wird schematisch in Abbildung 4.6 gezeigt. Der für diese Arbeit zur Verfügung stehende Rokkaku Drachen ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten entwickelt dieser Drachen eine enorme Zugkraft. Die Nutzung dieser großen Zugkraft wird durch das für Rokkakus typische Flugverhalten schwierig. Beim Nachlassen der Leinenspannung dreht sich der Drache um die eigene Achse und verliert an Höhe. Beim Wiederanziehen der Leine steuert der Rokkaku die Richtung an in die seine Spitze gerade zeigt und nimmt an Höhe zu.

### Power Sled

Dieser Drachen benötigt keine gekreuzten Stäbe die das Grundgerüst bilden. Er ist mit dünnen Fiberglasstäben ausgestattet. Diese müssen nicht vor jedem Einsatz montiert werden, sondern sind fest in das Drachentuch eingearbeitet und so elastisch, dass sie zur Aufbewahrung in dem Drachentuch mit eingerollt werden können. Der Power Sled Drachen, der hier verwendet wurde, ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Dieser Drachen hat eine Fläche von  $1,81 \text{ m}^2$ . Das Drachentuch ist ein Ripstop-Gewebe aus Polyamid (Han-

---

<sup>1</sup>Kite Aerial Photography, Luftbildfotografie bei der ein Drachen die Kamera in die Luft hebt



Abbildung 4.5: Rokkaku Drachen [10]

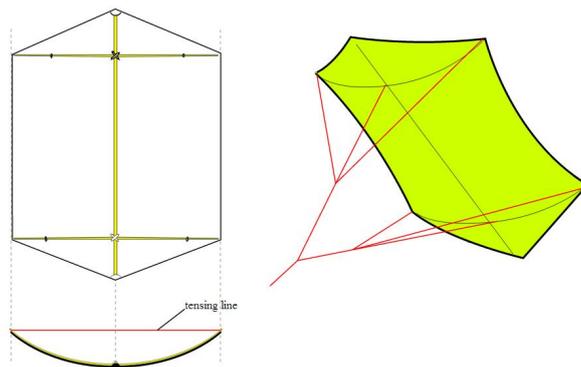


Abbildung 4.6: schematische Darstellung Rokkaku



Abbildung 4.7: Power Sled Drachen

delsname: Nylon). Durch die Ripstop Webart, mit den festeren Fäden in bestimmten Abständen, wird das Tuch besonders reißfest und belastbar.

## 4.3 Bodenstation

In der Bodenstation findet die eigentliche Energiegewinnung statt. Hier wird die kinetische in elektrische Energie umgewandelt. Die Bodenstation rollt das Seil ein und lässt es während der Arbeitsphase ausrollen. Sie besteht aus einer Seiltrommel, deren Antrieb (der Motor), einem Generator und einer Seilführung, die das korrekte Auf- und Abwickeln des Seils sicherstellt. Abbildung 4.8 zeigt den schematischen Aufbau der Bodenstation und die Anordnung der einzelnen Komponenten.

- |                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1 Seil                   | 6 Achslager                        |
| 2 Seiltrommel            | 7 Motor                            |
| 3 Achslager mit Getriebe | 8 Getriebestange (für Seilführung) |
| 4 Generator              | 9 Seilführung                      |
| 5 Achse                  |                                    |

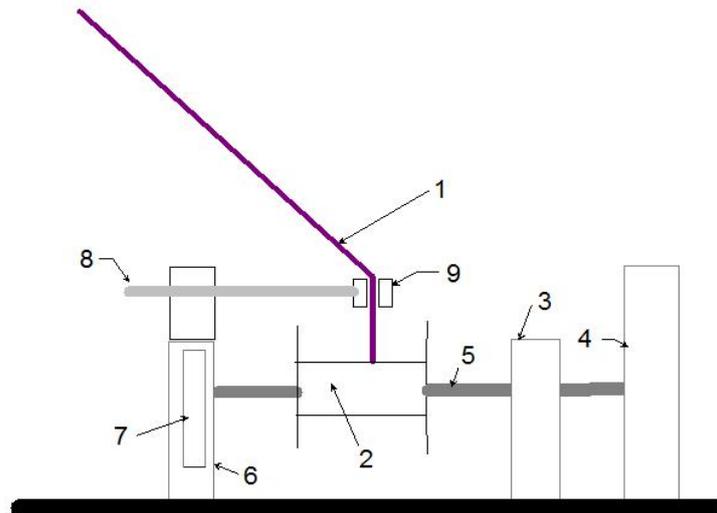


Abbildung 4.8: Aufbau der Bodenstation

Die Schaltung der elektrotechnischen Bauteile in der Bodenstation ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Während der Ausrollphase muss der Schalter auf Position a gestellt sein, damit der Generator die Windenergie nutzen kann. In diesem Fall leuchtet eine Kontrollleuchte auf. Für die anschließende Rückholphase muss der Schalter in Position b umgestellt werden. In diesem Fall arbeitet der Motor, der die Seilrolle dreht und das Seil damit einrollt.

Die realisierte Bodenstation ist in Abbildung 4.10 zu sehen. Durch die Zugkraft des Seils wird eine Drehung der Seiltrommel bewirkt. Durch diese Bewegung wird eine me-

