

Entwicklung eines Windkraftwerkes mit Segel am Mast

STUDIENARBEIT

des Studienganges Maschinenbau
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Mannheim

von

Marco Hafner und Thomas Sedlmayr

Abgabedatum: 13.01.2014



Bearbeitungszeitraum: 30.09.2013 – 13.01.2014
Matrikelnummer, Kurs: 4735026 (Hafner, TMB11GKE-SE),
7536085 (Sedlmayr, TMB11HKE-PE)
Ausbildungsbetrieb: ANDRITZ KMPT GmbH (Hafner),
KraussMaffei Technologies GmbH
(Sedlmayr)
Betreuer der Dualen Hochschule: Manfred Franetzki

Ehrenwörtliche Erklärung

Erklärung

gemäß § 5 (2) der „Studien- und Prüfungsordnung DHBW Technik“ vom xxx

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

Ort, Datum

Unterschrift

Ort, Datum

Unterschrift

Abstract

There's a need of a new generation in power plant technology to ensure the constantly increasing energy demand of a growing human population in an economic and friendly way. One great possibility for this problem are wind energy systems which works with sails. These sails are connected with a chain. While they are moving up respectively down on a pylon which was ensured with three ropes out of steel with the ground, because of buoyant force, the chain boosts a generator. There has already been a prototype of this innovative power plant which was designed and constructed by Dr. Manfred Franetzki.

However, the problem with this prototype is that the sails are either too heavy and overdesigned or too light and undersized.

A further problem consists in the reversal point. The sail will crash the fence at the reversal points if the wind is too strong and so it may be damaged.

Because of this the following project is about a reconstruction of the prototype. In addition improvements for the energy generating is shown.

The first chapter deals with the emergence of winds and the general thesis for such a power plant followed by the redevelopment of the sails and the tilt mechanism. At the end there are a shown a few possibilities for the controlling of this power plant.

The material which should be used for the sail is bamboo because it's very tough and stiff. An electric motor supports the sail at the reversal points if the wind is too weak while a spring decelerates the sails if the wind is too strong.

When the sail was assembled the first problems started. Because bamboo is a natural growing product it has different measures at both ends. Second problem was that the sail had to be stabilized with ropes out of steel so that the whole frame is intrinsically stiff. With these alternations the power plant can be assembled and established on a windy location.

Because of the relative simple technical requirement this power plant can also be assembled in developing nations or may build by themselves. There are still developing needs but the first application to produce electricity is guaranteed.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	III
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik.....	2
2.1 Theorie der Aerodynamik.....	2
2.1.1 Entstehung des Windes.....	2
2.1.2 Einfluss des Geländeprofiles auf den Wind	10
2.1.3 Windenergienutzung.....	13
2.1.4 Widerstandsläufer.....	14
2.1.5 Kraftwerke nach Auftriebsprinzip	17
2.2 Prototyp eines Auftriebskörperkraftwerks.....	19
3 Problematik und daraus resultierende Aufgabenstellung.....	25
4 Segel	27
4.1 Anforderungen an das Segel	28
4.2 Bewertung der Teillösungen mit Hilfe der VDI 2225 Methode.....	28
4.3 Bambusrahmen.....	30
4.4 Berechnung der Kräfte auf das Segel	32
4.5 Auslegung des Rahmen.....	37
5 Kippmechanismus	42
5.1 Anforderungen an den Kippmechanismus	42
5.2 Bewertung verschiedener Teillösungen mittels eines Morphologischen Kastens.....	42
5.3 Auswahl eines passenden Elektromotors	44
6 Speichern der Energie am Umkehrpunkt.....	49

7	Steuerung	51
7.1	Steuerungstechnische Überlegungen	51
7.2	Praktische Umsetzung mittels Schützschtung.....	54
8	Ansätze zur Leistungsoptimierung	56
9	Statik des Segelkraftwerks.....	60
9.1	Betriebszustand	61
9.2	Stillstand	64
10	Montageanleitung	65
11	Zusammenfassung und Ausblick	68
	Literaturverzeichnis	XI
	Anhang	XIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Coriolis-Effekt nach [10, S.684].....	5
Abbildung 2: Auswirkung der Corioliskraft auf den Wind nach [7].....	5
Abbildung 3: Satellitenbild eines Tiefdruckgebiets über Island [7].....	6
Abbildung 4: globale Luftzirkulationssysteme [8].....	7
Abbildung 5: See-Land Winde [6].....	8
Abbildung 6: Berg-Tal Winde [6]	9
Abbildung 7: Katabatische Winde nach [9].....	9
Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil über die Höhe des Windes [3, S10]	10
Abbildung 9: vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung bei Bezugshöhe 40 m [2, S57].....	12
Abbildung 10: Einfluss eines Hindernisses [2, S.58]	13
Abbildung 11: Skizze eines Widerstandsläufers.....	15
Abbildung 12: Kräfte auf einen Widerstandsläufer	16
Abbildung 13: Entstehung des Auftriebs [4, S.292]	17
Abbildung 14: Druckverlauf um ein Flügelprofil [2, S.11].....	18
Abbildung 15: Geschwindigkeitsdreieck.....	19
Abbildung 16: Prinzip eines Aufwindkraftwerks [15].....	21
Abbildung 17: Bodenplatte mit Heringen und Drehgelenk [15].....	22
Abbildung 18: Richtgetriebe [15]	23
Abbildung 19: Laufkatze mit Befestigung an einer Kette (rechte Seite) [15]	24
Abbildung 20: Windkraftwerk mit Segel am Mast (Prototyp) [15]	27
Abbildung 21: Skizze des Segelrahmens mit Katze	31
Abbildung 22: Kräfteverlauf im Segel	32
Abbildung 23: Polardiagramm nach LILIENTHAL [4, S.297]	33
Abbildung 24: Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit des Anstellwinkels [14, S.106]....	35

Abbildung 25: Angeströmtes Segel	37
Abbildung 26: Skizze des statischen Systems	38
Abbildung 27: Querschnitt und statisches System des Aluminiumprofils	41
Abbildung 28: Angeflanschter Motor am Masten.....	45
Abbildung 29: Momente auf das Segel infolge der Windkraft.....	46
Abbildung 30: Geometrie um den Drehpunkt mit angreifenden Kräften	47
Abbildung 31: Schematische Anordnung von Kontakten zur Motorsteuerung	52
Abbildung 32: Ablaufplan des Motors.....	53
Abbildung 33: Vereinfachter Schaltplan	54
Abbildung 34: Motorsteuerung mittels Zeitschütz.....	55
Abbildung 35: Prüfung der Schaltung an einer Steckwand im Labor	56
Abbildung 36: Angreifende Kräfte an der Katze	58
Abbildung 37: Geometrische Beziehung	62
Abbildung 38: Statisches System zur Berechnung der maximalen Zugkraft im Stahlseil	64
Abbildung 39: Eckstück mit Bambus verschraubt	66
Abbildung 40: Segel im nicht verspannten Zustand	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft in der Troposphäre [4, S.75]	3
Tabelle 2: Rauigkeitslänge nach Davenport [3, S.9]	11
Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren für das Segel.....	29
Tabelle 4: VDI-Punkteskala für das Segel.....	30
Tabelle 5: Lösungsbewertung für das Segel	30
Tabelle 6: Gewichtung der einzelnen Kriterien.....	43
Tabelle 7: Punkteskala nach VDI 2225	43
Tabelle 8: Bewertung der Teillösung mithilfe Gewichtungsfaktoren	44
Tabelle 9: Versuchsreihe Magnetkraftermittlung	47
Tabelle 10: Gewichtung der einzelnen Bewertungsfaktoren	50
Tabelle 11: Punkteskala nach VDI 2225	50
Tabelle 12: Bewertung der einzelnen Teillösungen.....	51

1 Einleitung

Die Windkraft ist eine der ältesten Energiequellen, die der Mensch für seine Zwecke nutzt. Bereits vor 4000 Jahren bereisten die Menschen Seen und Meere, indem sie mit Hilfe von Segeln den Wind zur Vorwärtsbewegung des Schiffes einsetzten. Es wurden aber auch die ersten Vorgänger von Windmühlen entwickelt. Die windbetriebenen Schöpf- und Mahlwerke der damaligen Zeit nutzten den Strömungswiderstand des Windes auf die Rotorblätter um Rotationsenergie zu erzeugen. Erst seit dem 12. Jahrhundert gibt es die Windmühlen wie wir sie heute kennen. Sie nutzen die Auftriebskraft des Windes, wodurch die Windnutzung deutlich effektiver wurde. Mit dieser Technologie war es möglich auch Menschen fernab von Flüssen die Arbeit und das Leben zu erleichtern, wodurch die Windkraft einen hohen Stellenwert erhielt.

Mit der Erfindung neuer Energiequellen und der Erschließung neuer fossiler Energieträgern verlor die Windenergie jedoch zunehmend an Wichtigkeit. Durch die ständige Weiterentwicklung der neuen Technologien und die damit einhergehende Unabhängigkeit des Menschen von den natürlichen Energiequellen der Erde, kam es dazu, dass die Windkraft nahezu vollständig verdrängt wurde.

Erst mit dem zunehmenden Bewusstsein der Menschen für die Umwelt und dem Wissen über die zur Neige gehenden Vorräte an fossilen Energieträgern, kam es gegen Ende des 20. Jahrhunderts zu einer Widergeburt der regenerativen Energiequellen und somit auch der Windkraft. Seit dem wird - besonders in Deutschland - intensiv geforscht um neue und effektivere Windkraftanlagen zur Energiegewinnung zu entwickeln. So gibt es neben dem Windrad, welches sich an der Idee der früheren Windmühlen anlehnt, auch weitere, alternative Ansätze zur Nutzung des Windes für die Stromerzeugung.

Eine Möglichkeit der Energiegewinnung ist der von Herrn Dr. Manfred Franetzki entwickelte Prototyp einer Windkraftanlage, die durch ein auf- und ablaufendes Segel an einem Mast einen Generator antreibt und somit Strom erzeugt. In der vorliegenden Arbeit wird die Funktionsweise dieser alternativen Windanlage genauer beschrieben. Weiter wird das bestehende Konzept weiterentwickelt, mit dem Ziel die Funktion der Anlage zu optimieren und zu verbessern. [1]

2 Stand der Technik

2.1 Theorie der Aerodynamik

(Verfasst von Marco Hafner)

Die Aerodynamik ist ein Teilgebiet der Fluidodynamik. Sie befasst sich mit der Darstellung und Berechnung von kompressiblen Fluidströmungen, die um einen festen Körper strömen. Im Bereich der Aerodynamik haben sich mit der Zeit mehrere Untergebiete gebildet. So entstanden Spezialgebiete wie die Raumfahrtaerodynamik, die Grenzschichttheorie, die Überschall- und Hyperschallaerodynamik und die Tragflügeltheorie. Die Tragflügeltheorie beschäftigt sich mit den Kräfte auf einen Tragflügel, der sich durch ein Gas bewegt, oder der von einem Gas angeströmt wird. Üblicher Weise handelt es sich bei dem Gas um Luft.

2.1.1 Entstehung des Windes

Damit Wind überhaupt entstehen kann muss es zunächst einmal eine Atmosphäre geben. Sie umhüllt den Planeten wie ein viele Kilometer dicker Mantel und wird nur durch die Gravitationskraft bei der Erde gehalten. Der für das Wetter der Erde verantwortliche Bereich der Atmosphäre wird Troposphäre genannt. Sie erstreckt sich bis ca. 11 km Höhe. In diesem Bereich befindet sich auch etwa dreiviertel der Masse der Atmosphäre.

Die Atmosphäre ist ein Gemisch vieler verschiedener Gase und Dämpfe. Im Bereich der Troposphäre ist die Zusammensetzung des Gasgemisches (siehe Tabelle 1), welches als Luft bezeichnet wird, als konstant anzusehen.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft in der Troposphäre [4, S.75]

Gas	chemische Formel	Raumanteile in Volumenprozenten
Stickstoff	N ₂	78,08
Sauerstoff	O ₂	20,95
Argon	Ar	0,93
Kohlendioxid	CO ₂	0,04
Wasserstoff	H ₂	0,01
Neon	Ne	0,0018
Helium	He	0,005
Krypton	Kr	0,0001
Sonstige		0,028

Neben den aufgelisteten Bestandteilen der Luft sind auch noch Spuren von Kohlenwasserstoffen, Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Ozon usw. zu finden. Wasserdampf, welcher maßgeblich für die Entstehung des Wetters verantwortlich ist, ist stark schwankend bis maximal 4 Volumenprozent in der Luft enthalten.

Als Wind werden alle Luftströme und Luftbewegungen bezeichnet, die auf der Erde stattfinden. Es handelt sich dabei um einen räumlichen Austausch bzw. eine räumliche Bewegung von Luftmassen um Druckdifferenzen in der Atmosphäre auszugleichen.

Verantwortlich für die Druckunterschiede in der Luft ist die ungleichmäßige Aufheizung der Erdatmosphäre. Die aufgewärmte Luft dehnt sich aus, wodurch die Dichte geringer wird. Da der Druck direkt proportional zur Dichte ist, fällt somit auch der Druck. Es bildet sich ein Tiefdruckgebiet. Zwischen Gebieten mit warmer Luft und Gebieten mit kalter Luft (Hochdruckgebiet) entsteht somit ein Druckgefälle.

Nun kommt der Effekt des Auftriebs hinzu, demzufolge Fluide und Stoffe mit geringerer Dichte als ihre Umgebung aufsteigen. Dadurch steigt die warme Luft von der Erdoberfläche auf. Vom Hochdruckgebiet drückt die kalte Luft erdnah in das Tiefdruckgebiet und erwärmt sich. Gleichzeitig strömt die warme Luft in einer höheren Atmosphärenschicht Richtung Hochdruckgebiet, wo sie sich abkühlt und deshalb wieder absinkt.

Die unterschiedlichen Temperaturverteilungen in der Luft hängen von verschiedenen Aspekten ab. Zum einen ist die Sonneneinstrahlung nicht gleichmäßig über die Erdoberfläche verteilt. Im Äquatorbereich treffen die Sonnenstrahlen deutlich steiler auf die Erde als an den Polarkappen. Dadurch kommt es am Äquator zu einer deutlich stärkeren Erwärmung der Atmosphäre als an den Polen. Dazu kommt die Drehung der Erde, welche verhindert, dass die sonnenabgewandte Erdhälfte erwärmt wird im Gegensatz zur Anderen. Ein weiterer Aspekt ist der enthaltene Anteil an Wasserdampf in der Atmosphäre. Er erlauben es, dass die kurzwelligeren Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre eintreten können. Gleichzeitig verhindern sie das Austreten der Infrarotstrahlung, die von der Erde ausgesandt wird. Durch regional schwankende Anteile an Wasserdampf in der Luft kommt es somit zu unterschiedlich starken Treibhauseffekten. Ein letzter Punkt sind die variierenden Wärmekapazitäten der Erdoberfläche, welche durch unterschiedlich starke und schnelle Abgabe, bzw. Aufnahme von Wärme die Temperatur der Umgebung beeinflusst.

Eine weitere Einflussgröße, die bei der Entstehung bzw. der Richtung des Windes eine Rolle spielt ist die Corioliskraft. Sie ist eine Schein- oder Trägheitskraft, die zusätzlich zur Zentrifugalkraft wirkt. Zur Erklärung der Corioliskraft betrachten wir eine rotierende Scheibe, in deren Mitte ein Schütze steht und auf eine mit rotierende Zielscheibe schießt (siehe Abbildung 1). Für einen raumfesten Beobachter (linkes Bild) wird sich die Kugel auf einer geradlinigen Bahn vom Schützen wegbewegen. Für den Schützen selber jedoch (rechtes Bild) beschreibt die Kugel eine gekrümmte Flugbahn. Dieser Effekt, der auf einer rotierenden Scheibe beobachtet werden kann, tritt auch auf der Erde für jede Bewegung in horizontaler Ebene auf. Dabei wirkt die Corioliskraft immer senkrecht zur Bewegungsrichtung der Masse.

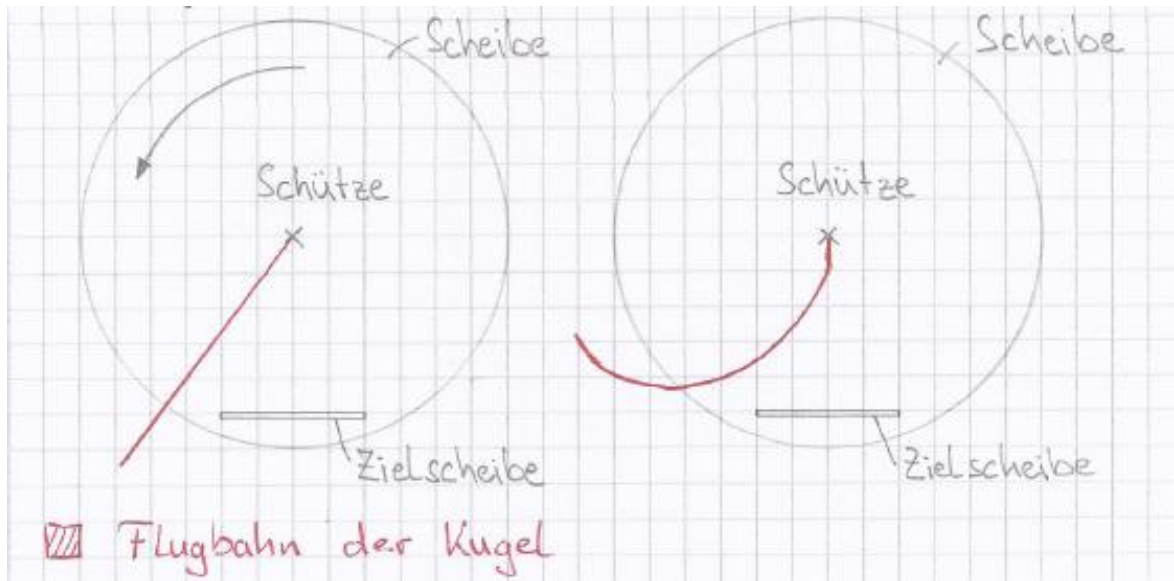


Abbildung 1: Coriolis-Effekt nach [10, S.684]

Für den Wind bedeutet dies, dass er von seiner geradlinigen Bewegung vom Hochdruckgebiet in das Tiefdruckgebiet nach rechts abgelenkt wird auf eine Kreisbahn um das Tiefdruckgebiet (siehe Abbildung 2).