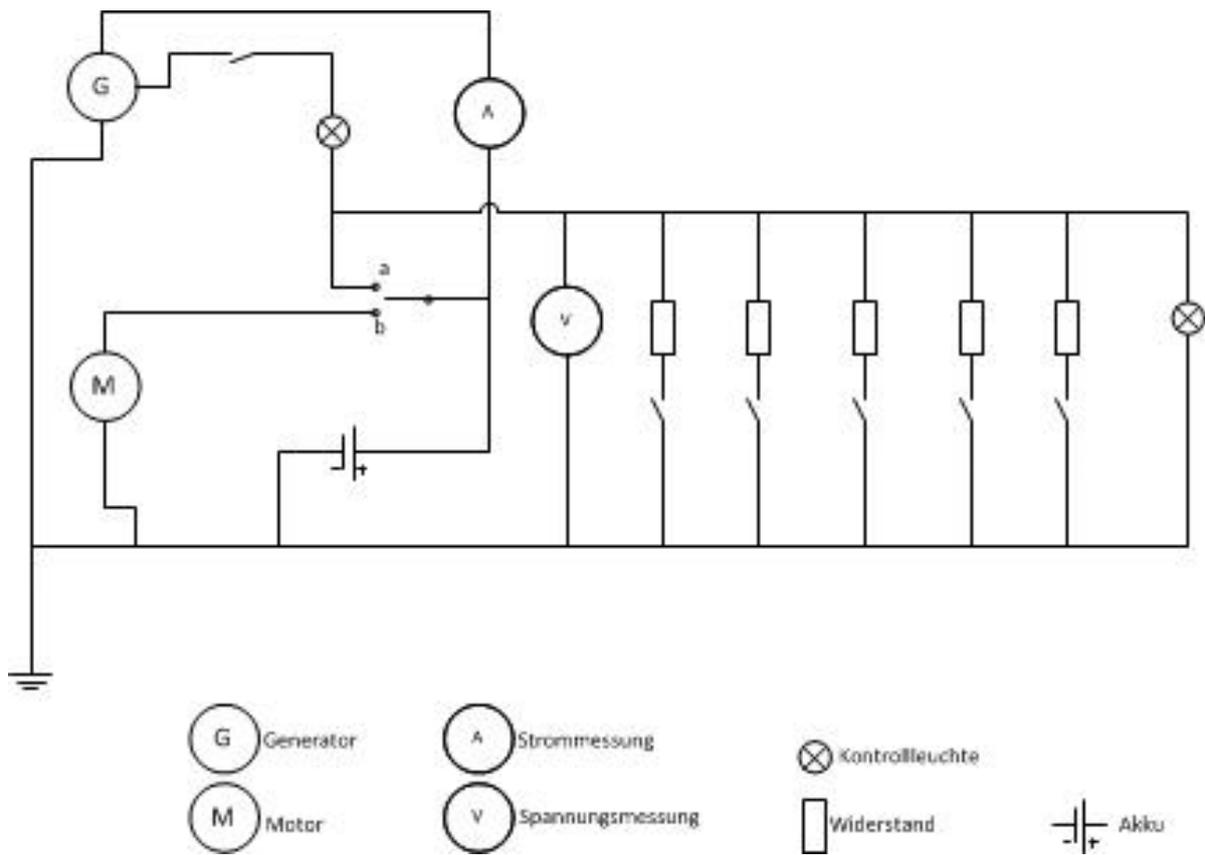


Abbildung 4.9: Schaltplan der Bodenstation

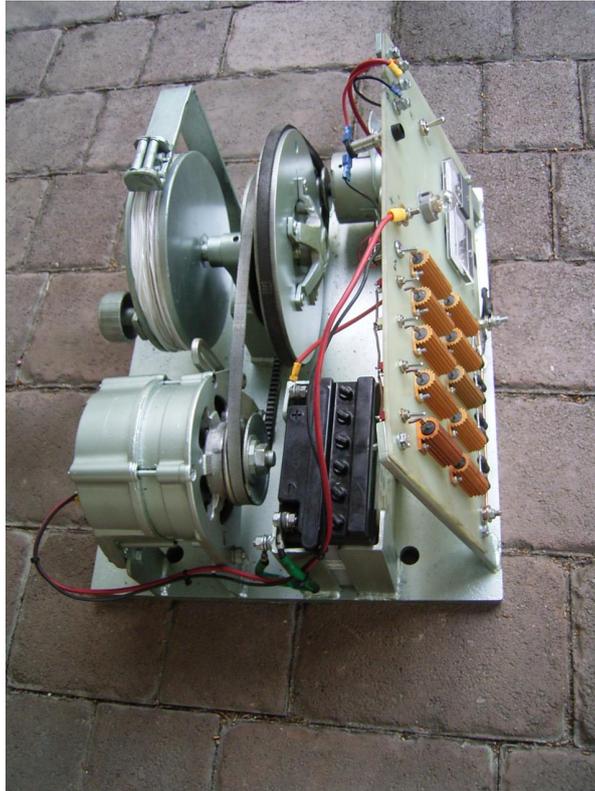


Abbildung 4.10: Bodenstation

chanische Welle in Rotation versetzt, die wiederum den Generator antreibt. Die Umwandlung der kinetischen Energie im Generator beruht auf der Lorentzkraft. Die Ladungsverschiebung bewirkt eine Potentialdifferenz und erzeugt so eine elektrische Spannung. Die erzeugte elektrische Leistung ist die mechanische Leistung abzüglich der auftretenden Verluste.

# 5 Widerstandsermittlung

Zur Verringerung der Seilkraft während der Rückholphase im Vergleich zur übrigen Betriebsphase bestehen verschiedene Möglichkeiten, die theoretisch denkbar wären. Zum einen kann die Flugposition des Drachens verändert werden, also der Anstellwinkel des Drachens variiert oder der Drachen seitlich gekippt werden. Zum anderen kann die Drachenfläche  $A$  verkleinert werden. Alle anderen Größen, die nach Gleichung (3.1) die Auftriebskraft und nach Gleichung (3.3) die Widerstandskraft bestimmen, sind bei der Anwendung des Drachens nicht beeinflussbar. Da noch keine entsprechende Vorrichtung verfügbar ist um den Drachen während dem Flug seitlich zu kippen sollen zunächst die beiden folgenden Maßnahmen erprobt werden.

**Veränderung des Anstellwinkels  $\alpha$ .** Damit wird eine Veränderung der Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte erzwungen, siehe Abbildung 3.5. Bei geringerem  $C_L$  ist die Zugkraft des Drachens am Seil ebenfalls geringer. Eine Verringerung von  $C_L$  kann dabei sowohl durch eine Verkleinerung als auch durch eine Vergrößerung des Anstellwinkels erreicht werden.

**Verringerung der Drachenfläche  $A$ .** Ein Verringern der durch den Wind angeströmten Drachenfläche  $A$  hat den gleichen Effekt wie eine Verringerung des Auftriebsbeiwertes  $C_L$ , die Auftriebskraft  $F_L$  nimmt dadurch ab und die Zugkraft des Drachens am Seil wird damit geringer.

## 5.1 Theoretische Berechnung

Zur Berechnung der am Drachen wirkenden Kräfte wird der Drache als dünne, ebene Platte angenommen. Die Auftriebs- und Widerstandkräfte werden mit Gleichung (3.1) und (3.3) berechnet. Aus diesen Größen resultiert die Zugkraft am Seil, die später mit der gemessenen Zugkraft verglichen wird. Die Zugkraft des Seils setzt sich wie in Gleichung (3.4) bzw. (3.5) angegeben zusammen. Die Luftdichte wird bei allen Berechnungen mit  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$  angenommen. Als Relativgeschwindigkeit wird zu Vergleichszwecken bei

der theoretischen Berechnung  $5,3 \text{ m/s}$  angenommen. Die dimensionslosen Auftriebs- und Widerstandsbeiwerte sind nicht bekannt und werden deshalb anhand bekannter Werte ähnlicher Geometrie angenommen.

### Power Sled

Für den Power Sled Drachen, der in dieser Arbeit zu Versuchszwecken genutzt wurde, wird ein Auftriebsbeiwert von  $C_L = 0,8$  und ein Widerstandsbeiwert von  $C_D = 0,1$  angenommen [3]. Der Widerstandsbeiwert ist so gering, da der Drache sehr flach in der Luft liegt. Der Widerstandsbeiwert einer ebenen Platte, die parallel zur Anströmrichtung liegt, ist null. Ist die Platte nicht parallel, sondern nur in geringem Maß angestellt, ist dieser Wert nur wenig größer. Die Drachenfläche ist bei dem Modell Power Sled 24 im regulären Fall  $1,81 \text{ m}^2$  groß und der Anstellwinkel im normalen Flugbetrieb wird mit  $\alpha = 8^\circ$  angenommen. Zunächst werden die Kräfte berechnet, die bei regulärem Flugbetrieb herrschen. Diese dienen als Vergleichsgröße zu den anschließend berechneten Werten bei verschiedenen Rückholmanövern. Diese Werte in Gleichung (3.1) eingesetzt, ergeben eine Auftriebskraft von

$$F_L = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1,81 \text{ m}^2 * 0,8 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.1)$$

$$F_L = 24,4 \text{ N}$$

Für die Widerstandskraft unter oben genannten Bedingungen ergibt sich nach Gleichung (3.3) folgender Wert

$$F_D = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1,81 \text{ m}^2 * 0,1 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.2)$$

$$F_D = 3,05 \text{ N}$$

Mit der so berechneten Auftriebskraft und dem Anstellwinkel kann die aus beiden Kräften resultierende Seilkraft berechnet werden. Die Berechnung der Seilkraft ist deshalb wichtig, weil bei der experimentellen Überprüfung letztendlich nur diese direkt gemessen werden kann. Nach Gleichung (3.4) beträgt die Seilkraft

$$F_{Seil} = \frac{24,4 \text{ N}}{\cos(8^\circ)} \quad (5.3)$$

$$F_{Seil} = 24,64 \text{ N}$$

Wird der Power Sled Drachen innerhalb eines Arbeitszyklus 20 m ausgerollt bevor die Rückholphase beginnt könnte in dem oben skizzierten Fall die folgende Energiemenge nach Gleichung (3.6) in elektrische Energie umgewandelt werden.

$$E = 24,64 \text{ N} * 20 \text{ m} \quad (5.4)$$

$$E = 492,8 \text{ J}$$

**Veränderung des Anstellwinkels  $\alpha$ .** Wird der Anstellwinkel von  $\alpha = 8^\circ$  auf  $\alpha = 2^\circ$  verringert, ändert sich der Auftriebsbeiwert. Nach einer Simulation mit FoilSim III, siehe [3], beträgt der Auftriebsbeiwert dann  $C_L = 0,2$ . Der Widerstandsbeiwert aufgrund der flachen Flugposition nur noch  $C_L = 0,02$ . Die übrigen Werte bleiben unverändert. Der Auftrieb, den ein Drache unter diesen Bedingungen erfährt, beträgt dann

$$F_L = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1,81 \text{ m}^2 * 0,2 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.5)$$

$$F_L = 6,1 \text{ N}$$

Der Widerstand, welcher der Drache erfährt, verringert sich durch die flachere Fluglage ebenfalls. Nach Gleichung (3.3) nimmt er folgenden Wert an

$$F_D = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 1,81 \text{ m}^2 * 0,02 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.6)$$

$$F_D = 0,61 \text{ N}$$

Demnach ist die auf das Seil wirkende Kraft nach Gleichung (3.4)

$$F_{Seil} = \frac{6,1 \text{ N}}{\cos(2^\circ)} \quad (5.7)$$

$$F_{Seil} = 6,1 \text{ N}$$

Nach Gleichung (3.6) müsste für das Einrollen von 20 m Seil bei dieser Seilkraft folgende Energiemenge aufgewendet werden

$$E = 6,1 \text{ N} * 20 \text{ m} \quad (5.8)$$

$$E = 120 \text{ J}$$

Dies entspricht etwa 1/4 der im Ausrollvorgang gewonnenen Energie.

**Verringerung der Drachenfläche A.** Die Fläche des Drachens wird durch entsprechende Maßnahmen verkleinert. Beispielhaft wird für diese Berechnung eine Drachenfläche mit  $A = 0,5 \text{ m}^2$  angenommen. Der Anstellwinkel bleibt wie in der ursprünglichen Vergleichsrechnung  $\alpha = 8^\circ$  und damit ist hier auch  $C_L = 0,8$ . Alle anderen Werte sind unverändert.

$$F_L = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 0,5 \text{ m}^2 * 0,8 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.9)$$

$$F_L = 6,74 \text{ N}$$

Auch der Widerstand, welcher der Drache erfährt, verringert sich durch die geringere Fläche. Der Widerstandsbeiwert ist, wie in der Vergleichsrechnung,  $C_D = 0,1$ . Nach Gleichung (3.3) nimmt die Widerstandskraft dann folgenden Wert an

$$F_D = \frac{1}{2} * 1,2 \text{ kg/m}^3 * 0,5 \text{ m}^2 * 0,1 * (5,3 \text{ m/s})^2 \quad (5.10)$$

$$F_D = 0,84 \text{ N}$$

Demnach ist die auf das Seil wirkende Kraft bei einer verringerten Fläche  $A$  nach Gleichung (3.4)

$$F_{Seil} = \frac{6,74 \text{ N}}{\cos(8^\circ)} \quad (5.11)$$

$$F_{Seil} = 6,81 \text{ N}$$

Die nötige Energiemenge Gleichung (3.6) zur Einholung des Drachens in diesem Fall beträgt

$$E = 6,81 \text{ N} * 20 \text{ m} \quad (5.12)$$

$$E = 136,2 \text{ J}$$

An obigen, theoretischen Berechnungen zeigt sich gut, dass durch die beiden vorgeschlagenen Maßnahmen, Veränderung des Anstellwinkels und Verringerung der Drachenfläche, eine Verringerung der Seilkraft prinzipiell möglich ist. Die Verringerung der Seilkraft ist proportional zur nötigen Energiemenge zur Rückholung der ausgerollten Drachenleine. In welcher Größenordnung die Variation des Anstellwinkels und der Drachenfläche realisierbar ist, soll in nachfolgenden Experimenten ermittelt werden.