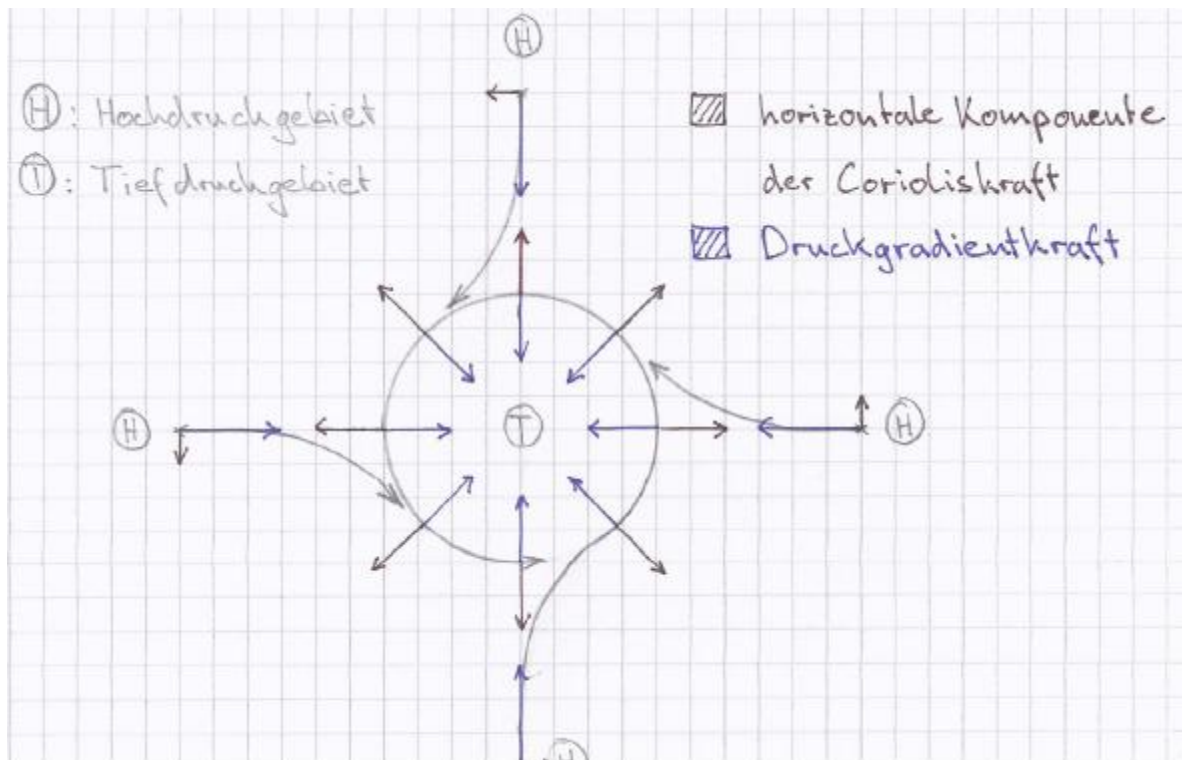


Abbildung 2: Auswirkung der Corioliskraft auf den Wind nach [7]

Die Folge ist, dass auf der Nordhalbkugel der Wind vom Hochdruckgebiet spiralförmig gegen den Uhrzeigersinn in das Tiefdruckgebiet strömt (siehe Abbildung 3). Auf der Südhalbkugel kehrt sich der Coriolis-Effekt um. Der Wind

wird nach links abgelenkt und somit strömt die Luft im Uhrzeigersinn ins Tiefdruckgebiet. Dieser Effekt ist bei jedem Wind auf der Erde mehr oder weniger stark zusehen.

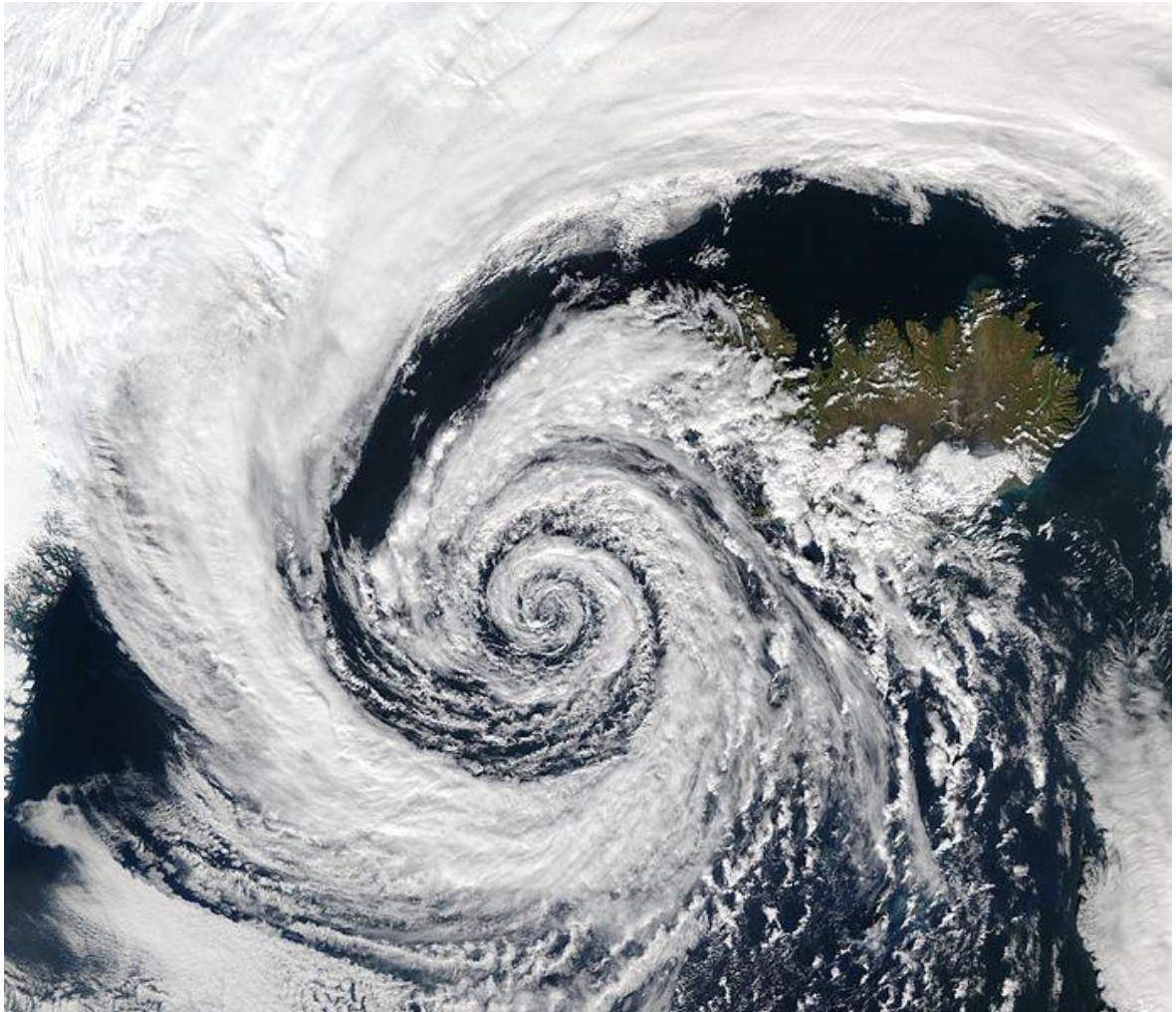


Abbildung 3: Satellitenbild eines Tiefdruckgebiets über Island [7]

Die Winde der Erde werden in lokale und globale Zirkulationen unterschieden. Die globalen Zirkulationen, auch planetarische Zirkulationen genannt, sind planetenübergreifende Winde. Sie entstehen durch die unterschiedlich starke Erwärmung der Erde am Äquator im Gegensatz zu den Polen aufgrund des Einstrahlwinkels der Sonne. Stark vereinfacht aber für eine grundlegende Betrachtung ausreichend, können die globalen Strömungen der Erde in drei große Zirkulationszellen für jede Halbkugel unterteilt werden (siehe Abbildung 4). In die Hadley Zelle, die Ferrel Zelle und die Polare Zelle. Sie umspannen die Erde wie Ringe, die am Äquator, am 30ten und 60ten Breiten Grad durch entsprechende Hoch- oder Tiefdruckgebiete unterteilt werden.

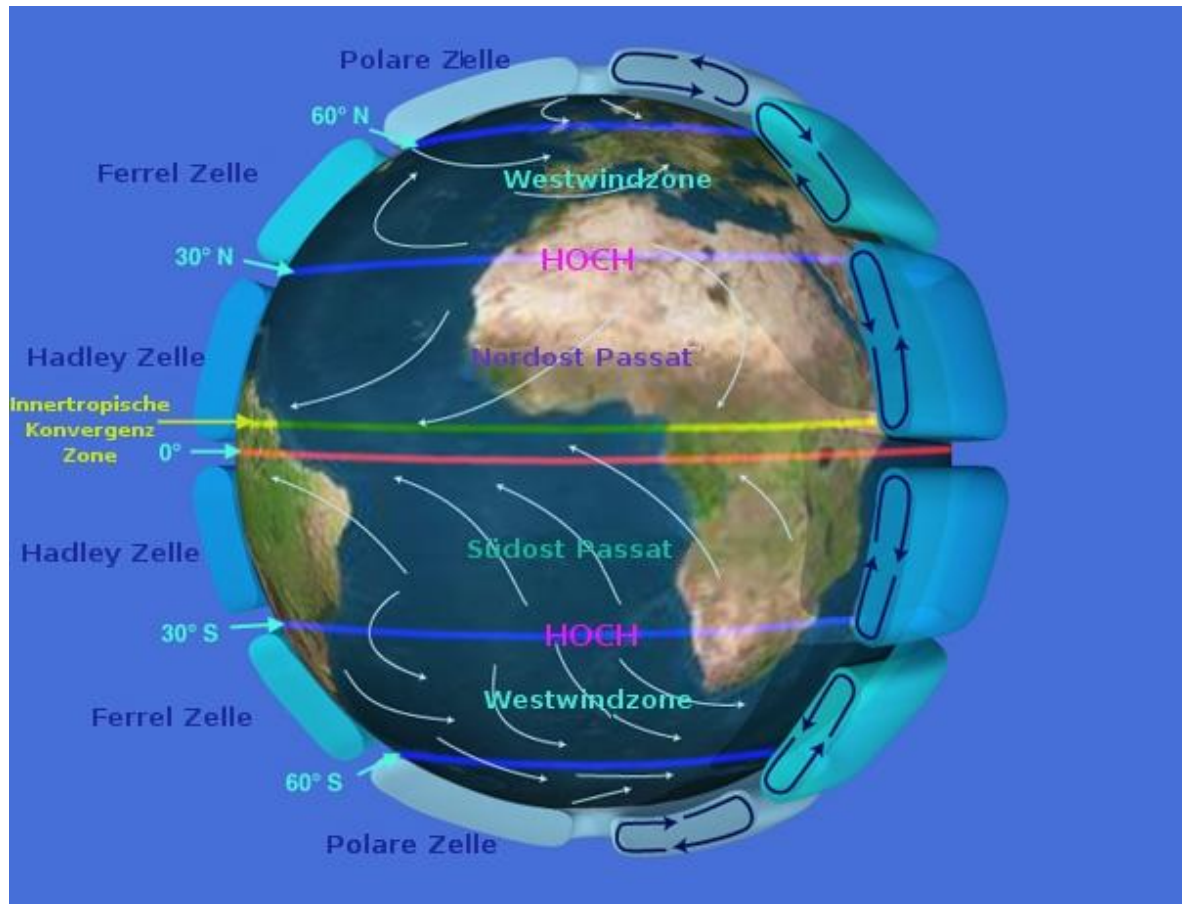


Abbildung 4: globale Luftzirkulationssysteme [8]

Die lokalen Zirkulationen sind im Gegensatz zu den globalen Winden sehr klein mit nur "regionaler Ausdehnung". Sie bilden sich stark abhängig von der Luftfeuchtigkeit, der Beschaffenheit der Erdoberfläche und vom Tag-Nacht-Wechsel. Die bekanntesten lokalen Windzirkulationen sind die See-Land (siehe Abbildung 5) und Berg-Tal Winde (siehe Abbildung 6), die katabatischen Winde (siehe Abbildung 7) und die Gradientenwinde. Bei den Gradientenwinden dominiert die Corioliskraft (siehe Abbildung 3).

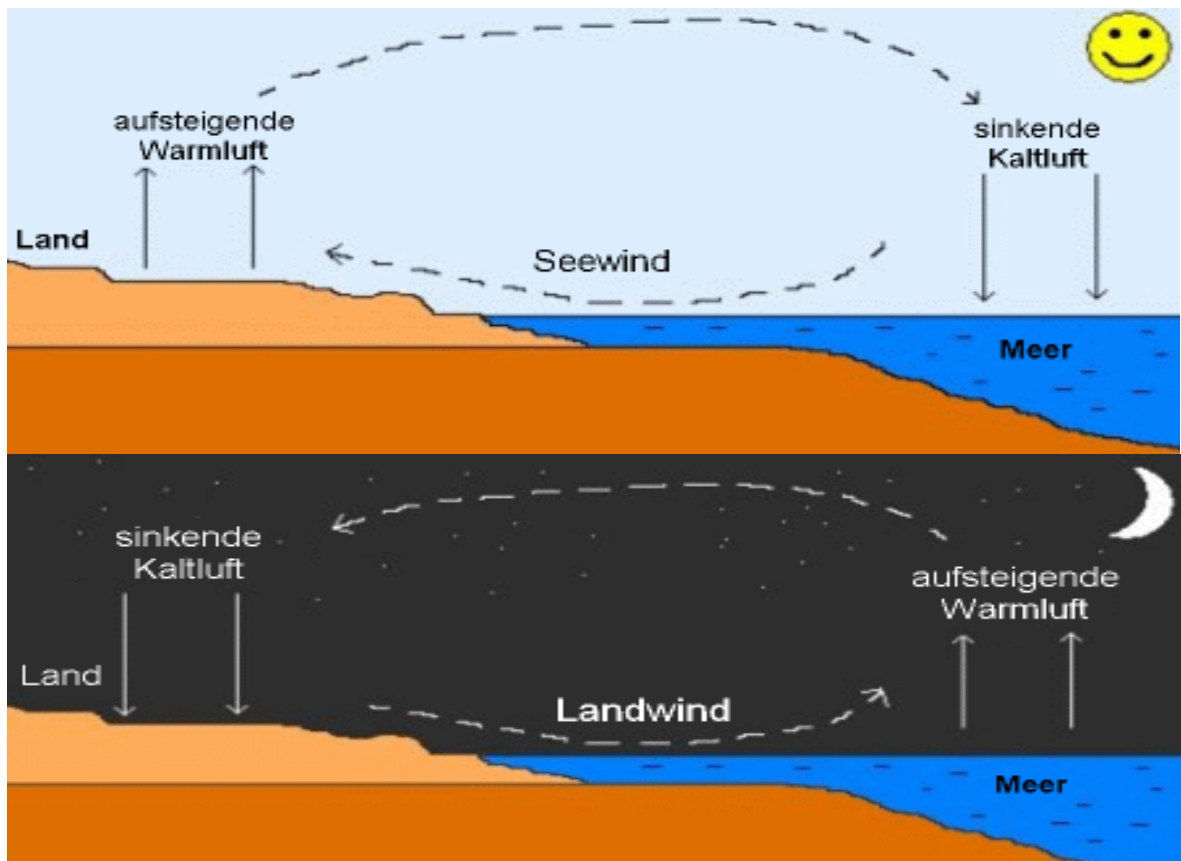


Abbildung 5: See-Land Winde [6]

Bei den See-Land Winden sind die unterschiedlichen Wärmekapazitäten von Festland und Wasser ausschlaggebend. Tagsüber erhitzt sich das Land, aufgrund der geringen Wärmespeicherfähigkeit, sehr schnell im Gegensatz zum Wasser. Dadurch ist die Luft über dem Land wärmer als die Luft über dem Wasser, was zu einem Seewind führt. Nachts, wenn das Land nicht mehr durch die Sonne erwärmt wird, kühlt dieses im Umkehrschluss auch wieder sehr schnell aus und gibt die Wärme in kürzester Zeit an die Umgebung ab. Das Wasser, das über den Tag viel mehr Wärme gespeichert hat, gibt die ganze Nacht hindurch seine Energie an die Luft darüber ab. Dadurch kommt es zu einer Drehung der Windrichtung und es bläst ein Landwind.



Abbildung 6: Berg-Tal Winde [6]

Die Berg-Tal Winde entstehen durch das Aufsteigen bzw. Absinken von warmer bzw. kalter Luft. Tagsüber erwärmt sich die Luft an den Berghängen stärker, die dadurch aufsteigt und somit einen Luft Strom erzeugt, der vom Tal zum Berg gerichtet ist. Bei Nacht verhält es sich umgekehrt. Die Luft an den Berghängen kühlt schneller aus als im Tal. Durch die größere Dichte der Luft sinkt diese ab und bewegt sich ins Tal. Der Wind bläst vom Berg ins Tal.