## 5.2 Experimentelle Überprüfung

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit der in vorherigem Abschnitt vorgestellten Möglichkeiten zur Verringerung der Seilkraft werden Flugversuche mit dem Power Sled Drachen durchgeführt. Die Änderung des Anstellwinkels wird durch die gezielte Verkürzung bestimmter Schnüre an der Drachenwaage erreicht. Dadurch soll der Drachen gezwungen werden, steiler bzw. flacher im Wind zu stehen. Die Änderung der effektiven Drachenfläche wird durch eine Verkürzung der mittleren Steuerleine erreicht. Wird dies bis zum Extremfall ausgereizt, ist der Drachen nur noch eine Fahne im Wind und besitzt keine Fläche mehr die vom Wind quer angeströmt wird.

### 5.2.1 Versuchsaufbau

Zur Messung der Seilkraft während dem Drachenflug wird eine Federwaage benutzt. Zur Durchführung wird eine Versuchsanordnung, wie in Abbildung 5.1, aufgebaut. Wie bei jedem Flugmanöver muss der Drachen zunächst gestartet werden. Befindet sich der Drachen in der Luft wird die Drachenleine, wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, in die Federwaage eingehängt. Dazu muss eine Schlaufe in die Drachenleine geknotet werden. Die Messung der Seilkraft ist dann nur bei genau den Leinenlängen möglich an denen sich Schlaufen in der Leine befinden um die Waage einzuhängen. Die Waage muss während dem gesamten Testflug von einer Person gehalten werden, die gleichzeitig die analoge Anzeige abliest. Da der Wind in der Höhe der Testflüge relativ böig ist, ist hier kein konstanter Wert zu erwarten. Es muss vielmehr ein Mittelwert über eine längere Messdauer hinweg ermittelt werden.

### 5.2.2 Versuchsdurchführung

Es wurden Flugversuche mit dem Power Sled Drachen in offenem Gelände, bei Windgeschwindigkeiten von maximal 5,1 m/s in Bodennähe durchgeführt. Durchschnittlich betrug die Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 1,5 m, auf der diese gemessen wurde, 4 m/s. Die Flughöhe des Drachen bei der die Kraft an der Leine gemessen wird, beträgt etwa 8 m. Dem logarithmischen Windprofil nach Gleichung (3.7) zufolge beträgt die Windgeschwindigkeit in dieser Höhe 5,3 m/s. Als Rauigkeitslänge wird  $z_0 = 0,01$  m gewählt. Wird die Windgeschwindigkeit durch das vereinfachte höhenabhängige Windprofil in Gleichung (3.8) berechnet, ergibt sich bei einem Exponent  $\alpha = 0,16$  (offenes Gelände) eine Höhenwindgeschwindigkeit von 5,2 m/s. Damit herrscht während den

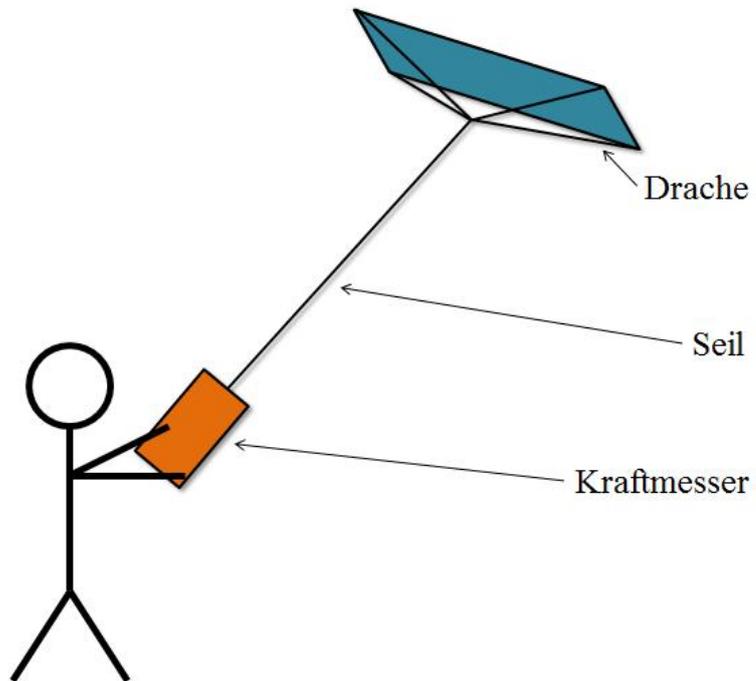


Abbildung 5.1: gesamter Versuchsaufbau



Abbildung 5.2: Seil an der Federwaage

<b>v in <math>m/s</math></b>	<b>A in <math>m^2</math></b>	<b>m in kg</b>	<b>F in N</b>	<b>E in J</b>	<b><math>F_{theor}</math> in N</b>	<b><math>E_{theor}</math> in J</b>
5,3	1,81	2,5	24,55	491	24,64	492,8

Tabelle 5.1: Ergebnisse aus Flugversuchen und Berechnungen zum regulären Flug

durchgeführten Flugversuchen eine leichte Brise mit einer Windstärke 2 nach Beaufort, siehe Tabelle 3.3. Während der Messung bewegt sich die Person, die den Drachen steuert und den Kraftmesser hält, nicht. Somit kann die Relativgeschwindigkeit zwischen Drachen und umgebender Luft als  $v_r = 4 m/s$  angenommen werden.

Da mit der zur Verfügung stehenden Federwaage keine direkte Anzeige der Seilkraft in Newton möglich ist wird zunächst eine Masse  $m$  in kg abgelesen und durch Multiplikation mit der Gravitationskonstanten  $g$  zur Kraft  $F$  umgerechnet.

$$F = m * g \quad (5.13)$$

gemessene Masse  $m = 2,5 kg$

Gravitationskonstante  $g = 9,81 m/s^2$

$$F = 2,5 * 9,81 = 24,55 N$$

Für den regulären Flug, wie in Berechnung 5.3 theoretisch zu 24,64 N bestimmt wurde, kann in diesem Versuch eine Seilkraft von 24,55 N ermittelt werden. Dieser Wert muss bei den zu erprobenden Rückholmanövern also deutlich unterschritten werden. Andernfalls kann das Flugwindkraftwerk nicht wirtschaftlich arbeiten.