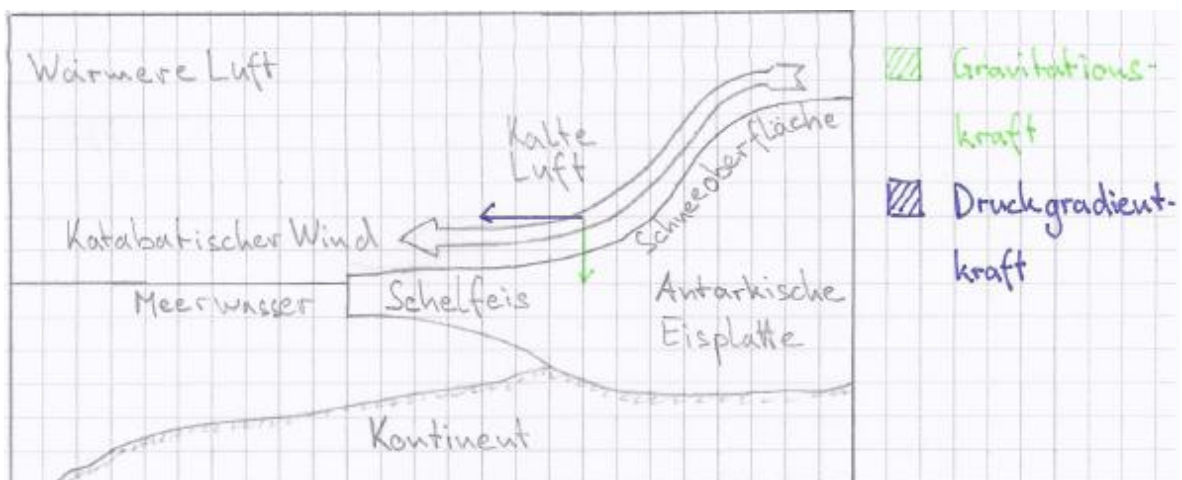


Abbildung 7: Katabatische Winde nach [9]

Die katabatischen Winde, auch Fallwinde genannt, treten hauptsächlich in den Polarregionen auf. Die Luft über dem Eis wird abgekühlt. Über dem Meer befindet sich wärmere Luft. Dadurch entsteht eine Druckgradientenkraft. Durch den Höhenunterschied zwischen der Schneoberfläche und dem Meeresspiegel, der bis zu mehrere Kilometer betragen kann, wirkt auf die kalte Luft zusätzlich noch die Gravitationskraft. Der daraus entstehende Wind hat sehr hohe Geschwindigkeiten und ist unter anderem dafür verantwortlich, dass sich über dem Meerwasser Schelfeis bildet. [2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

2.1.2 Einfluss des Geländeprofiles auf den Wind

Die Geschwindigkeit bzw. Stärke des Windes ist abhängig von der Größe des Druckunterschieds, der zwischen dem Hoch- und Tiefdruckgebiet herrscht. Diese ungestörten Windströmungen treten jedoch nur in großen Höhen auf, wo der Einfluss der Erdoberfläche nicht zu spüren ist. Mit zunehmender Nähe zum Boden wird der Wind durch die "Rauheit" des Erdbodens abgebremst und verwirbelt. Dadurch entsteht eine ungleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung, bei der die Windgeschwindigkeit in Bodennähe auf null abfällt. Durch Hindernisse wie Bäume, Sträucher, Gebäude usw. kommt es bei zunehmender Nähe zum Boden zu starken Turbulenzen des Windes (siehe Abbildung 8).

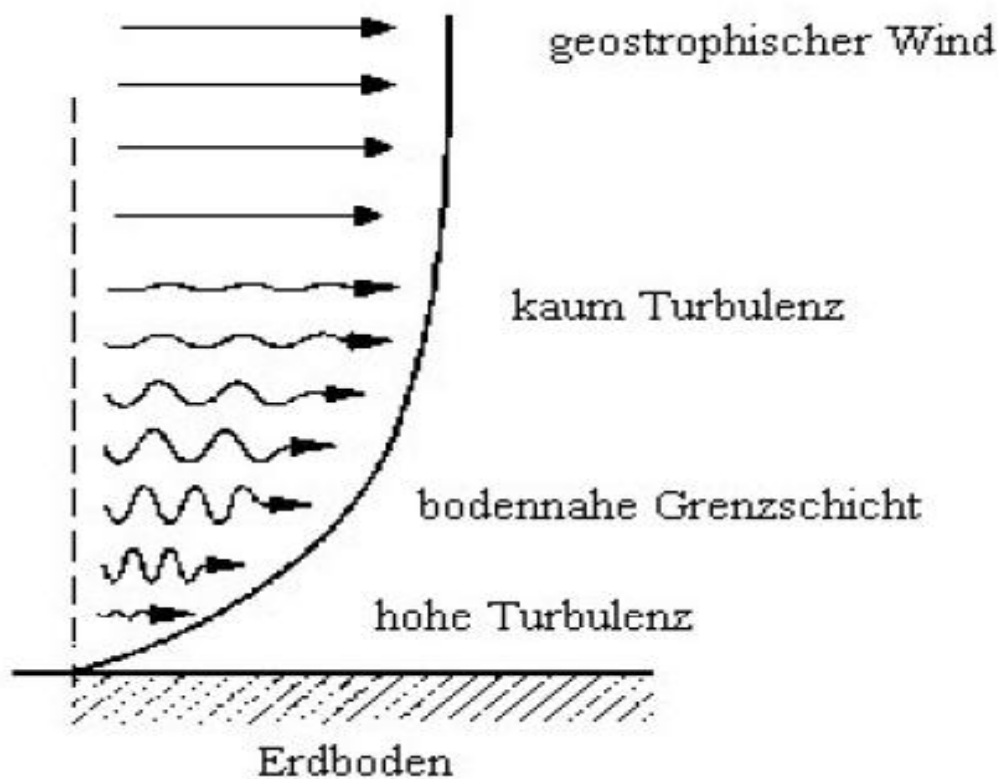


Abbildung 8: Geschwindigkeitsprofil über die Höhe des Windes [3, S10]

Der in Abbildung 8 dargestellte Bereich des ungestörten geostrophischen Windes beginnt in einer Höhe von ca. 300 m bis 1000 m Höhe. Der genaue Übergang ist schwer zu bestimmen, da er von Faktoren wie Wetterlage, Bodenrauigkeit und Topographie abhängt.

Die Rauigkeit des Geländeprofiles kann durch die Rauigkeitslänge oder Rauigkeitshöhe Z_0 ausgedrückt werden. Sie gibt an, bei welcher Höhe die

Windgeschwindigkeit gleich Null wird. In Tabelle 2 sind Rauigkeitslängen für verschiedenen Geländeklassen nach Davenport mit der jeweiligen Oberflächenbeschreibung angegeben.

Tabelle 2: Rauigkeitslänge nach Davenport [3, S.9]

Geländeklasse nach Davenport	Rauigkeitslänge Z_0	Oberflächenbeschreibung
1 – See	0,0002 m	offene See
2 - glatt	0,005 m	Wattgebiete
3 - offen	0,03 m	offenes, flaches Gelände; Weide
4 - offen bis rauh	0,1 m	landwirtschaftlich genutzte Flächen mit niedrigem Bestand
5 - rauh	0,25 m	landwirtschaftlich genutzte Flächen mit hohem Bestand
6 - sehr rauh	0,5 m	Parklandschaften mit Büschen und Bäumen
7 - geschlossen	1 m	Wälder, Dörfer, Vororte
8 - Stadtkerne	2 m	Zentren von großen Städten

Zur Berechnung der Windgeschwindigkeit $v(h)$ in einer bestimmten Höhe h , kann das logarithmische Gesetz der vertikalen Verteilung der Geschwindigkeiten nach Prandtl angewandt werden. Es gilt speziell für turbulente Grenzschichten und macht sich zur Berechnung der Windgeschwindigkeit die auftretenden Schubspannungen zwischen dem Medium Luft und der Erdoberfläche zu Nutze, welche eine Abbremsung des Windes zur Folge hat.

$$v(h) = \frac{v^*}{k} * \ln\left(\frac{h}{z_0}\right) \quad (2.1)$$

Neben der Rauigkeitslänge z_0 wird die Schubspannungsgeschwindigkeit v^* und die Karmàn-Konstante k benötigt. Die Bestimmung der beiden letzteren Werte ist jedoch in der Praxis schwierig, weshalb auf diese Möglichkeit zur direkten Berechnung der Windgeschwindigkeit verzichtet wird.

Einfacher ist dagegen die Errechnung der Windgeschwindigkeit durch die Bestimmung der relativen Geschwindigkeitsänderung im Bezug auf eine bekannte Referenzgeschwindigkeit $v(h_0)$ in einer Referenzhöhe h_0 .

$$v(h) = v(h_0) * \frac{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_0}{z_0}\right)} \quad (2.2)$$

Das Geschwindigkeitsprofil des Windes ist hierbei nur von der Rauigkeitslänge z_0 abhängig. Zur Verdeutlichung des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeitsprofil und Geländeprofil ist in Abbildung 9 die relative Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Höhe aufgetragen bei unterschiedlichen Rauigkeitslängen.

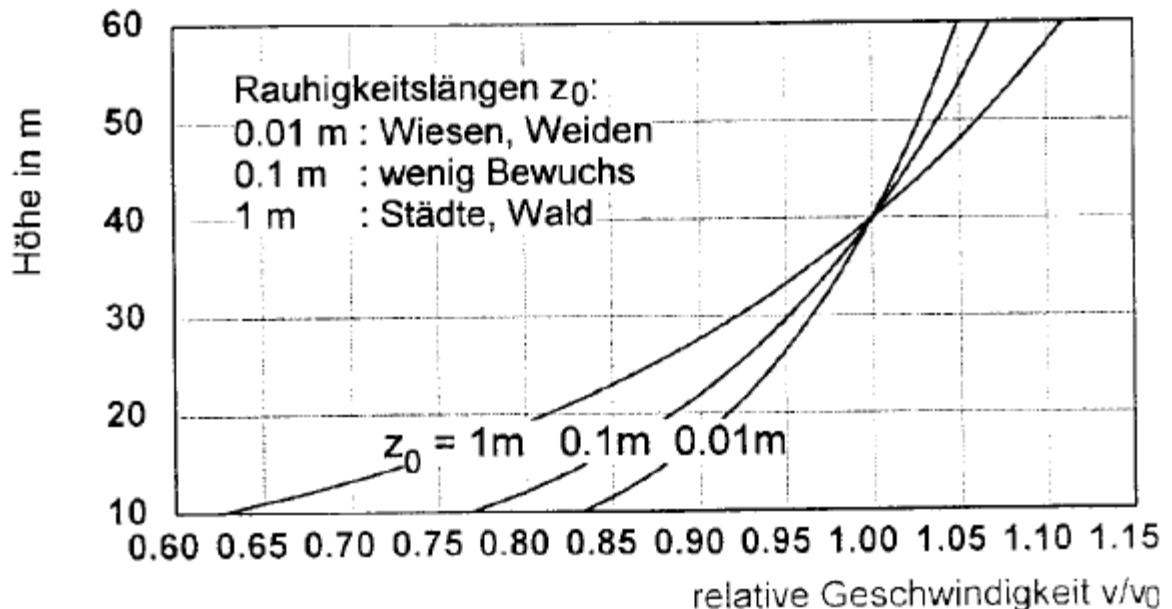


Abbildung 9: vertikale Windgeschwindigkeitsverteilung bei Bezugshöhe 40 m [2, S57]

Bei glatten Oberflächen, wie z.B. die See, erreicht der Wind bereits in wenigen Meter Höhe eine hohe Geschwindigkeit. Bei rauem Gelände, z.B. Wälder, Dörfer oder Großstädte, hingegen erreicht der Wind die gleiche Geschwindigkeit erst in größeren Höhen. Noch dazu ist der Wind in Bodennähe sehr turbulent.

Bisher wurde für das Geschwindigkeitsprofil nur ein gleichmäßiger Erdboden betrachtet. In der Realität ist die Erdoberfläche jedoch ungleichmäßig, d.h. ein offenes flaches Gelände wird oft durch ein Hindernis, wie z.B. ein Wald, ein Hügel, ein Dorf oder ähnliches, unterbrochen und gestört. Die Auswirkungen auf den Wind wurden empirisch ermittelt. Zur Berücksichtigung des Hindernisses kann davon ausgegangen werden, dass der Wind vor dem Hindernis bis zum 5fachen dessen Höhe beeinflusst wird. Nach dem Hindernis reichen die Verwirbelungen bis zur 15fachen Höhe des Hindernisses (siehe Abbildung 10). [2, 3]

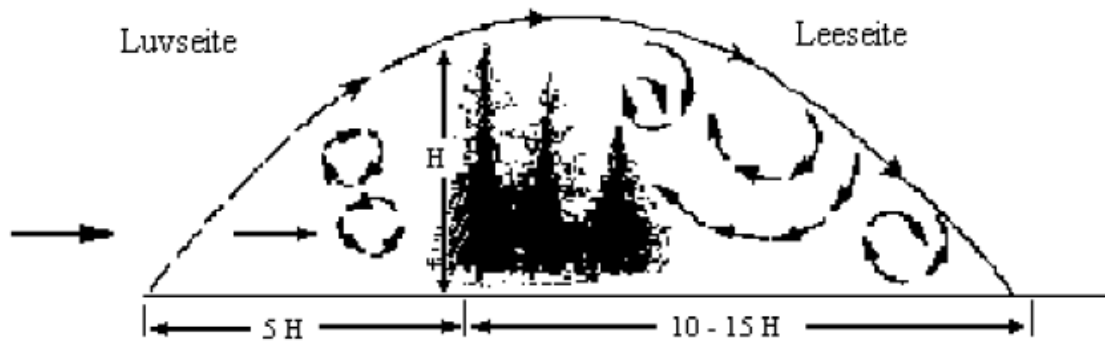


Abbildung 10: Einfluss eines Hindernisses [2, S.58]

2.1.3 Windenergienutzung

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 behandelt, ist Wind die Bewegung von Luftmassen von einem Ort zum Anderen. Die dafür benötigte Energie wird durch die Sonne zugeführt. Nach dem Energieerhaltungssatz, kann diese Energie von einer Erscheinungsform in eine Andere umgewandelt werden. Die für Windkraftanlagen nutzbare Energie des Windes ist seine kinetische Energie E_{kin} .

$$E_{kin} = \frac{1}{2} * m * v^2 \quad (2.3)$$

Betrachten wir einen konstanten Luftmassenstrom \dot{m} , für den gilt:

$$\dot{m} = A * \rho * \frac{dx}{dt} = A * \rho * v \quad (2.4)$$

so kann die Leistung des Windes in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit v dargestellt werden.

$$P = \dot{E} = \frac{1}{2} * \dot{m} * v^2 = \frac{1}{2} * A * \rho * v^3 \quad (2.5)$$

A ist hierbei die Grundfläche des betrachteten Luftvolumenstücks und ρ die Dichte der Luft. Sowohl die Grundfläche als auch die Dichte sind konstant, woraus folgt, dass die Leistung des Windes direkt proportional zur dritten Potenz der mittleren Windgeschwindigkeit ist.

Um die kinetische Energie des Windes nutzbar zu machen, muss diese mit Hilfe einer Windkraftanlage in mechanische Bewegungsenergie umgewandelt werden. Die dabei aus dem Wind entnommene Energie hat nach dem Energieerhaltungssatz zur Folge, dass sich die kinetische Energie der bewegten

Luftmassen verringern muss und somit auch die Leistung, die im Wind enthalten ist.

$$P_{ent} = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} * A_1 * \rho * v_1^3 - \frac{1}{2} * A_2 * \rho * v_2^3 \quad (2.6)$$

Unter Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung

$$\dot{m} = A_1 * \rho * v_1 = A_2 * \rho * v_2 \quad (2.7)$$

folgt für die entnommene Leistung

$$P_{ent} = \frac{1}{2} * \dot{m} * (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.8)$$

Somit ist die entnommene Leistung aus dem Wind nur von der Geschwindigkeitsdifferenz des Windes von vor und nach der Windkraftanlage abhängig. Analog gilt für die entnommene Energie

$$E_{ent} = \frac{1}{2} * m * (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.9)$$

Zur Beurteilung von Windkraftanlagen und geeigneten Standorten zur Windenergienutzung wird die Leistungsdichte des Windes verwendet.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} * \rho * v^3 \quad (2.10)$$

Bei der Wahl eines geeigneten Standort für eine Windkraftanlage, ist es daher von Bedeutung den Einfluss von Geländeprofilen und Hindernissen zu berücksichtigen. Durch starke Verwirbelung und Abbremsung in Bodennähe oder vor und nach Hindernissen, geht ein großer Teil des Windenergiepotenzials für Windkraftanlagen verloren. Ebenso spielt die Höhe, in der die Energienutzung stattfinden soll, eine große Rolle. Mit zunehmender Höhe steigt auch die mittlere Windgeschwindigkeit und somit die im Wind enthaltene kinetische Energie.

Die Umwandlung der Windenergie in mechanische Energie geschieht entweder durch das Ausnutzen der unterschiedlichen Widerstände von Körpern im Wind oder durch die erzeugte Auftriebskraft, die eine Fluidströmung auf einen Körper ausübt. [2, 3]

2.1.4 Widerstandsläufer

Der Widerstandsläufer wandelt die kinetische Strömungsenergie der Luft in Rotationsenergie um. Dazu bedient er sich den unterschiedlichen Widerstandskräften, die der Wind beim Auftreffen auf Körper ausübt.

$$F_W = c_W * \frac{\rho}{2} * A_P * v^2 \quad (2.11)$$

Je nach Geometrie des Körpers ist der Widerstandsbeiwert c_W unterschiedlich groß. Weiter hängt die Widerstandskraft F_W von der Dichte ρ des umströmenden Windes, der Projektionsfläche A_P des Körpers und der mittleren Windgeschwindigkeit v ab.

Prinzipiell besteht der Widerstandsläufer aus zwei Stäben gleicher Länge, die an einem Ende jeweils ein Widerstandskörper haben. Das jeweils andere Ende ist in einem gemeinsamen Punkt drehbar gelagert (siehe Abbildung 11, links). Die zwei Stäbe stehen im 180° Winkel zueinander. Es gibt auch Widerstandsläufer mit mehr als zwei Stäben. Sie werden in gleichmäßigen Winkelabständen zueinander im 360° Winkel angeordnet. Bei vier Stäben würden sie im 90° Winkel zueinander stehen (siehe Abbildung 11, rechts). Für das generelle Verständnis der Funktionsweise ist dies jedoch nicht relevant und wird deshalb nicht betrachtet.

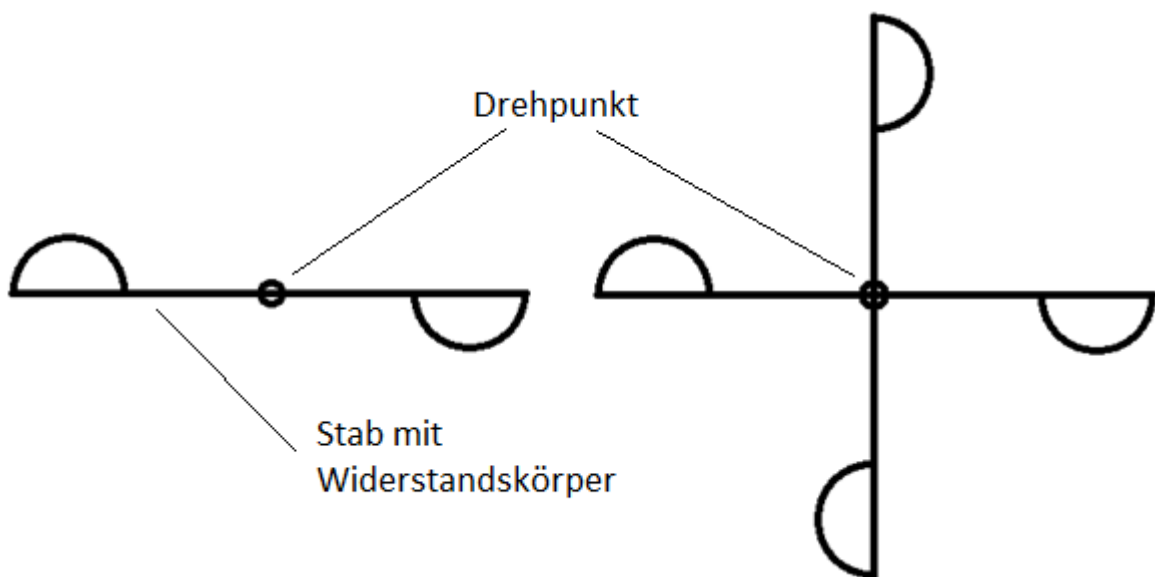


Abbildung 11: Skizze eines Widerstandsläufers

Die Widerstandskörper weisen je nach Anströmrichtung des Windes eine unterschiedlich große Widerstandskraft auf. Zur Erläuterung der Funktionsweise von Widerstandsläufern wird als Widerstandskörper eine Halbkugel betrachtet. Wenn der Stab senkrecht zum Wind steht, so weist der eine Widerstandskörper mit der Kugelseite und der andere mit der flachen Kreisfläche Richtung Wind. Durch die unterschiedlich großen Widerstandsbeiwerte der beiden Körper, wirken

somit zwei unterschiedlich große Kräfte auf den drehbaren Stab (siehe Abbildung 12).

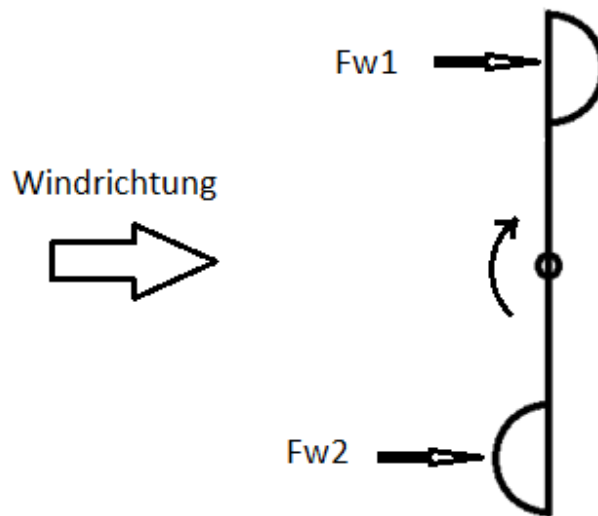


Abbildung 12: Kräfte auf einen Widerstandsläufer

$$F_{W1} = c_{W1} * \frac{\rho}{2} * A_P * v^2 \quad (2.12)$$

$$F_{W2} = c_{W2} * \frac{\rho}{2} * A_P * v^2 \quad (2.13)$$

$$F_{W1} > F_{W2} \quad (2.14)$$

In Anhang I ist eine Tabelle, die einige Widerstandsbeiwerte zu gängigen Körper enthält.

Über den Hebelarm können die durch den Wind erzeugten Momente auf den Stab berechnet werden.

$$M_1 = F_{W1} * l \quad (2.15)$$

$$M_2 = F_{W2} * l \quad (2.16)$$

Da der Hebelarm der beiden Kräfte gleich groß ist, sind die Momente unterschiedlich groß und wirken in entgegengesetzten Richtungen. Daraus resultiert das Gesamtmoment

$$M_{res} = M_1 - M_2 = (F_{W1} - F_{W2}) * l \quad (2.17)$$

Durch einsetzen der Formel 2.12 und 2.13 folgt

$$M_{res} = (c_{W1} - c_{W2}) * \frac{\rho}{2} * A_P * v^2 * l \quad (2.18)$$

Dieses Moment führt zu einer Drehbewegung des Stabes um seine Drehachse. Die in der Drehbewegung enthaltene Energie, ist gleich der entnommenen

kinetischen Energie aus der Luft, und kann zur elektrischen Energiegewinnung genutzt werden.

In der Praxis wird der Widerstandsläufer jedoch selten zur Energiegewinnung genutzt. Er findet meist seine Anwendung in der Windgeschwindigkeitsmessung. [3]

2.1.5 Kraftwerke nach Auftriebsprinzip

Kraftwerke, die nach dem Auftriebsprinzip arbeiten, erzeugen mechanische Bewegungsenergie, in dem sie die Kraft nutzen, die durch den Wind auf ein umströmtes Segel oder einen umströmten Flügel ausgeübt wird. Diese Kraft wird als Auftriebskraft F_A bezeichnet.

Damit eine Auftriebskraft auf einen umströmten Körper wirken kann, muss der Körper von einer Parallelströmung und einer Zirkulationsströmung umströmt werden. Die zusammengesetzte Strömung, die den Körper tatsächlich umgibt, ergibt sich aus der Überlagerung bzw. der Superposition der beiden Einzelströmungen (siehe Abbildung 13).

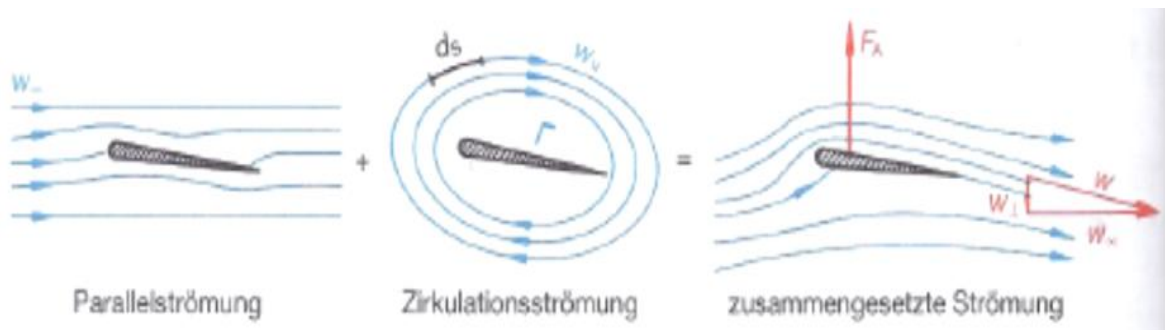


Abbildung 13: Entstehung des Auftriebs [4, S.292]

Durch die vektorielle Addition der Geschwindigkeiten, ergeben sich unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten entlang des Körpers. Unter Berücksichtigung von Bernoulli

$$g * h_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = g * h_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = konst. \quad (2.19)$$

und der Vereinfachung, dass $h_1 \approx h_2$ angenommen werden kann, folgt aus der Annahme $v_1 \neq v_2$, dass der Druck um den Körper nicht überall gleich groß ist ($p_1 \neq p_2$). Es kommt zu einer Druckverteilung am Körper. In Abbildung 14 sind verschiedene Druckverläufe um ein Flügelprofil dargestellt.

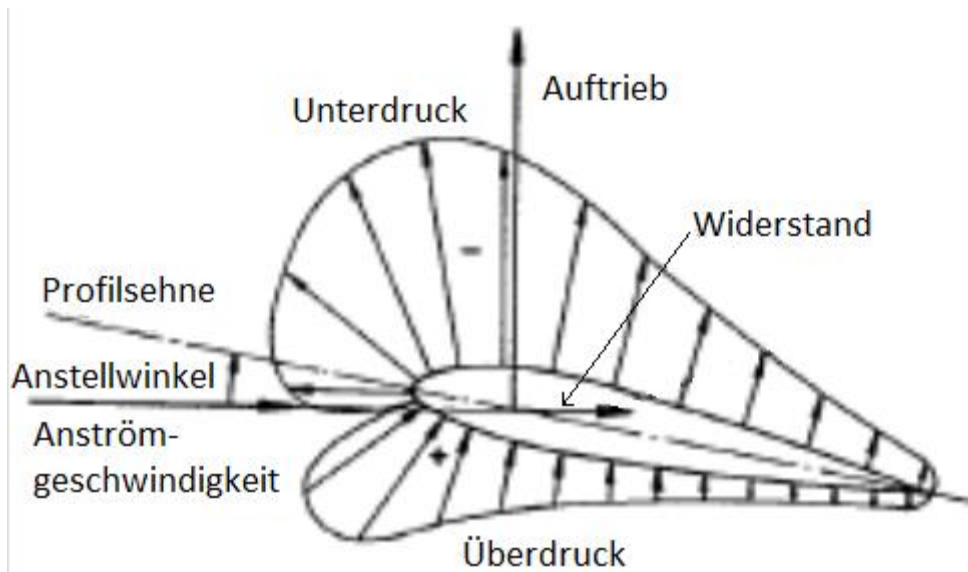


Abbildung 14: Druckverlauf um ein Flügelprofil [2, S.11]

Durch die unterschiedlichen Drücke zwischen der oberen und unteren Seite des Körpers, kommt es zu einem Druckunterschied, von der Druckseite zur Saugseite. Über die Oberfläche des Körpers betrachtet kann der Druckunterschied auf die Auftriebskraft in einem Punkt reduziert werden. Die Auftriebskraft wirkt senkrecht zur Anströmrichtung der Parallelströmung.

Für einen unendlich breiten Tragflügel, ist die Größe der Auftriebskraft abhängig von der Dichte ρ des Umströmungsmediums, der Anströmgeschwindigkeit w_∞ , der Fläche des Flügels A_{Fl} und dem Auftriebsbeiwert c_a . Der Zusammenhang zwischen den Größen ist

$$F_A = c_a * \frac{\rho}{2} * w_\infty^2 * A_{Fl} \quad (2.20)$$

Aus der Beziehung

$$F = m * a \quad (2.21)$$

folgt, dass der umströmte Körper in Richtung der Auftriebskraft beschleunigt wird, wodurch mechanische Bewegungsenergie entsteht.

Ein typische und häufig verwendeter Vertreter für Kraftwerke, die nach dem Auftriebsprinzip funktionieren, ist das Windrad. Es nutzen die Windenergie indem ein propellerartiger, auftriebsnutzender Rotor um eine Drehachse beschleunigt wird.

Durch das Auftreten einer zweiten Geschwindigkeit - beim Windrad handelt es sich um eine Umfangsgeschwindigkeit - kommt es zur vektoriellen Addition der Geschwindigkeiten zu einer resultierenden Geschwindigkeit (siehe Abbildung 15), mit der der Körper tatsächlich angeströmt wird. Es gilt:

$$w_{\infty} = \sqrt{v_{Wind}^2 + u^2} \quad (2.22)$$

Als u wird die Bewegungsgeschwindigkeit des angeströmten Körpers bezeichnet. Die Anströmgeschwindigkeit steht im Winkel

$$\varphi = \arctan\left(\frac{u}{v_{Wind}}\right) \quad (2.23)$$

zur absoluten Windgeschwindigkeit v_{Wind} .

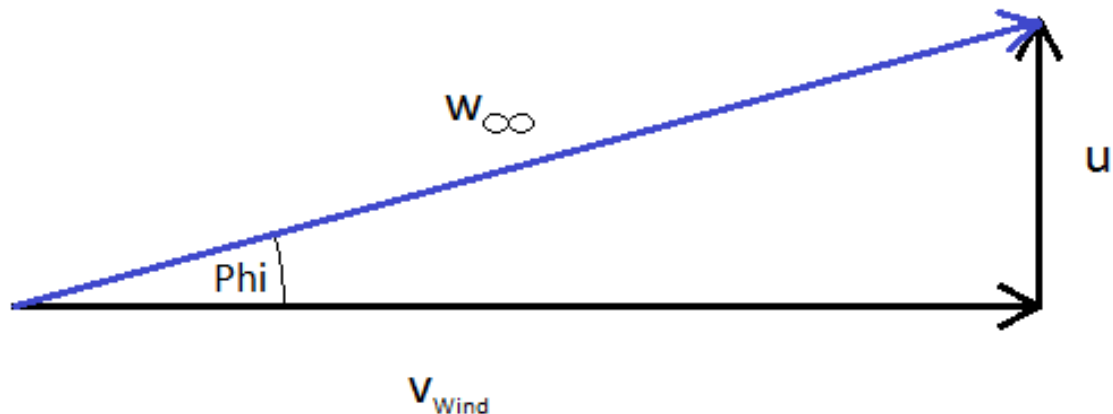


Abbildung 15: Geschwindigkeitsdreieck

Zur optimalen Windnutzung sollte die Bewegungsgeschwindigkeit des Rotors bzw. Tragflügels einem Drittel der Windgeschwindigkeit entsprechen.

$$u = \frac{1}{3} * v_{Wind} \quad (2.24)$$

[2, 4]

2.2 Prototyp eines Auftriebskörperkraftwerks

(Verfasst von Sedlmayr T.)

Nachfolgend werden zwei Prototypen aufgezeigt, die sich hinsichtlich ihres Segels unterscheiden und beide zu verschiedenen Problemen geführt haben. Es wird deshalb auf den grundlegenden Aufbau sowie auf die genaue Funktionsweise eingegangen. Das Prinzip eines derartigen Auftriebskörperkraftwerks ist jedoch

bei beiden Versionen dasselbe. Es beruht darauf, dass wie in Kap. 2.1 beschrieben wurde, ein Segel aufgrund einer bestimmten Winkelstellung im Wind durch dessen Auftriebskraft an einem Mast nach oben bzw. unten „gedrückt“ wird. Abbildung 16 verdeutlicht diesen Effekt und stellt zugleich alle benötigten Teile für eine derartige Umsetzung dar.

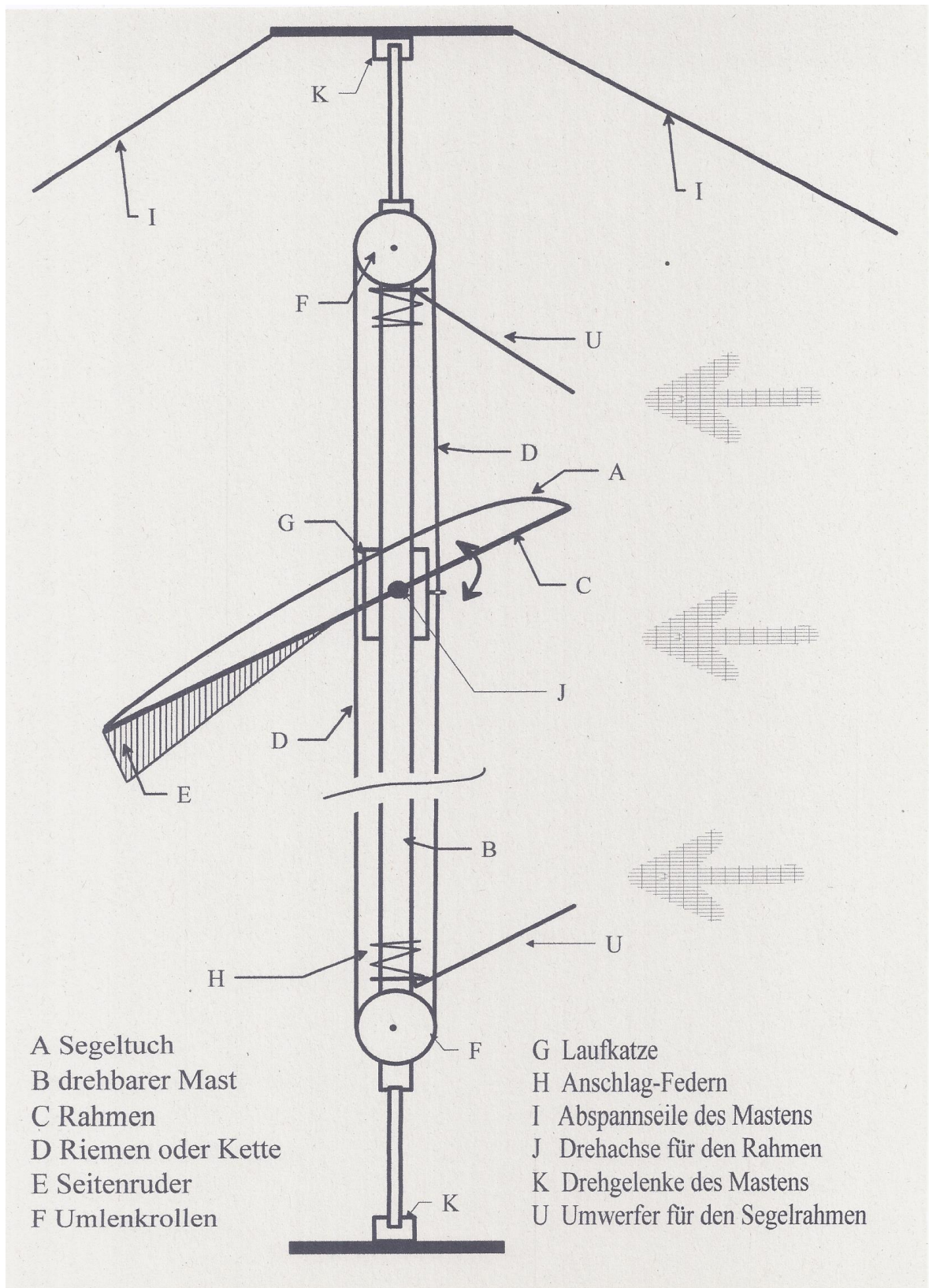


Abbildung 16: Prinzip eines Aufwindkraftwerks [15]

Der komplette Mast ist am oberen Ende auf einer Platte befestigt, an der drei Stahlseile montiert sind und im Boden mit Ankern gesichert sind. Diese

gewährleisten, dass der Aufbau nicht kippen kann. Die Bodenplatte ist zusätzlich mit drei Heringen versehen, sodass auch diese nicht verrutschen kann. Die beiden Drehgelenke am unteren sowie oberen Ende garantieren, dass das Segel immer senkrecht zum Wind steht (Abbildung 17).