**Veränderung des Anstellwinkels  $\alpha$ .** Die Änderung des Anstellwinkels, wie er theoretisch beschrieben und berechnet wurde, erweist sich in der praktischen Umsetzung als äußerst schwierig. Eine Verkleinerung des Anstellwinkels um  $5^\circ$  von  $\alpha_1$  auf  $\alpha_2$ , wie in Abbildung 5.3 skizziert, war geplant. Diese Einstellung sollte durch eine Verlängerung bzw. Verkürzung der Steuerleinen erreicht werden. Die Berechnung der dazu nötigen Leinenlänge war allerdings nicht praxistauglich. Die Flugeigenschaften des Drachens wurden durch diese Maßnahme derartig negativ beeinflusst, dass eine Kraftmessung während dem Testflug nicht möglich wurde. Eine Beeinflussung des Anstellwinkels über die Steuerleinen scheint nicht möglich zu sein. Dazu wären zwei Leinen an jeder Kurve des Drachen notwendig, ausreichend gute Flugeigenschaften konnten bisher nur mit jeweils einer Steuerleine an jeder Kurve erreicht werden. Mit nur einer Leine stellt der Drachen den optimalen Anstellwinkel je nach Windverhältnissen selbst ein, der Anstellwinkel ist dann also nicht beeinflussbar.

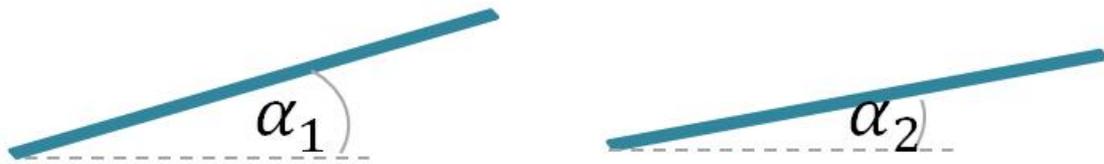


Abbildung 5.3: Änderung des Anstellwinkels



Abbildung 5.4: verringerte Drachenfläche

**Verringerung der Drachenfläche A.** Durch das Verkürzen der mittleren Steuerleine klappen die Seitenflächen des Drachens etwas nach hinten und die Drachenfläche verringert sich. Abbildung 5.4 zeigt einen so modifizierten Power Sled Drachen im Testflug.

In einem ersten Versuch wird die mittlere Steuerleine zunächst um 30 cm gekürzt. Um welchen Betrag die Drachenfläche dadurch exakt abnimmt kann nicht einfach berechnet werden, da sich durch das abklappen nach hinten, neben der Fläche des Drachens, auch die Winkel zwischen den drei Steuerleinen verändern. Durch visuelle Auswertung der während des Testflugs aufgenommenen Bilder (siehe Abbildung 5.4) lässt sich feststellen, dass bei 30 cm kürzerer Leine die Fläche um etwa 20 % abnimmt. In einem zweiten Versuch wird die Leine um weitere 10 cm gekürzt, im Vergleich zum ursprünglichen Zustand also 40 cm. Die dadurch erreichte Reduktion der Drachenfläche wird auf 40 % geschätzt.

$\Delta s$  - Verkürzung der mittleren Leine

A - verbleibende Drachenfläche im Vergleich zu ursprünglichem Zustand

m - Messwert der Federwaage

F - Seilkraft aus Gleichung (5.13) berechnet

$\Delta s$	A in %	m in kg	F in N	E in J
30 cm	80	2	19,6	392
40 cm	60	1,5	14,7	294

Tabelle 5.2: Ergebnisse aus Flugversuchen zur Fläche

E - Energie mit Hilfe von Gleichung (3.6) berechnet

Die Versuche zeigen, dass eine Reduktion der Widerstandskraft des Drachen durch Veränderung der Fläche prinzipiell möglich ist. Dabei kann der zur Rückholung nötige Energieaufwand deutlich verringert werden und einen wirtschaftlichen Kraftwerksbetrieb ermöglicht werden. Beliebiger viel kann die Fläche allerdings nicht verringert werden, da sonst die nötige Stabilität des Drachens für einen sicheren, kontrollierten Flug verloren geht. Das ursprüngliche Ziel des Entwicklers M. Franetzki die Sinkfläche des Drachens auf weniger als ein Zehntel der ursprünglichen Fläche zu verringern ist bei diesem Drachenmodell in der vorliegenden Größe nicht möglich.

## 6 Steuerungskonzepte

Um die in Abschnitt 5 diskutierten Maßnahmen zur Verringerung der Seilkraft in den Betriebsablauf des Fesseldrachen-Flugwindkraftwerks zu implementieren ist eine automatisierte Steuerung nötig. Diese muss in der Lage sein, das Flugverhalten des Drachens während des Flugs zu beeinflussen und dabei die vollständige Kontrolle über den Drachen bewahren. Die Verringerung der Drachenfläche hat sich bei den Flugversuchen als die am einfachsten zu realisierende und praxistauglichste Variante zur Verringerung der Seilkraft herausgestellt. Daher soll nun eine Steuerung gefunden werden, die in der Lage ist die Drachenfläche durch ein Verlängern der äußeren Steuerleinen zu verkleinern.

### **Magnetverbindung**

Eine bisher erdachte Möglichkeit ist das Lösen einer Magnetverbindung in den äußeren Steuerleinen. Durch einen starken Ruck am Ende des Seilausziehvorgangs soll die Magnetverbindung auseinander gerissen werden und die Seitenteile des Power Sled Drachen klappen nach hinten. Die Fläche verkleinert sich also. Da sich ein Landen und erneutes Starten nach jedem Betriebszyklus äußerst negativ auf die Energieausbeute des Kraftwerks auswirken würde, müssen die Seilabschnitte noch während dem Flug wieder zusammen geführt werden. Deshalb bleiben die Seilabschnitte durch ein stark elastisches Gummiband zwischen den Magneten miteinander verbunden. Diese Gummiverbindung verformt sich elastisch solange die Drachenleine eingerollt wird, also solange wie eine zusätzliche Kraft auf die äußeren Seitenteile des Drachen einwirkt. Ist dies nicht mehr der Fall, der Einrollvorgang also beendet, wird die Magnetverbindung durch das Zusammenziehen des Gummibandes wieder zusammen geführt. Dann kann ein erneuter Ausrollzyklus beginnen. Abbildung 6 zeigt diese Verbindung, welche sich in den Steuerleinen zwischen Drachenwaage und Drachenkuven befindet, in verschiedenen Zuständen. Während der Energiegewinnungsphase des Drachens (oben), beim Lösen der Magnetverbindung am maximalen Ausrollpunkt (mitte) und die gelöste Verbindung (unten), wie sie beim Einrollen des Seils sein sollte.

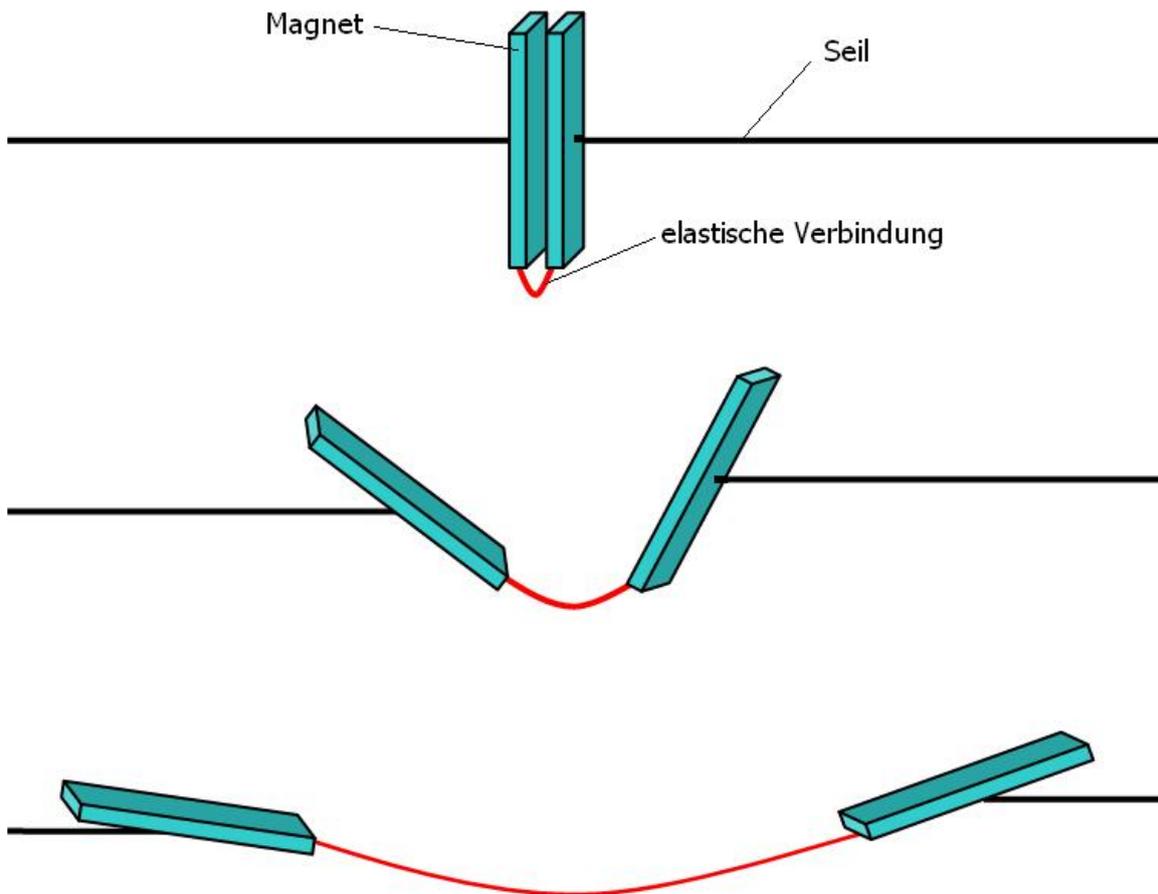


Abbildung 6.1: Magnetverbindung in verbundenem und getrenntem Zustand

Der äußerst einfache Aufbau spricht für diese Möglichkeit. Jedoch ist nicht klar wie sichergestellt werden kann, dass der Ruck am Ende des Seilausziehvorgangs ausreicht um die Magnetverbindungen zu trennen. Vor allem aber verliert der Drachen durch das vollständige Lösen der äußeren Steuerleinen an Stabilität. Die Manövrierbarkeit des Drachens ist in diesem Fall nicht mehr gegeben und er sinkt unkontrolliert zu Boden. Um das zu verhindern müsste die Seilwinde die Drachenleine enorm schnell einrollen. Mit der jetzigen Bodenstation ist das nicht möglich.

## **Steuerkonsole**

Eine Verlängerung der äußeren Steuerleinen anstelle des vollständigen Lösens erwies sich als praxistauglich. Um die Verlängerung der Leinen während dem Flug zu ermöglichen, soll eine Steuerkonsole zwischen Steuerleinen und Zugleine angebracht werden. Diese Konsole fliegt mit und soll deshalb möglichst klein und leicht aufgebaut sein. Bei einem größeren Drachen als in den ersten Versuchen im Rahmen dieser Arbeit sollte das Gewicht einer solchen Konsole dann kein Flughemmnis darstellen. In einer solchen Steuereinheit befinden sich kleine Seilwinden, welche die äußeren Steuerleinen verlängern oder die mittlere Leine verkürzen. Der Effekt, die Verringerung der Drachenfläche, ist der gleiche. Wird die mittlere Steuerleine verkürzt und die äußeren behalten ihre ursprüngliche Länge bei ist nur eine Seilrolle nötig und das einzurollende Seilvolumen geringer. Da die Konsole möglichst leicht werden soll ist diese Version, mit Verkürzung der mittleren Steuerleine, die sinnvollere.

Die Steuerkonsole kann durch eine Funkverbindung mit der Bodenstation in Kontakt stehen. Die Bodenstation teilt der Steuerkonsole dann mit, wann der Ausroll- und Einrollvorgang jeweils beendet ist und die Drachenfläche angepasst werden soll. Der Ablauf dieser Zusammenarbeit ist in Abbildung 6 dargestellt.

Bei der Entwicklung einer solchen Anlagenkomponente muss besonders auf das Gewicht aller verwendeten Bauteile geachtet werden. Dies kann zu nicht unbedeutenden Kosten führen. Allerdings zeigt ein Blick auf bereits sehr viel weiter entwickelte ähnliche Kraftwerkssysteme das enorme Potential dieser Lösung auf. Alle im Rahmen von [9] bekannten Fesseldrachen-Flugwind-Systeme arbeiten mit einer Technik die diesem Prinzip der Steuerkonsole folgt.