Abbildung 17: Bodenplatte mit Heringen und Drehgelenk [15]

Mithilfe der angebrachten Seitenruder kann die Windrichtung bei wechselnden Winden von selbst und ohne äußeres Eingreifen angepasst werden. Der Rahmen, auf dem das Segel befestigt ist, ist über ein weiteres Drehgelenk an einer Laufkatze befestigt. Das Rotationsgelenk ist für den Kippmechanismus des Rahmens im Wind verantwortlich. Am jeweils oberen und unteren Ende fährt der Rahmen des Segels gegen einen Anschlag, der das Segel in die gegensätzliche Position bringt und so der Wind erneut für den Auf- oder Abtrieb sorgt. Damit jedoch Strom und somit Leistung aus der Anlage entnommen werden kann, muss die translatorische Energie des Segels und somit auch der Laufkatze in eine rotatorische Bewegung umgewandelt werden, mit welcher ein Generator betrieben

werden kann. Deshalb ist die Laufkatze auf einer Seite mit einer Kette verbunden, die am oberen und unteren Ende um ein Ritzel läuft. Mithilfe dieses Mechanismus bewegt sich die ca. 12 m lange Fahrradkette bei Auf- und Abtrieb in gegensätzliche Richtungen. Für einen Generator ist dies suboptimal, weshalb ein schon vorher eigens entwickeltes Richtgetriebe dafür sorgt, dass sich der Generator immer in dieselbe Richtung drehen kann. Abbildung 18 verdeutlicht, dass ausgehend von einem großen Ritzel, an dem auch die lange Fahrradkette umläuft, eine weitere Kette angreift und in das Richtgetriebe läuft. Dieses besteht aus insgesamt zwei Wellen und vier Ritzeln, von denen zwei Freiläufe besitzen. Durch eine bestimmte Anordnung ist damit sichergestellt, dass die Lichtmaschine, die in diesem Fall als Generator dient immer in die dieselbe Richtung läuft.

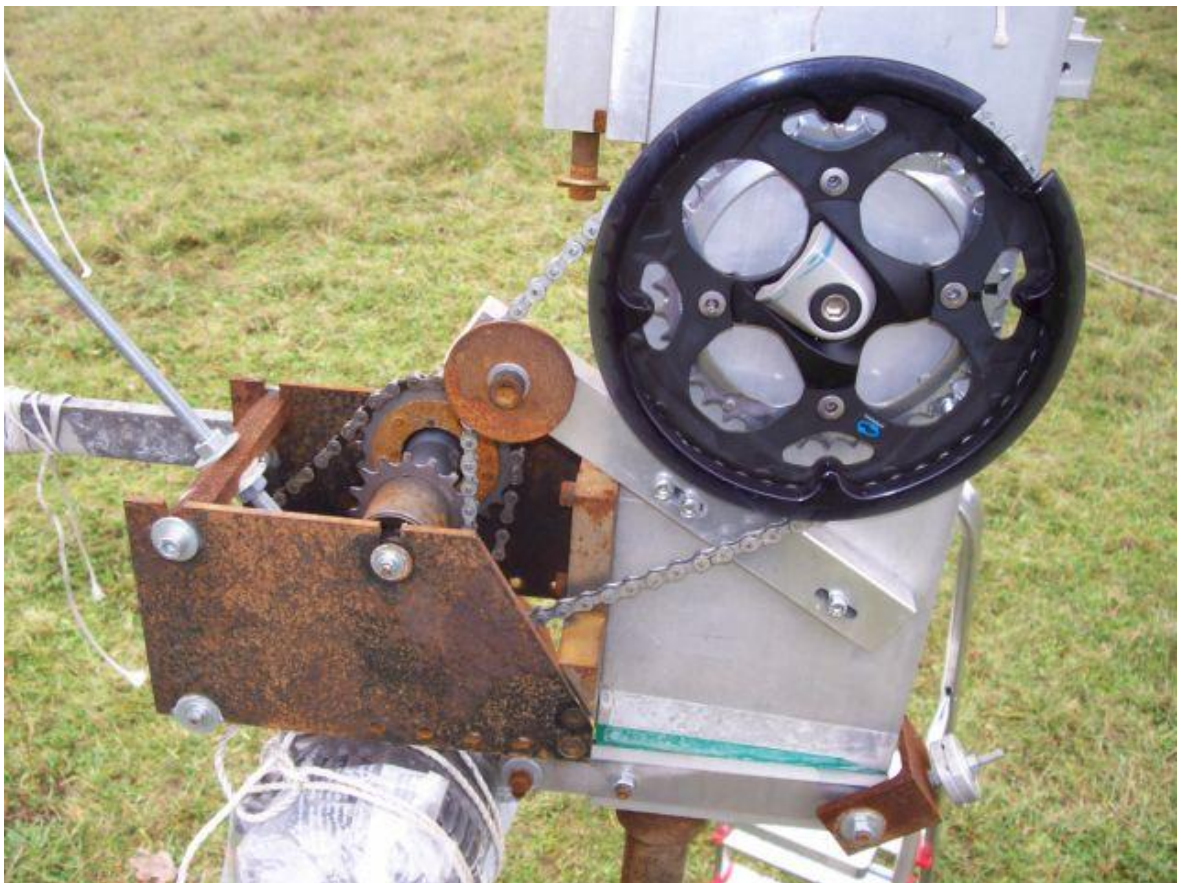


Abbildung 18: Richtgetriebe [15]

Abbildung 19 zeigt die Laufkatze mit der Befestigung für das Segel und der Befestigung an die Kette. Hierbei ist auffällig, dass die Kette mithilfe von zwei Federn an die Laufkatze angebunden ist. Diese garantieren das Speichern der Energie von Windböen. Im Gegensatz zu Windrädern, bei denen die Energie von Windböen aufgrund der Trägheit des Rotors nicht komplett aufgenommen werden

können, kann mit dieser Konstruktion die Windböe in den Federn „gespeichert“ werden. Damit kontrahieren sich die Federn nachdem die Windböe nicht mehr vorhanden ist und gibt der Laufkatze somit zusätzliche Geschwindigkeit. Im weiteren Verlauf bedeutet dies, dass keine Energie des Windes verloren geht. Damit der Auf- und Abtrieb des Segels jeweils „gleichwertig“ sind, ist ein Gegengewicht mit dem Gewicht der Katze und des Segels auf der anderen Seite der Kette eingespannt.

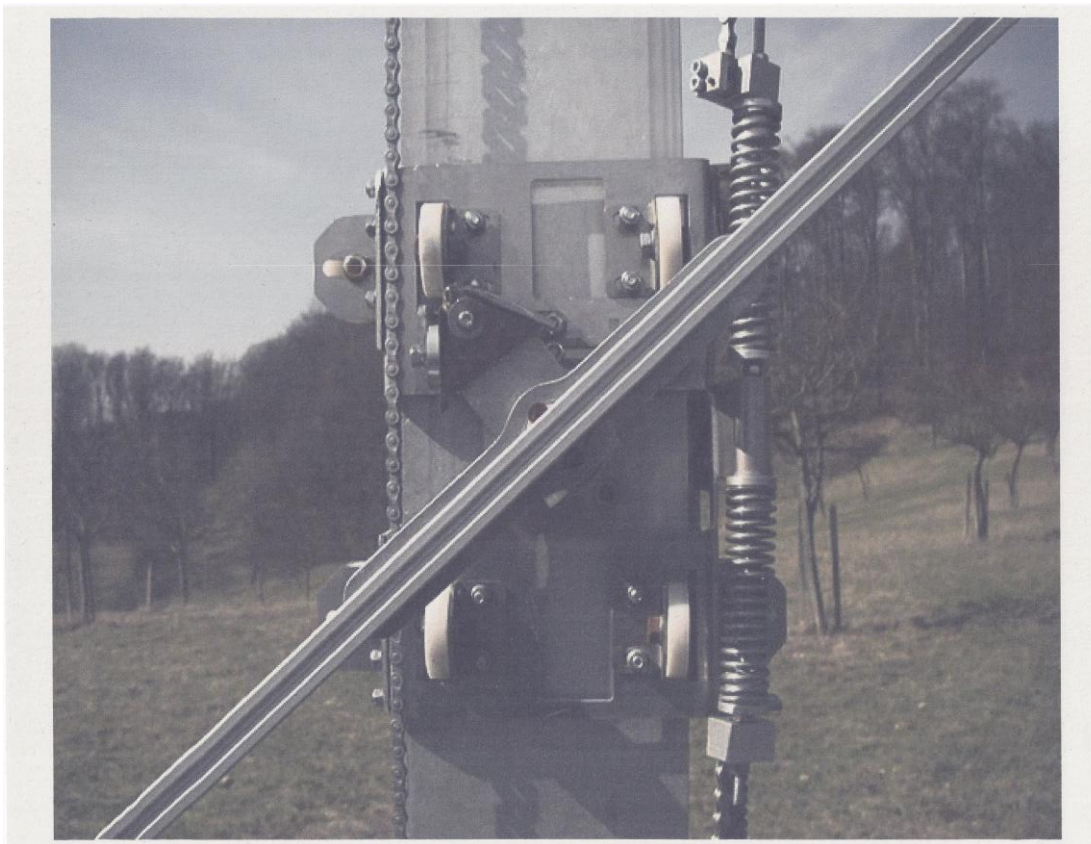


Abbildung 19: Laufkatze mit Befestigung an einer Kette (rechte Seite) [15]

Das Segel des ersten Prototyps besteht aus einem Alu-Vierkantprofil wie es in Abbildung 19 dargestellt ist. Dieses ist allerdings zu schwer und damit die komplette Anlage zu träge. Als Folge daraus benötigt man große Kräfte und damit kräftige Winde, um das System in Bewegung zu bringen. Der Rahmen für Prototyp zwei besteht aus einem Alu-Rundprofil, das wiederum zu leicht und instabil ist.

Deshalb werden in nachfolgendem Kapitel alle problematischen Stellen aufgezeigt, sowie die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit präzisiert.

3 Problematik und daraus resultierende Aufgabenstellung

(Verfasst von Sedlmayr T.)

Wie in Kapitel 2.2 bereits aufgezeigt, existiert ein derartiges Windkraftwerk bereits. Allerdings besteht hierbei eine Menge an Verbesserungspotential. Zum einen gibt es Probleme mit dem Segel, das entweder zu schwer und überdimensioniert oder zu leicht und unterdimensioniert ist. Ein weiterer Punkt ist die Dämpfung am Umkehrpunkt. Derzeit besteht das Problem, dass bei starkem Wind das Segel mit voller Wucht an den Anschlag fährt und so auf einen Schlag abgebremst wird. Bei geringem Wind hingegen, reicht die Energie des Auftriebs nicht aus, um das Segel am Anschlag umzukehren, was dazu führt, dass die Laufkatze am oberen Umkehrpunkt stehen bleibt und somit keine weitere Energie produziert wird. Aufgrund der Tatsache, dass das Segel nur eine Winkeleinstellung hat, kann zudem kein Einfluss auf verschiedene Windgeschwindigkeiten genommen werden.

Ausgehend von oben genannten Problemen soll im Rahmen dieser Studienarbeit, das Segel aufgrund eigener Berechnungen neu konzipiert und konstruiert werden. Zusätzlich muss ein sicherer Kippmechanismus, der bei allen Windstärken das Segel kippen soll, entwickelt werden. Um zusätzlich die maximale Leistung aus dem Kraftwerk entnehmen zu können, sollen steuerungstechnische Überlegungen angestrebt werden, wie die Anlage optimiert werden kann. Damit sichergestellt wird, dass die neu konzipierte Anlage funktioniert, wird im Anschluss an die theoretische und konstruktive Arbeit, der Masten mit den Drehgelenken, Laufkatze, Anschlägen, Richtgetriebe, Kettenantrieb und Generator (Lichtmaschine) probeweise zusammengebaut und die Funktionen im nicht aufgestellten Modus getestet. Dadurch dass die Windkraftanlage zukünftig unter anderem in Entwicklungsländer zum Einsatz kommt, wird zusätzlich noch eine Montageanleitung geschrieben werden.

Sämtliche Aufgaben und Überlegungen werden auf Grundlage des Prototyps in



Abbildung 20 durchgeführt.



Abbildung 20: Windkraftwerk mit Segel am Mast (Prototyp) [15]

4 Segel

(Verfasst von Marco Hafner)

4.1 Anforderungen an das Segel

Wie bereits in Kapitel 2.2 erläutert, ist das Segel und sein Rahmen ein zentrales Bauteil der Windkraftanlage. Es ist dafür zuständig die kinetische Energie des Windes in mechanische Bewegungsenergie umzuwandeln, aus der letztendlich elektrische Energie gewonnen wird. Damit die Energiegewinnung aus dem Wind so effektiv wie möglich ist, muss auch das Segel so gut wie möglich auf seine Aufgabe abgestimmt sein. Damit dies gelingt, ist es wichtig zu Beginn der Bearbeitung dieser Teilaufgabe, die Anforderungen an diese Baugruppe zu ermitteln. Die Anforderungsliste sollte möglichst vollständig und ausführlich sein, um zu verhindern, dass im Verlauf des Projekts Unstimmigkeiten und Probleme auftreten.

Wichtige Aspekte, die in der Anforderungsliste für das Segel und seinen Rahmen definiert werden sollten sind z.B. Einsatzgebiet der Windkraftanlage; Zielpersonen, die die Windkraftanlage betreiben sollen; Kosten der Anlage und Instandhaltung; Auslegungsbereich (Windstärke) der Windkraftanlage

Unter Betrachtung der bereits genannten Punkte und weiteren Aspekten, haben sich folgende Anforderungen ergeben. Das Segel soll:

- aus billigen Materialien bestehen.
- aus regional erhältlichen Materialien bestehen.
- einfach zu konstruieren sein.
- wetterresistent sein.
- leichter als das Vorgänger Segel sein (so leicht wie möglich).
- Windgeschwindigkeiten bis $12 \frac{m}{s}$ standhalten.
- demontierbar sein.
- skalierbar sein.
- für Versuche, in der Größenordnung von 1,5 m auf 2,5 m konstruiert werden.

4.2 Bewertung der Teillösungen mit Hilfe der VDI 2225 Methode

Nachdem geklärt wurde worauf es beim Segel ankommt, müssen verschiedene Lösungen entworfen werden. Dieser Vorgang kann erleichtert werden, in dem

4 Segel

Hilfsmittel zur Lösungsfindung hinzugezogen werden. Dabei können bereits bestehende Lösungskonzepte an das zu bearbeitende Problem adaptiert, aber auch neue Lösungen mit Hilfe von Kreativitätstechniken erzeugt werden.

Nach Abschluss der Lösungsfindungsphase, müssen die unterschiedlichen Teillösungen miteinander verglichen werden, um die beste Lösung zu bestimmen. Damit jedoch ein aussagekräftiger Vergleich möglich ist, der nicht ausschließlich von der subjektiven Meinung des Betrachters abhängt, werden zunächst einmal Bewertungskriterien bestimmt. Diese sind aus den Anforderungen an das Segel abzuleiten. Die Kriterien werden gegeneinander aufgetragen und gewichtet (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Gewichtungsfaktoren für das Segel

Gewichtung	Preis	Gewicht	Komplexität (Montage)	Segel tauschen/reffen	Stabilität/ Windnutzung	Summe	Prozent
Preis	1	1	1	1	0	4	16,00%
Gewicht	1	1	2	2	0	6	24,00%
technisches Komplexität (Montage)	1	0	1	1	0	3	12,00%
Segel tauschen/reffen	1	0	1	1	0	3	12,00%
Stabilität/ Windnutzung	2	2	2	2	1	9	36,00%
						25	100,00%

Es werde immer die Zeilen mit den Spalten verglichen. Eine Null bedeutet weniger wichtig, die Eins signalisiert gleich wichtig und die Zwei bedeutet wichtiger. Eine Null im entsprechenden Kästchen bedeutet somit, dass das Kriterium in der Zeile weniger wichtig ist als der Bewertungsaspekt, der in der Spalte aufgetragen ist. Das Ergebnis ist, dass die Stabilität des Segels der wichtigste Aspekt bei der Bewertung der verschiedenen Lösungen ist. An zweiter Stelle kommt das Kriterium Gewicht.

Im nächsten Schritt wird eine Punkteskala erstellt, wodurch jede Eigenschaft der Teillösungen als Wert von 0 bis 4 Punkte ausgedrückt werden kann (siehe Tabelle 4). 4 ist hierbei die beste Bewertung die erreicht werden kann.

Tabelle 4: VDI-Punkteskala für das Segel

VDI Punkteskala	0	1	2	3	4
Preis	>150€	>100€	>75€	>50€	<50€
Gewicht	>10kg	>5kg	>2,5kg	>1kg	<1kg
technisches Komplexität (Montage)	spezielles Werkzeug, angeleiteter Zusammenbau und technische	spezielles Werkzeug und angeleiteter Zusammenbau	einfaches Werkzeug und angeleiteter Zusammenbau	einfaches Werkzeug und intuitiver Zusammenbau	ohne Werkzeug und intuitiver Zusammenbau
Segel tauschen/reffen	sehr kompliziert und zeitintensiv	kompliziert	umständlich	einfach	sehr einfach und schnell
Stabilität/ Windnutzung	sehr instabil				sehr stabil

Abschließend werden die verschiedenen Teillösungen miteinander verglichen (siehe Tabelle 5). Mit Hilfe der zuvor ermittelten Gewichtungsfaktoren und der Punkteskala kann für jedes Lösungskonzept ein gewichtetes Gesamtergebnis berechnet werden. Die Lösung, die am Ende den größten Wert erreicht, ist als optimale Lösung anzusehen, die den Anforderungen am besten entspricht.

Tabelle 5: Lösungsbewertung für das Segel

	Preis	Gewicht	technisches Komplexität (Montage)	Segel tauschen/reffen	Stabilität/ Windnutzung	Summe	Summe gewichtet
Kohlefaserrahmen	1	3	3	4	2	13	2,44
Bambusrahmen	3	2	3	4	4	16	3,24
Revolution-Drache	4	1	2	0	0	7	1,12

Aus der Bewertung geht das Segel mit einem Bambusrahmen als beste Lösung hervor.

4.3 Bambusrahmen

Die Idee des Bambusrahmens beruht darauf, den Großteil der auftretenden Kräfte durch den Wind mit Hilfe der Symmetrie und gegenseitige Abstützung der Segel zu kompensieren.

Zunächst einmal besteht der Rahmen, an dem das Segeltuch später befestigt werden soll, aus vier Bambusstäben. Sie werden über die Ecken mit Aluminiumwinkeln verbunden. Damit die Bambusrahmen an den Rest der Windkraftanlage befestigt werden können, wird eine Seite der Rahmen mit einem

4 Segel

kurzer Bambusstab in ein U-Profil aus Aluminium gesteckt. Die Aluminiumprofile haben jeweils vier angeschraubte Aluminiumstangen. Über diese werden mit Stahlseilen die frei hängenden Enden der Bambusrahmen gelagert (siehe Abbildung 21).