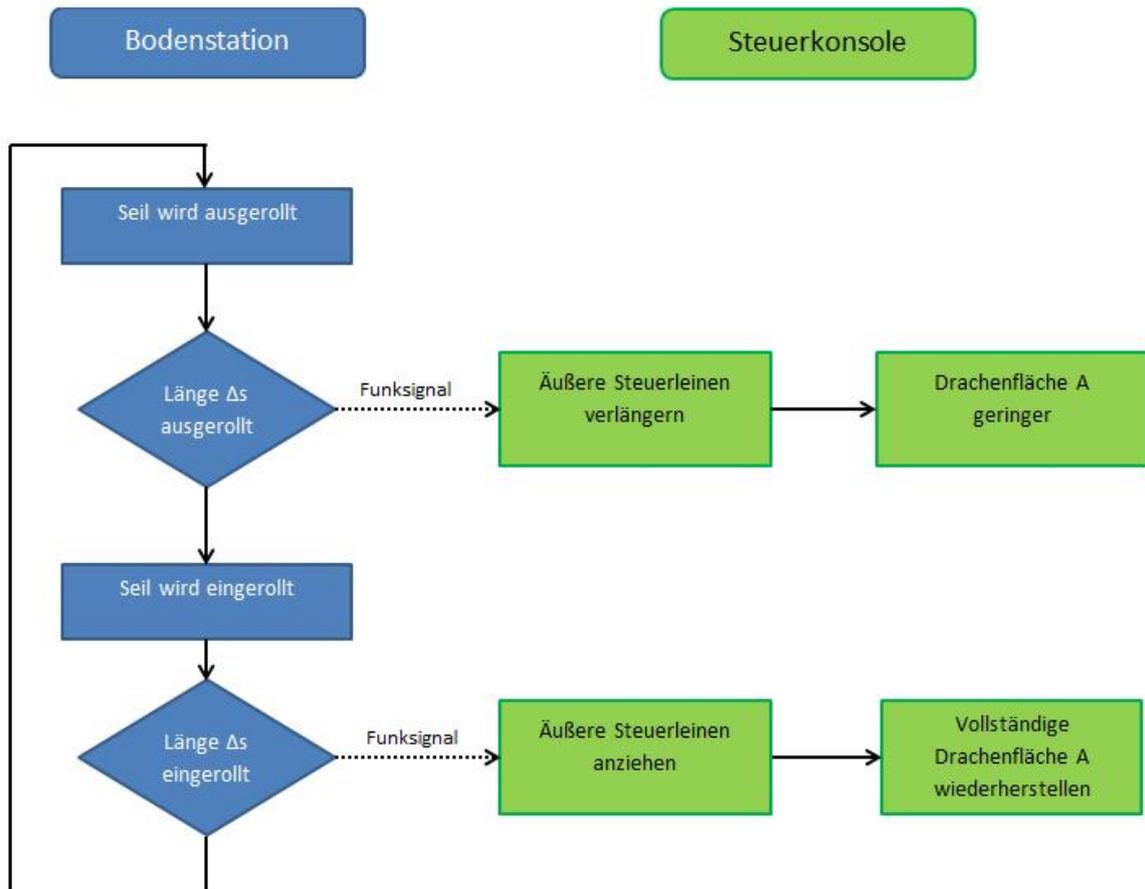


Abbildung 6.2: Ablaufdiagramm der Steuerung

# 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Verdeutlichung des Funktionsprinzips der Energieerzeugung mit Flugwindkraftwerken nach dem Fesseldrachenprinzip und zu Schulungszwecken wurde ein Animationsfilm erstellt. Zur Vervollständigung der Entwicklungsunterlagen von M. Franetzki wurde ein Schaltplan nach Norm der elektrotechnischen Komponenten der aktuellen Bodenstation angefertigt. Es wurden mehrere Flugversuche zur Betrachtung der Rückholphase durchgeführt und die Seilkraft bei verschiedenen Flugmanövern experimentell ermittelt. Die so gewonnenen Daten zeigen eine, unter Berücksichtigungen aller Unbekannten und Ungenauigkeiten im Verfahren, große Übereinstimmung mit den zuvor theoretisch berechneten Werten auf.

Die Reduzierung des Drachenwiderstands durch eine Veränderung des Anstellwinkels hat sich als nicht praxistauglich erwiesen und kann für die weitere Entwicklung ausgeschlossen werden. Durch eine Reduzierung der längs angeströmten Drachenfläche wird ein Zurückholen mit geringerem Energieaufwand möglich. Ein fließender Übergang der Rückhol- in die Ausziehphase und andersrum ist für den Kraftwerksbetrieb unerlässlich. Dies kann durch eines der in Abschnitt 6 vorgestellten Konzepte erreicht werden.

## Nächste Schritte

Die Realisierbarkeit einer Steuerkonsole mit den zur Verfügung stehenden technischen und finanziellen Mitteln sollte zunächst überprüft werden. Parallel dazu ist eine Weiterentwicklung der technisch sehr viel einfacheren Magnetverbindung sinnvoll. Hier müssen weitere Versuche folgen, um die zum Lösen der Magnetverbindung nötige Kraft zu ermitteln und zum Überprüfen welche Kraft der Ruck am Ende des Ausziehvorgangs ausüben kann. Sollte dieser Ruck, durch den bloßen Stop des Ausrollvorgangs nicht ausreichen, muss über zusätzliche Maßnahmen nachgedacht werden um diesen Impuls zu vergrößern. Des weitern sollte der Energiebedarf der Steuerkonsole abgeschätzt werden. Denn nur wenn dieser relativ gering ist, macht es Sinn diese Idee weiter zu verfolgen.

# 8 Anhang

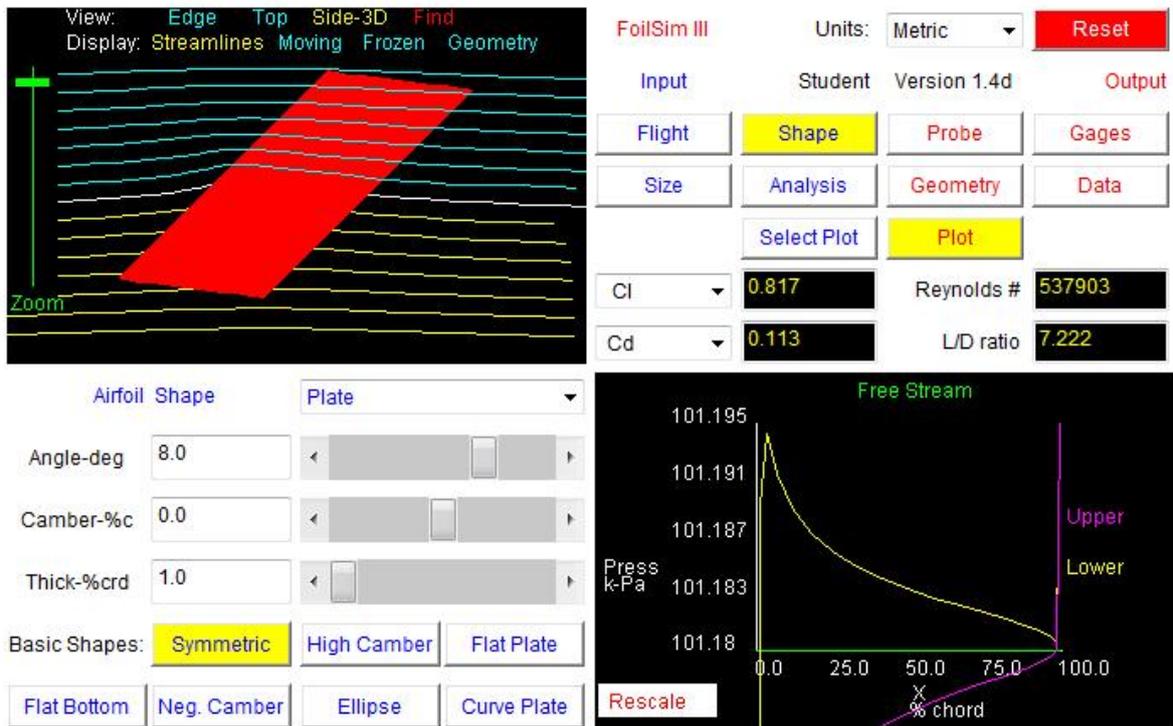


Abbildung 8.1: Beiwertermittlung für Berechnung (5.1) und (5.2) [3]

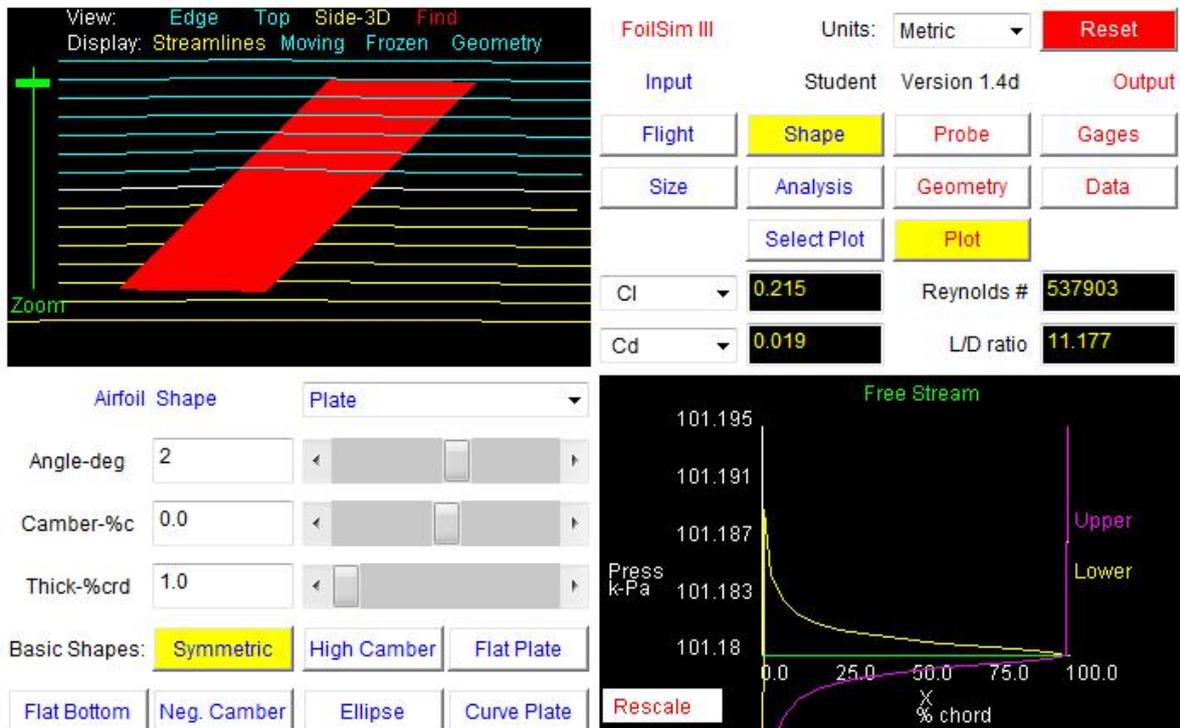


Abbildung 8.2: Beiwertermittlung für Berechnung (5.5) und (5.6) [3]

# Literaturverzeichnis

- [1] Tom Benson. NASA: Beginner's Guide to Kites. *www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/bgk.html*, Einsichtnahme: Januar, 2013.
- [2] Diehl Moritz; Houska Boris. Windenergienutzung mit schnell fliegenden Flugdrachen: eine Herausforderung für die Optimierung und Regelung. *Automatisierungstechnik*, Oktober:525–533, 2009.
- [3] NASA Glenn Research Center. FoilSim III; Version 1.4d. *Software Download: www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/FoilSim/index.html*, Einsichtnahme: Februar, 2013.
- [4] Die UN Milleniumkampagne Deutschland. Die Milleniumsziele. *www.un-kampagne.de*, Einsichtnahme: Januar, 2013.
- [5] Hausmann Felix. Nachhaltige Energiesysteme, Windenergie. *Vorlesungsskript, DHBW Mannheim*, WS 2012/13.
- [6] Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung. Energie. *www.bmz.de/de/was\_wir\_machen/themen/energie/*, Einsichtnahme: Januar, 2013.
- [7] Siegmann Hartmut. Windstärke. *http://www.aerodesign.de/aero/beaufort.htm*, Einsichtnahme: Februar, 2013.
- [8] Sigloch Herbert. Technische Fluidmechanik. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2012.
- [9] Hauer Katharina. Flugwindkraftwerke, Studienarbeit. *DHBW Mannheim*, Januar, 2013.
- [10] Franetzki Manfred. Drachen. *www.ibfranetzki.de*, Einsichtnahme: Januar, 2013.
- [11] Kunsch Holger; Schröder Michael. Experimente zur Windenergie. *Windtrainer Junior*, 06:12, 2009.

- [12] Kunstdrachenverlag Kite n Art. Trimmung von Einleinern. [www.kunstdrachen.de/tipps-service/windige-tipps/notfallhilfe-trimmung.php](http://www.kunstdrachen.de/tipps-service/windige-tipps/notfallhilfe-trimmung.php),  
Einsichtnahme: Februar, 2013.
- [13] Hofmann Friedbert R. Fluidische Systeme. *Vorlesungsskript, DHBW Mannheim*,  
WS 2012/13.
- [14] Deutscher Wetterdienst. Wetterlexikon: Beaufort-Skala. [www.deutscherwetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=B&DAT=Beaufort-Skala](http://www.deutscherwetterdienst.de/lexikon/index.htm?ID=B&DAT=Beaufort-Skala),  
Einsichtnahme: Februar, 2013.