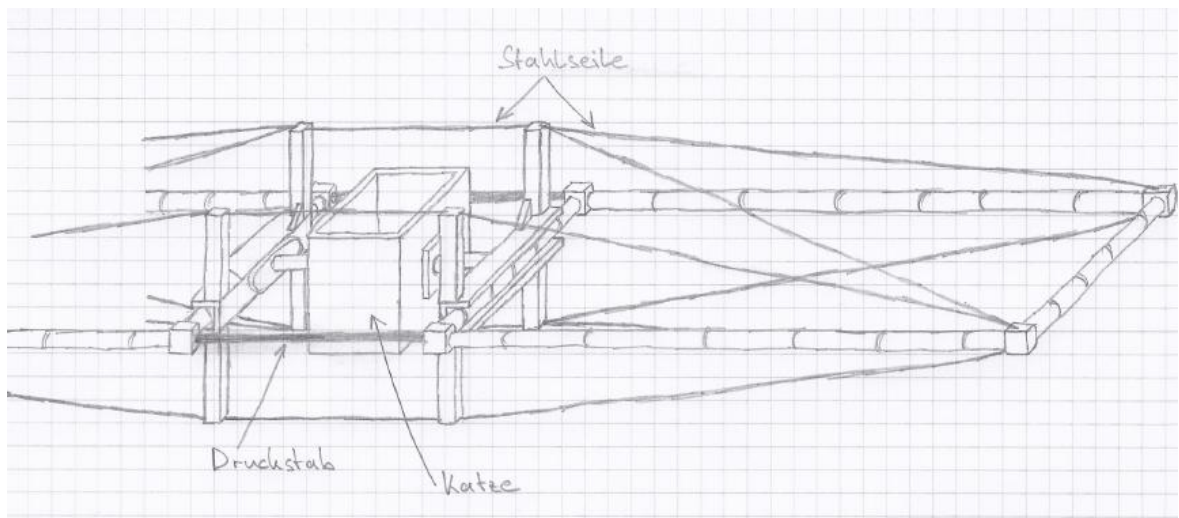


Abbildung 21: Skizze des Segelrahmens mit Katze

Aufgrund der geringen Höhe der Aluminiumstangen im Gegensatz zur Breite der Segelrahmen, ist der Winkel zwischen dem Segel und den Seilen sehr klein. Dadurch entstehen große Zugkräfte in den Stahlseilen. Über die Aluminiumstangen würde dies zu einem enormen Torsionsmoment auf das U-Profil und großen Biegekräften auf den kurzen Bambusstab im Aluminiumprofil führen. Um diese aufnehmen zu können, ohne die Materialien groß dimensionieren zu müssen, wird die Symmetrie der Segel genutzt. Durch Zugseile zwischen den Aluminiumstangen vom rechten Segel und dem linken Segel werden die Zugkräfte kompensiert und somit das Torsionsmoment beseitigt. Durch einen Druckstab zwischen den Eckpunkten der beiden Rahmen werden die Druckkräfte aufgefangen und dadurch das Biegemoment auf den Bambus verhindert (siehe Abbildung 22). Es bildet sich ein in sich geschlossener Kraftfluss, bestehend aus Zug und Druckkräften, die von den entsprechenden Materialien besser aufgenommen werden können.

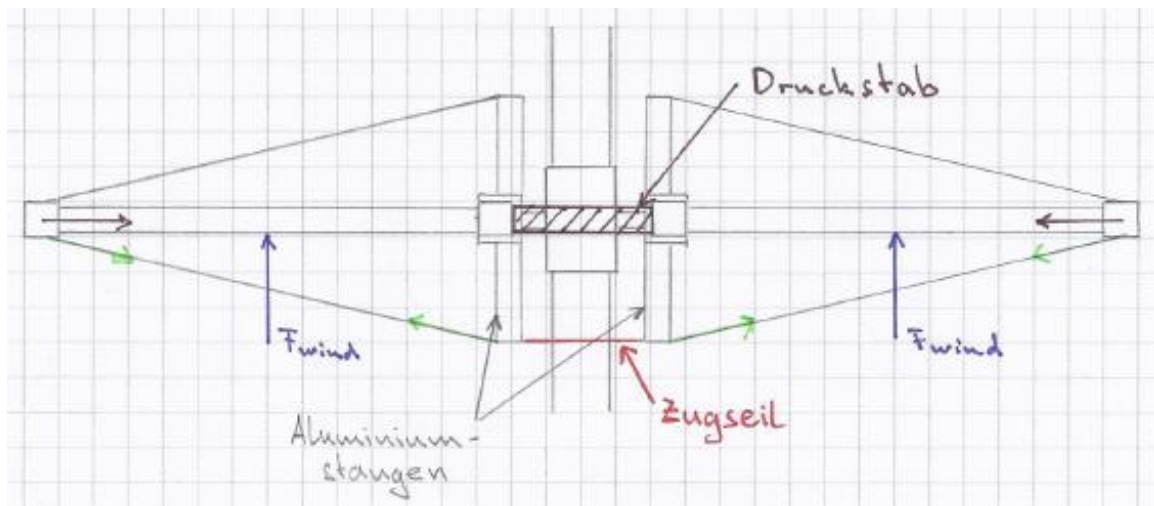


Abbildung 22: Kräfteverlauf im Segel

4.4 Berechnung der Kräfte auf das Segel

Die Grundlagen zur Berechnung der Kräfte auf das Segel, ist im Bereich der Tragflügeltheorie zu finden und wurden teilweise in Kapitel 2.1.5 behandelt. In diesem Kapitel soll die Tragflügeltheorie vertieft werden, um somit die theoretischen Kräfte auf das Segel zu berechnen, die später für die Auslegung des Rahmens wichtig sind.

Die ersten Informationen, die für die Berechnung der Kräfte wichtig sind, können der Anforderungsliste entnommen werden. Somit lässt sich die Fläche des Segels A_{Fl} berechnen.

$$A_{Fl} = h * b \quad (4.1)$$

Weiter kann der Anforderungsliste die maximale Windgeschwindigkeit, für die das Segel geeignet sein soll, entnommen werden. Mit der Formel 2.24 aus Kapitel 2.1.5 lässt sich aus der maximalen Windgeschwindigkeit und der Bewegungsgeschwindigkeit des Segels die resultierende Anströmgeschwindigkeit w_{∞} errechnen. Für die Bewegungsgeschwindigkeit des Segels wird ein Drittel der Windgeschwindigkeit angenommen.

Neben der Dichte ρ der Luft, der Anströmgeschwindigkeit w_{∞} und der Segelfläche A_{Fl} werden der Auftriebsbeiwert c_A und der Widerstandsbeiwert c_w benötigt um die Auftriebskraft F_A und die Widerstandskraft F_W bestimmen zu können.

$$F_A = c_a * \frac{\rho}{2} * A_{Fl} * w_\infty^2 \quad (4.2)$$

$$F_W = c_w * \frac{\rho}{2} * A_{Fl} * w_\infty^2 \quad (4.3)$$

Zur Bestimmung der beiden Beiwerte wird üblicherweise das Polardiagramm nach Lilienthal zur Hilfe genommen (siehe Abbildung 23). Es stellt den Auftriebsbeiwert c_A , den Widerstandsbeiwert c_w und den Momentenbeiwert c_m in Abhängigkeit vom Anstellwinkel α dar. Darüber hinaus kann dem Diagramm auch der Gleitwinkel γ entnommen werden. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen Auftriebsbeiwert und Widerstandsbeiwert und ist der Winkel mit dem ein Tragflügel bei Windstille zu Boden gleiten würde.

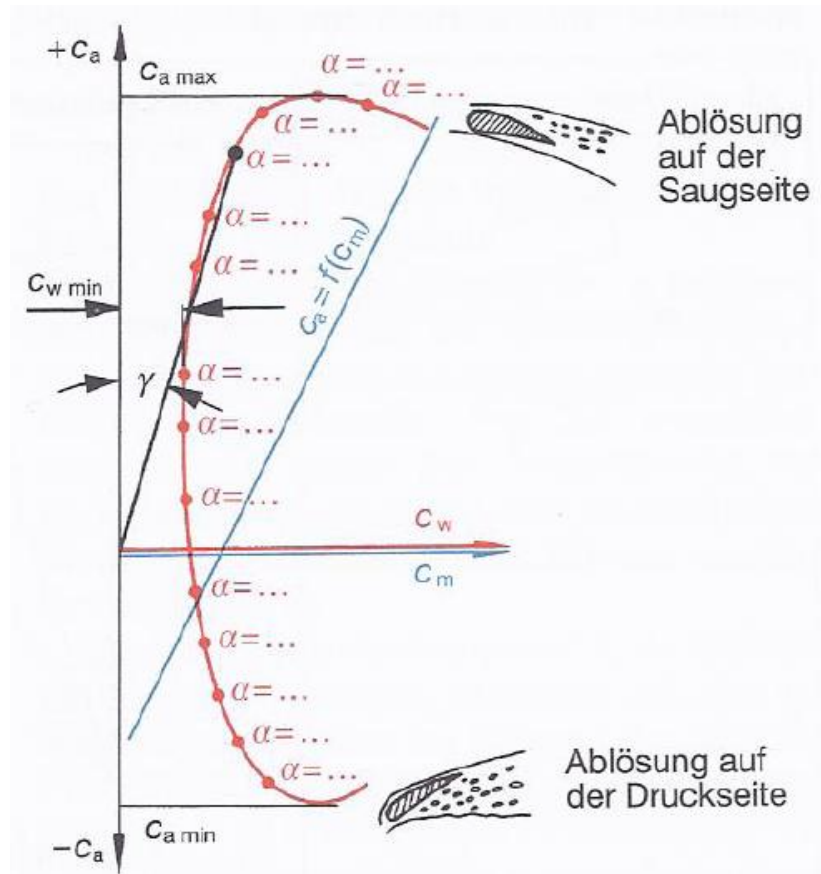


Abbildung 23: Polardiagramm nach LILIENTHAL [4, S.297]

Die Beiwerte eines Flügels hängen jedoch nicht nur vom Anstellwinkel ab. Faktoren wie die Geometrie des Segels, die Rauigkeit der Segeloberfläche und die Reynolds-Zahl Re der Strömung haben auch einen Einfluss.

$$Re = \frac{w_\infty * l}{\nu} \quad (4.4)$$

w_∞ ist die Anströmgeschwindigkeit, l die überströmte Länge und ν die kinematische Viskosität des Fluids.

Dadurch gilt ein Polardiagramm nur für eine bestimmte Tragflügelgeometrie bei bestimmten Verhältnissen. Die entsprechenden Werte zur Erstellung der Diagramme werden durch praktische Versuche ermittelt.

Aufgrund dieser Tatsache, ist in der Literatur kein Polardiagramm zur vorhandenen Aufgabe zu finden. Für die Berechnung der theoretischen Kräfte auf das Segel müssen der Auftriebs- und Widerstandsbeiwert auf anderem Wege bestimmt werden. Dazu bietet die Literatur empirische Gleichungen, die für unterschiedliche Profile und kleine Anstellwinkel gelten. Mit größeren Anstellwinkeln weicht jedoch der theoretische Auftriebsbeiwert zunehmend vom tatsächlichen Wert ab. In Abbildung 24 wird der theoretische mit dem tatsächlichen Verlauf des Auftriebsbeiwerts bei einer Reynolds-Zahl von ca. $4 \cdot 10^5$ dargestellt. Wie aus dem Diagramm abzulesen ist, erreicht die reale Kurve sein Maximum bei ca. 11° und liegt dort bei etwa 0,78.

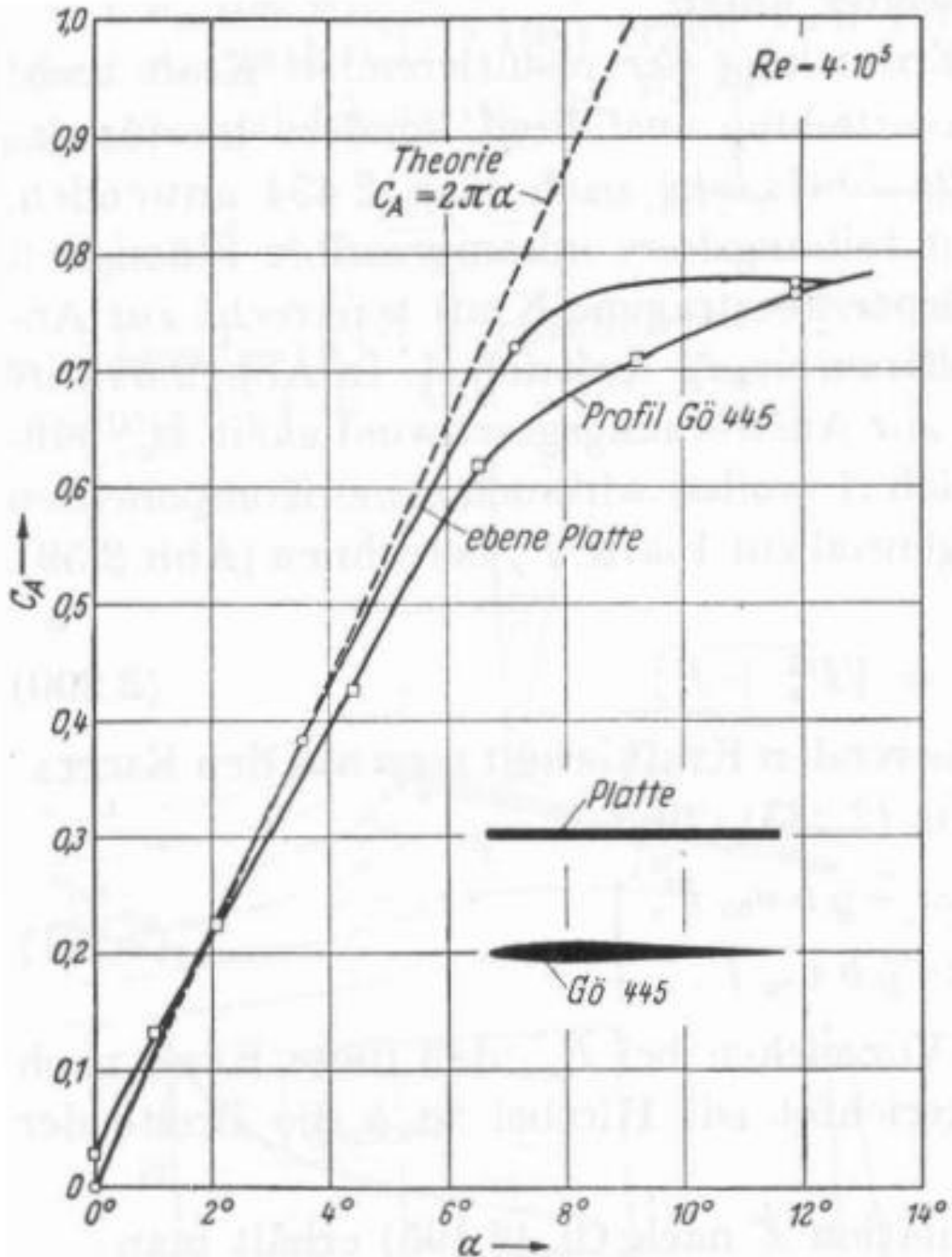


Abbildung 24: Auftriebsbeiwert in Abhängigkeit des Anstellwinkels [14, S.106]

Die tatsächliche Reynolds-Zahl des vorliegenden Problems liegt etwa um den Faktor 3 höher als der für den das Diagramm gilt. Da aber für zunehmende Reynolds-Zahlen auch der Auftriebsbeiwert größer wird, wird für die Berechnungen als Auftriebsbeiwert 0,8 angenommen. Dieser Wert ist zwar nicht

optimal, aber aufgrund von Mangel an genauerer Informationen für eine erste Abschätzung der auftretenden Kräfte auf das Segel ausreichend.

Zur Bestimmung des Widerstandsbeiwertes gibt es keine Faustformeln in der Literatur. Jedoch setzt sich die Widerstandskraft auf einen angeströmten Körper aus dem Druckwiderstand F_{wD} und dem Reibungswiderstand F_{wR} zusammen.

Zur Berechnung dieser beiden Kräfte wird die Anströmgeschwindigkeit aufgeteilt in seine parallele w_P und senkrechte w_S Geschwindigkeitskomponente zum Segel.

$$w_P = w_\infty * \cos(\alpha) \quad (4.5)$$

$$w_S = w_\infty * \sin(\alpha) \quad (4.6)$$

Daraus folgt für die Widerstandskräfte

$$F_{wD} = c_D * \frac{\rho}{2} * A_{Fl} * w_S^2 \quad (4.7)$$

$$F_{wR} = c_R * \frac{\rho}{2} * A_{Fl} * w_P^2 \quad (4.8)$$

Der Druckwiderstandsbeiwert c_D ist abhängig von der Körpergeometrie und kann Tabellen entnommen werden. Zur Bestimmung des Reibungswiderstandsbeiwert kann die Beziehung

$$c_R = \frac{1,328}{\sqrt{Re}} \quad (4.9)$$

verwendet werden. Sie gilt für Strömungen mit laminarer Grenzschicht, d.h. die Reynolds-Zahl liegt unter $Re_{krit} = 3,2 * 10^5 \dots 10^6$.

$$Re = \frac{w_P * l}{\nu} \quad (4.10)$$

Über den Pythagoras kann die gesamt Widerstandskraft F_W auf den Flügel berechnet werden.

$$F_W = \sqrt{F_{wD}^2 + F_{wR}^2} \quad (4.11)$$

Wegen dem kleinen Reibungswiderstandsbeiwert c_R wird der Reibungswiderstand verschwindend gering, wodurch die Widerstandskraft nur aus dem Druckwiderstand auf das Segel besteht.

Durch aufteilen der Widerstandskraft auf seine Komponenten $F_{W||}$ (parallel zur Auftriebskraft)

$$F_{W\parallel} = F_W * \cos(\alpha) \quad (4.12)$$

und seine Komponente $F_{W\perp}$ (senkrecht zur Auftriebskraft),

$$F_{W\perp} = F_W * \sin(\alpha) \quad (4.13)$$

kann die resultierende Kraft F_R auf das Segel über den Pythagoras berechnet werden (siehe Abbildung 25).

$$F_R = \sqrt{(F_{W\parallel} + F_A)^2 + F_{W\perp}^2} \quad (4.14)$$

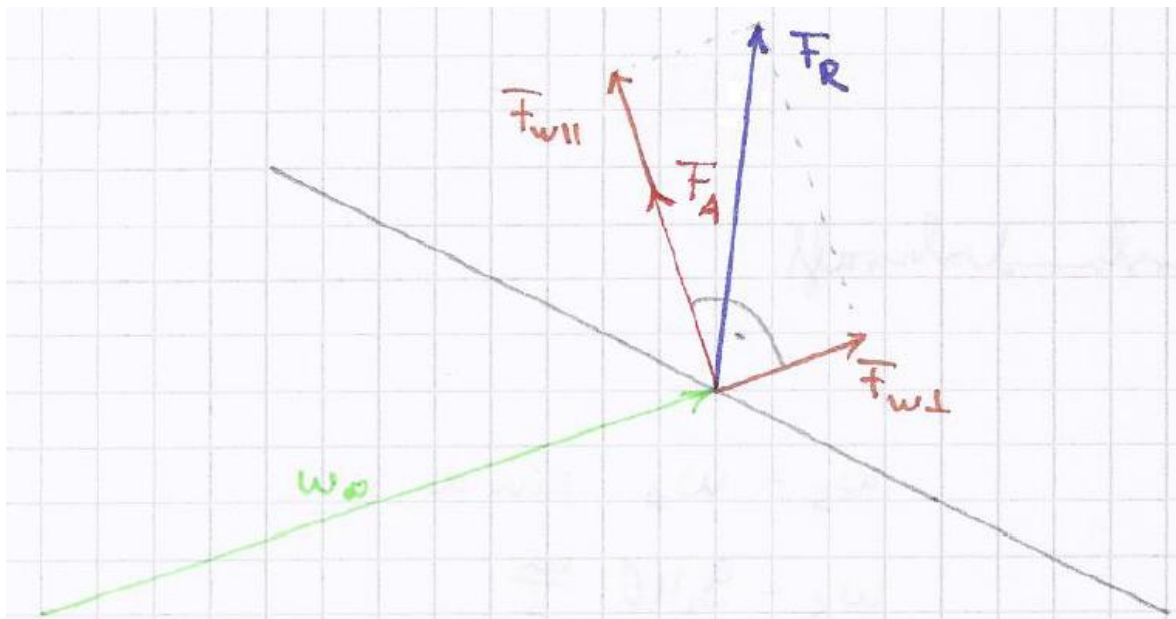


Abbildung 25: Angeströmtes Segel

[4, 14]

4.5 Auslegung des Rahmens

Nach der Berechnung der Kraft auf das Segel kann der benötigte Durchmesser für die Bambusrohre bestimmt werden. Die kritischsten Stellen des Bambusrahmens sind - aufgrund des großen Hebelarms - die 2,5 m langen Seiten des Segels. Diese werden auf Biegung und Druck beansprucht. Die für den Bambus zulässigen Biegespannungen σ_{zulB} und Druckspannungen σ_{zulD} können in der Literatur nachgelesen werden.

4 Segel

In Abbildung 26 ist der Bambusrahmen als Skizze dargestellt. Weiter sind die auf das Segel wirkende Kraft F_R , aufgeteilt in seine y- und z-Komponente, und die Lagerkräfte des Segels eingezeichnet.

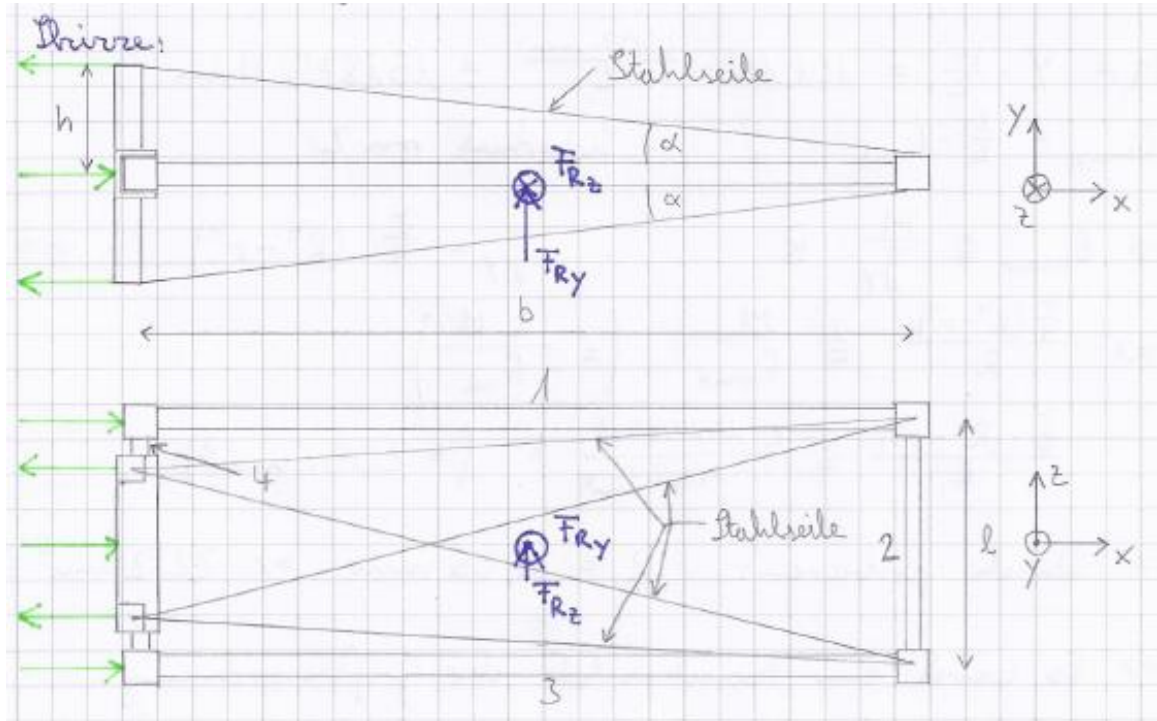


Abbildung 26: Skizze des statischen Systems

Über die Befestigungslaschen des Segels an den Bambusstäben werden die Kräfte F_{Ry} und F_{Rz} auf den Bambusrahmen übertragen. Dies hat eine Biegung des Bambus in y- und z- Richtung zur Folge, was gleichbedeutend mit einer geraden Biegung durch die Kraft F_R ist. Unter der Annahme, dass die resultierende Windkraft mittig am Segel angreift, verteilt sich die Kraft gleichmäßig auf den Bambusstab 1 und 3.

Aus dem freigeschnittenen System ergeben sich die folgenden Gleichgewichtsbedingungen:

$$\sum F_x = 0 = X - L_{xy} * \cos(\alpha) \quad (4.15)$$

$$\sum F_y = 0 = Y - \frac{F_R}{2} + L_{xy} * \sin(\alpha) \quad (4.16)$$

$$\sum M = 0 = \frac{F_R}{2} * \frac{b}{2} - L_{xy} * \sin(\alpha) * b \quad (4.17)$$

Durch Umformen und Einsetzen ergibt sich für die Lagerkräfte

$$L_{xy} = \frac{F_R}{4 * \sin(\alpha)} \quad (4.18)$$

$$Y = \frac{F_R}{4} \quad (4.19)$$

$$X = L_x = \frac{F_R \cdot \cos(\alpha)}{4 \cdot \sin(\alpha)} \quad (4.20)$$

Der Winkel α , der zwischen dem Segel und dem Stahlseil liegt, wird über die trigonometrischen Beziehungen bestimmt (siehe Abbildung 26).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{b}\right) \quad (4.21)$$

Für das Biegemoment M auf den Bambus gilt somit:

$$M = Y * \frac{b}{2} = \frac{F_R * b}{8} \quad (4.22)$$

Über die zulässigen maximalen Biegespannungen σ_{zulB} [siehe Quelle 11] und dem wirkenden Moment M kann mit der Gleichung zur Berechnung von Biegespannung,

$$\sigma_{zulB} = \frac{M}{J_y} * R \quad (4.23)$$

auf das benötigte Flächenträgheitsmoment J_y ,

$$J_y = \frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4) \quad (4.24)$$

bzw. auf den Außenradius R geschlossen werden.

Da es sich bei Bambus um ein Naturprodukt handelt und deshalb Maße und zulässige Spannungen variieren können wird eine Sicherheit von 2 mit einberechnet. Weiter wird für die Wandstärke des Bambus 4 mm angenommen, womit für den Innenradius r gilt:

$$r = R - 4 \text{ mm} \quad (4.25)$$

Somit folgt:

$$\frac{\frac{\pi}{4} * (R^4 - r^4)}{R} \geq \frac{2 * M}{\sigma_{zulB}} \quad (4.26)$$

Neben der Biegebelastung wirkt zusätzlich eine Druckbelastung auf den Bambusstab. Diese entsteht durch das Stahlseil, das zur Lagerung des Segels benötigt wird.

Mit der nun bekannten Querschnittsfläche A des Bambus und der Druckkraft X lässt sich über die Beziehung

$$\sigma_D = \frac{X}{A} = \frac{\frac{F_R \cdot \cos(\alpha)}{4 \cdot \sin(\alpha)}}{(R^2 - r^2) \cdot \pi} \quad (4.27)$$

die maximalen Druckspannung σ_D im Bambus bestimmen. Durch den Vergleich der maximalen Spannungen mit der zulässigen Druckspannung σ_{zulD} [siehe Quelle 11] wird geprüft ob auch diese Kräfte vom Material aufgenommen werden können. Dabei muss gelten:

$$\sigma_D < \sigma_{zulD} \quad (4.28)$$

Auf den Bambusstab 4 wirken nur die Querkräfte Y aus den langen Bambusstäben 1 und 3. Für das wirkende Moment gilt

$$M = Y * \frac{l}{2} \quad (4.29)$$

Mit der Formel 4.26 kann analog wie zuvor durch probieren auf den benötigten Außenradius R für die kurzen Bambusstäbe geschlossen werden.

Abschließend wird das Aluminiumprofil betrachtet. Wie bereits in Kapitel 4.2 erläutert wird ein U-Profil verwendet, damit der Bambusrahmen aufgenommen werden kann. Damit der Bambusstab 4 in das Profil gesteckt werden kann, muss das Profil mit den entsprechenden Maßen ausgewählt werden. Anschließend wird die Festigkeit des Profils mit den Kantenlängen H , der Wandstärke WS_{Al} und der Länge L geprüft (siehe Abbildung 27).

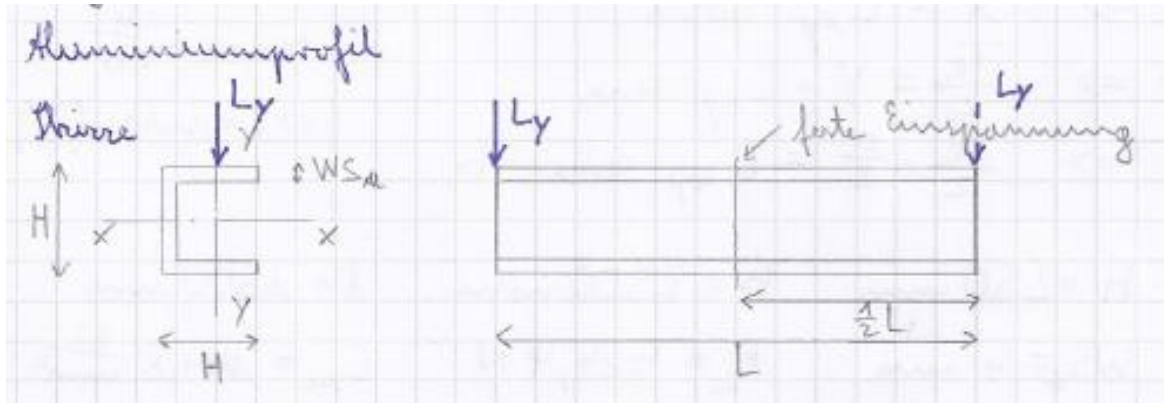


Abbildung 27: Querschnitt und statisches System des Aluminiumprofils

Die einzige Krafteinleitung in das Aluminiumprofil findet über die Pendelstützen, die darauf montiert sind, statt. Unter der Annahme, dass es sich um eine ideale Pendelstütze handelt, wirkt auf die beiden Enden des U-Profils jeweils die Kraft L_y . Es gilt:

$$L_y = L_{xy} * \sin(\alpha) = Y \quad (4.30)$$

Da das Profil in der Mitte fest eingespannt wird, kann das System wie ein einseitig eingespannter Biegebalken betrachtet werden. Für das Biegemoment M_x gilt somit

$$M_x = Y * \frac{L}{2} \quad (4.31)$$

Das Flächenträgheitsmoment J_x des U-Profils berechnet sich über die Formel

$$J_x = \frac{H^4}{12} - \frac{(H - WS_{Al}) * (H - 2 * WS_{Al})^3}{12} \quad (4.32)$$

Mit den errechneten Werten können über die Gleichung

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_x} * \frac{H}{2} \quad (4.33)$$

die auftretenden Biegespannungen im Aluminiumprofil bestimmt werden. Diese müssen mit den maximal zulässigen Spannungen für den Werkstoff AlMgSi0,5 [siehe Quelle 12, S.166] verglichen werden und dürfen ihn nicht übersteigen.

[13]

5 Kippmechanismus

(Verfasst von Sedlmayr T.)

5.1 Anforderungen an den Kippmechanismus

Die Anforderungsermittlung wurde zusammen mit Herrn Hafner und Herrn Franetzki zu Beginn dieser Arbeit gemacht. In ihr sind alle notwendigen Größen, Werte und sonstige Informationen enthalten. Mit der Durchführung eines Brainstormings wurden im ersten Schritt sämtliche Punkte gesammelt, die in irgendeiner Weise die Konstruktion beeinflussen könnten. Die Erstellung einer Anforderungsliste folgte im zweiten Schritt. Dabei wurde jeder einzelne Punkt besprochen und daraus spezielle Anforderungen wie z.B. die Art des Kippmechanismus festgelegt, damit geeignete und überschaubare Bedingungen für das Projekt entstehen. Folgende Punkte stellen sämtliche Punkte dar, welche im Rahmen der Anforderungsliste erstellt wurden:

- **Anforderungen an den Kippmechanismus:**

- Soll für Windgeschwindigkeiten bis max. 12 m/s funktionieren
- Kippvorgang soll aktiv eingeleitet werden
- Soll in Entwicklungsländer umsetzbar sein (möglichst billige und einfache Technologie)
- Soll kein zusätzliches Gewicht für das Segel bedeuten
- Soll Witterungsbeständig sein
- Soll mit der „Kraftwerksinternen“ Energie funktionieren
- Soll keinen Energieverlust bedeuten

Diese Anforderungen dienen somit als Richtlinien. Denn ist das Projekt abgeschlossen, kann jeder Punkt mit Blick auf die Anforderungen überprüft werden, ob das Ziel eingehalten wurde oder, ob evtl. einige Punkte überarbeitet bzw. verbessert werden müssen.

5.2 Bewertung verschiedener Teillösungen mittels eines Morphologischen Kastens

Mithilfe zuvor ermittelter Bedingungen und Forderungen werden im nächsten Schritt verschiedene Lösungen für den Kippmechanismus ermittelt. Das Finden

dieser Lösungen wurde durch Recherchen erleichtert. Damit die Zweckmäßigste Lösung ausgewählt wird, werden zunächst Kriterien eingeführt, mit denen sich die einzelnen Lösungen vergleichen lassen. Aufgrund der Tatsache, dass manche Merkmale von größerer Bedeutung sind, werden diese zunächst in Tabelle 6 gegeneinander abgewogen.

Tabelle 6: Gewichtung der einzelnen Kriterien

Gewichtung	Preis	zu bewegendes Gewicht	Gewährleistung d. Vorg.	benötigtes technisches Know-How	Summe	Prozent
Preis	1	0	0	1	2	12,50%
Gewicht	2	1	0	2	5	31,25%
Gewährleistung d. Vorgangs	2	2	1	2	7	43,75%
benötigtes technisches Know-How	1	0	0	1	2	12,50%
					16	100,00%

Hierbei wird deutlich, dass das sichere Umkippen (Gewährleisten des Vorgangs) als wichtigstes Kriterium hervorgeht, gefolgt vom Gewicht.

In Tabelle 7 werden jeder Eigenschaft bestimmte Werte zugewiesen.

Tabelle 7: Punkteskala nach VDI 2225

VDI Punkteskala	0	1	2	3	4
Preis	>100 €	<100 €	<50 €	<25 €	<10 €
zu bewegendes Gewicht	>3 kg	<3 kg	<2 kg	<1 kg	0 kg
Gewährleistung des Umkippvorgangs	unsicherer Kippvorgang	nur bei starkem Wind	nur bei leichtem Wind	bei nahezu allen Bdg.	bei allen Bdg.
benötigtes technisches Know-How	hohes Wissen benötigt	-	für technisch versierte	-	für jedermann machbar

Abschließend kommt es in Tabelle 8 zur Zuweisung der entsprechenden Punktzahl zu den einzelnen Teillösungen und Verrechnung mit den Gewichtungsfaktoren, die für den Kippmechanismus gefunden wurden. Damit den einzelnen Bauteilen jedoch eine bestimmte Punktzahl zugeteilt werden kann, mussten sämtliche Daten für die verschiedenen Anbaumöglichkeiten mithilfe einer Literaturrecherche und Produktkatalogen ermittelt werden.

Tabelle 8: Bewertung der Teillösung mithilfe Gewichtungsfaktoren

	Preis	zu bewegendes Gewicht	Gewährleistung d. Vorg.	benötigtes technisches Know-How	Summe	Summe gewichtet
2 entgegengerichtete Drehfedern	4	3	0	4	11	1,94
Kombination aus Anschlag und Drehfeder	4	3	2	4	13	2,81
Elektromotor unten mit Anschlag	1	4	4	2	11	3,38
2 Elektromotoren an Katze	0	2	4	2	8	2,63

Als Lösung für den Kippmechanismus geht schließlich ein Elektromotor, der zwischen Masten und Gleichrichtgetriebe sitzen soll, hervor. Er überzeugt in fast allen Punkten und muss somit im nächsten Schritt an die Konstruktion angepasst bzw. ausgesucht werden.

5.3 Auswahl eines passenden Elektromotors

Ziel dieses Motors ist es die Katze am oberen und unteren Kippvorgang zu unterstützen, indem er die Kette in die entsprechende Richtung weiterzieht. Dadurch wird der Rahmen gegen den Anschlag gefahren und das Segel kann kippen. Die Anordnung der einzelnen Komponenten verdeutlicht Abbildung 28. Damit ein passender Motor gewählt werden kann, werden nachfolgend das benötigte Drehmoment sowie die nötige Drehzahl des Motors berechnet. Die komplette Anlage ist auf einen maximalen Wind von 12 m/s ausgelegt, d.h. der Kippmechanismus und somit auch der Motor müssen auf diese Windstärke ausgelegt werden.

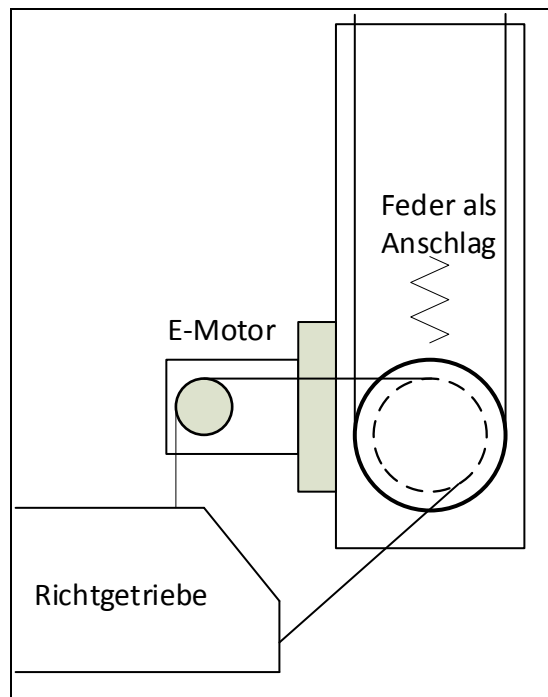


Abbildung 28: Angeflanschter Motor am Masten

Um gewährleisten zu können, dass das Segel immer im selben Winkel zum Wind steht, wird dieses mit Magneten im angestellten Zustand gehalten. Aufgrund der Tatsache, dass das Segel genau mittig drehend gelagert ist, gleichen sich die Momente ausgehend vom Wind auf das Segel aus wie es in Abbildung 29 dargestellt wird.

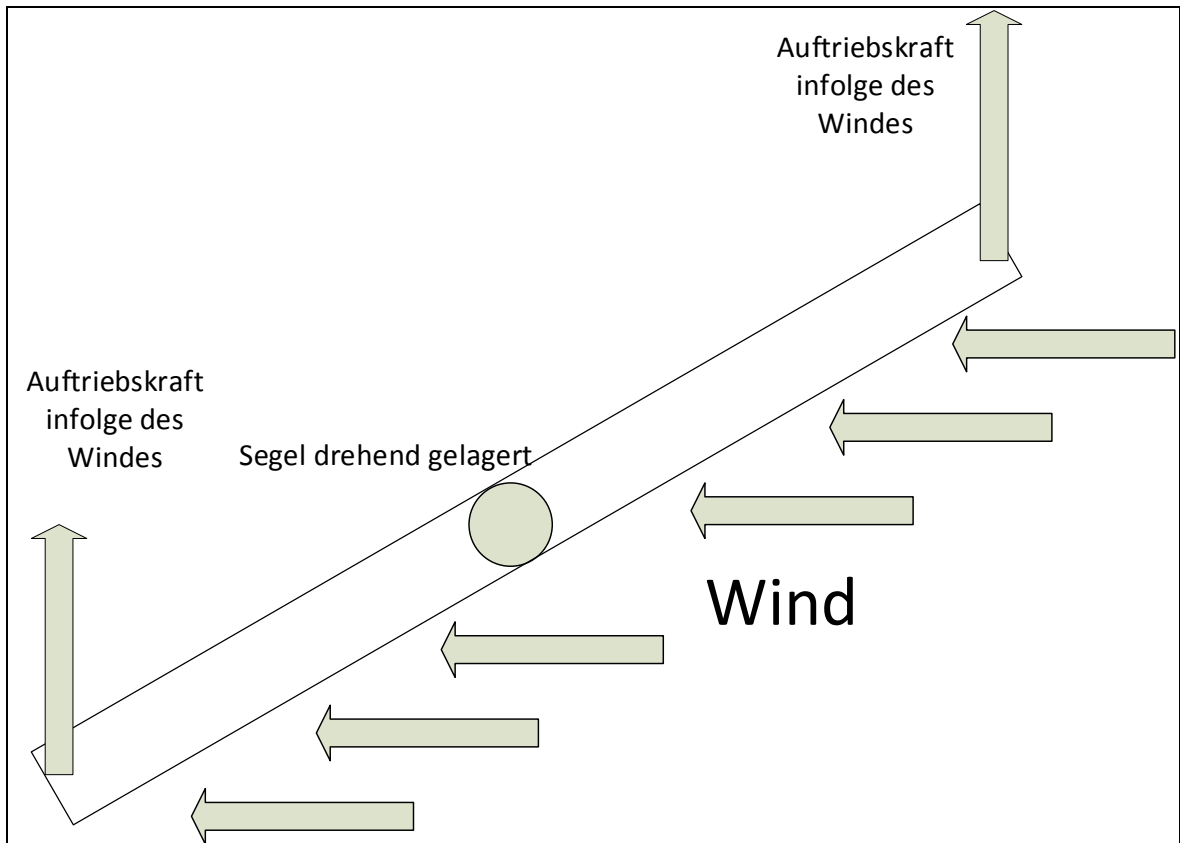


Abbildung 29: Momente auf das Segel infolge der Windkraft

Soll das Segel also gekippt werden, muss nur das Moment ausgehend von der Magnetkraft auf das Segel überwunden werden. Mit nachfolgender Geometrie (Abbildung 30) kann auf die benötigte Kraft auf die Kette geschlossen werden, mit der der Motor die Katze unterstützen muss.

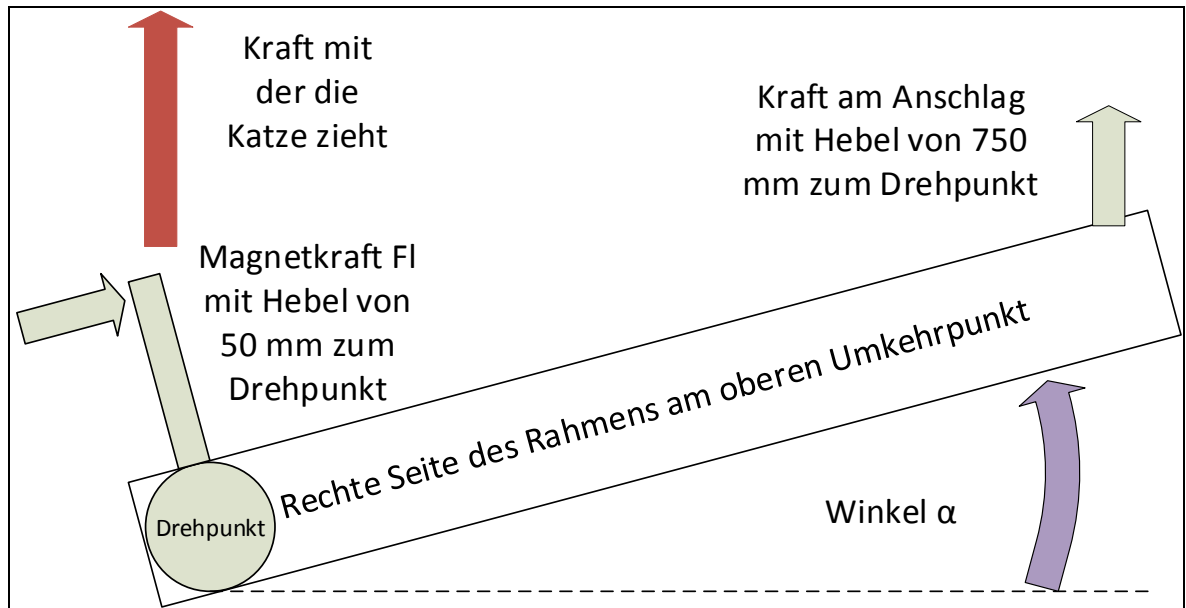


Abbildung 30: Geometrie um den Drehpunkt mit angreifenden Kräften

Aufgrund der Tatsache, dass die Magnete noch vom Prototyp stammen, ist deren Kraft auch nicht bekannt. Zum Herausfinden der Magnetkraft wurde deshalb ein Selbstversuch durchgeführt. Hierbei wurde der Magnet in einen Schraubstock eingespannt. Das Gegenstück wurde an einem Federkraftmesser befestigt und mit der Hand langsam nach oben gezogen. Dieser Versuch wurde mehrmals durchgeführt und führte zu folgender Ergebnisreihe.

Tabelle 9: Versuchsreihe Magnetkraftermittlung

Versuch	1	2	3	4	5
Kraft	40 N	45 N	38 N	44 N	39 N

Die Schwankung der Kräfte lässt sich dadurch erklären, dass das Gegenstück möglicherweise nicht immer ganz senkrecht nach oben gezogen wurde. Zur Sicherheit jedoch wird die größte Kraft als Magnetkraft und 20° für den Anstellwinkel α angenommen. Mit nachfolgendem Momentenansatz ergibt sich damit die Kraft am Anschlag.

$$F_M * l_M = F_A * l_A * \cos\alpha \quad (5.1)$$

Umgestellt nach der Magnetkraft F_A und die Werte eingesetzt ergibt sich:

$$F_A = \frac{F_M * l_M}{l_A * \cos\alpha} = \frac{45 \text{ N} * 50 \text{ mm}}{750 \text{ mm} * \cos 20^\circ} = 3,2 \text{ N} \quad (5.2)$$

Mithilfe dieser Kraft wird im Anschluss die Kraft an der Kette berechnet, die dazu benötigt wird die Kraft am Anschlag auszuüben. Dies geschieht auf die gleiche Art erneut mit einem Momentenansatz. Das Moment um den Drehpunkt des Kettenritzels muss dabei dem Moment am Drehgelenk des Rahmens entsprechen.

$$F_A * l_A * \cos\alpha = F_K * r_R \quad (5.3)$$

Aufgelöst und mit eingesetzten Werten ergibt sich für die Kettenkraft:

$$F_K = \frac{F_A * l_A * \cos\alpha}{r_R} \quad (5.4)$$

$$F_K = \frac{3,2 \text{ N} * 750 \text{ mm} * \cos 20^\circ}{90 \text{ mm}} = 25,1 \text{ N}$$

Über das Verhältnis der Zähnezah aus dem äußeren zum inneren (vgl. Abbildung 28) kann die Kettenkraft am Motor bestimmt werden.

$$F_{KM} = F_K * \frac{N_R}{N_{RM}} \quad (5.5)$$

$$F_{KM} = 25,1 \text{ N} * \frac{45}{42} = 27 \text{ N}$$

Das Drehmoment am Motor ergibt sich mithilfe des angebauten Ritzels. Der Durchmesser hierfür ist allerdings noch nicht bekannt. Deshalb wird ein Radius und damit ein Hebelarm von 4 cm angenommen. Für das benötigte Drehmoment ergibt sich somit:

$$M_M = F_{KM} * r_M \quad (5.6)$$

$$M_M = 27 \text{ N} * 0,04 \text{ m} = 1,08 \text{ Nm}$$

Mit einer Sicherheit von 2, muss der Motor also mindestens 2,2 Nm haben. Der nächste Schritt besteht in der Berechnung der benötigten Drehzahl des Motors. Dazu wird angenommen, dass die Katze sich mit einem Drittel der Windgeschwindigkeit bewegt (siehe Kapitel 2.1.5) Wie Anfangs erwähnt, ist das Projekt auf einen maximalen Wind von 12 m/s ausgelegt. Die Katze bewegt sich daher mit ca. 4 m/s. Über die Kettenverhältnisse ergibt sich somit eine Geschwindigkeit von 3,7 m/s für die Kette, an der der Motor befestigt ist. Der Umfang des Ritzels am Motor beträgt mit oben genannten Werten 0,25 m. Die Drehzahl errechnet sich dadurch zu:

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0,25 \text{ m}}{3,7 \text{ m/s}} = 0,068 \text{ s}$$

$$n = \frac{1}{0,068 \text{ s}} = 14,7 \text{ s}^{-1} = 883 \text{ min}^{-1}$$

Es wird also ein Motor mit einem Mindestdrehmoment von 2,2 Nm und einer Drehzahl von 883 U/min gesucht. Niedrigere Drehzahlen lassen sich bei einem Elektromotor mit der Spannung regulieren. Weil bereits aus einem anderen Windprojekt noch ein Elektromotor übrig ist, soll dieser auf die geforderten Werte überprüft werden und anschließend an die Konstruktion angepasst werden. Ein Vorteil dieses Motors ist, dass er keinen Permanentmagneten besitzt, das heißt wird dieser von der Stromversorgung getrennt bietet er keinen Widerstand. Dies ist besonders wichtig, da er die ganze Zeit mitläuft und nur am oberen bzw. unteren Umkehrpunkt anlaufen soll. Die Überprüfung wird allerdings wegen Zeitmangel und anderer nicht vorhersehbarer Komplikationen (Auflagen der Stadt Mannheim) erst in der nächsten Studienarbeit geschehen und dokumentiert.

6 Speichern der Energie am Umkehrpunkt

(Verf. von Sedlmayr T.)

Es wurde bereits mehrmals angesprochen, dass bei starkem Wind das Segel mit voller Wucht ohne abgebremst zu werden gegen die Anschläge am Umkehrpunkt fährt. Damit das Segel schonend aber sicher umkippen kann, ist in diesem Bereich eine Art Dämpfung notwendig. Hierbei würde die Energie aber verloren gehen, deswegen werden im Folgenden verschiedene Konzepte bewertet, die es ermöglichen diese Energie zwischen zu speichern und dem Segel in einem späteren Zeitpunkt wieder zuführen zu können. Dabei wurden zuerst erneut verschiedene Kriterien eingeführt, wonach derartige Lösungen miteinander verglichen werden können. Diese werden in Tabelle 10 gegeneinander abgewogen. Somit werden verschiedene Gewichtungsfaktoren erreicht (siehe Kapitel Kippmechanismus).

Tabelle 10: Gewichtung der einzelnen Bewertungsfaktoren

Gewichtung	Preis	Gewicht	benötigtes techn. Know-How	Energieverluste	Summe	Prozent
Preis	1	2	0	0	3	18,75%
Gewicht	0	1	0	0	1	6,25%
benötigtes techn. Know-How	2	2	1	1	6	37,50%
Energieverluste	2	2	1	1	6	37,50%
					16	100,00%

Als wichtigstes Element gehen hierbei die Energieverluste und das technische Know-How hervor. Das Projekt muss schließlich auch in Entwicklungsländer möglichst schnell und einfach aufgebaut werden können. Den einzelnen Faktoren werden in Tabelle 11 erneut bestimmte Werte mit unterschiedlicher Punktezahl zugewiesen.

Tabelle 11: Punkteskala nach VDI 2225

VDI Punkteskala	0	1	2	3	4
Preis	>20 €	<20 €	<15 €	<10 €	<5 €
Gewicht	>5 kg	<5 kg	<2 kg	< 1 kg	<0,5 kg
benötigtes techn. Know-How	hohes Wissen benötigt	-	für technisch versierte Teil kann	-	für jedermann machbar
Energieverluste	nur Dämpfung	-	wiederverw.	-	nahezu keine

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Teillösungen mit der Punkteskala bewertet.

Tabelle 12: Bewertung der einzelnen Teillösungen

	Preis	Gewicht	benötigtes techn. Know-How	Energieverl uste	Summe	Summe gewichtet
Federn am Umkehrpkt.	4	4	4	4	16	4,00
Speichern der Leistung auf Kond.	3	4	2	4	13	3,06
Einkuppeln von Schwungsc heibe	2	1	2	2	7	1,94

In einem ersten Schritt wird die Energie bei zu starkem Wind somit mithilfe einer einfachen Federkonstruktion aufgenommen. Diese wird gestaucht und gibt die Energie nach dem Umkehrvorgang in Form einer Beschleunigung des Segels dem System zurück. In einem Optimierungsschritt, wird die Feder in einem nachfolgenden Projekt abgemacht und die Energie, welche beim Bremsen mithilfe einer Vergrößerung der Lastabnahme der Lichtmaschine entsteht, in einem Kondensator gespeichert. Dieser speist anschließend den Motor, der das Segel kurzzeitig beschleunigen soll. Im Anschluss können beide Varianten miteinander verglichen werden und die leistungsoptimale Variante herausgefunden werden.

7 Steuerung

(Verf. von Sedlmayr T.)

7.1 Steuerungstechnische Überlegungen

Der Aspekt der Steuerung für den Elektromotor ist mit einer der wichtigsten Punkte in diesem Windprojekt. Hiervon hängt die Funktionsweise des Kippmechanismus ab, denn der Elektromotor muss „wissen“ wann er in welche Richtung drehen soll. Es muss daher ein Signal von außen bereitgestellt werden, durch dessen Impuls der Elektromotor sich zu drehen beginnt. Desweiteren darf dieser sich auch nur für eine bestimmte Zeit Δt drehen, solange bis das Segel gekippt ist. Danach muss die Stromzufuhr sofort wieder getrennt werden, damit der Motor keinen Widerstand bietet. Einfachstes Konzept zur Steuerung des Motors bietet Abbildung 31.

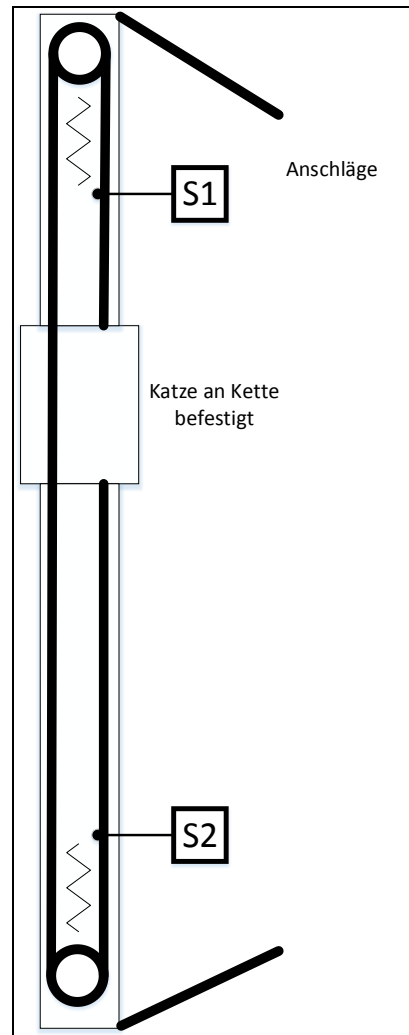


Abbildung 31: Schematische Anordnung von Kontakten zur Motorsteuerung

Hierbei sind zwei Reed-Kontakte jeweils am oberen und unteren Anschlag montiert. An der Katze befindet sich der benötigte Magnet, der beim vorbeifahren im Kontakt eine Spannung induziert und somit ein Signal auslöst. Ein Steuergerät erfasst dieses und schaltet den Motor für eine bestimmte Zeit an. Sendet der zweite Kontakt einen Impuls, muss das Steuergerät die Spannung so regulieren, dass der Motor in die andere Richtung dreht. Der steuerungstechnische Ablaufplan wird in Abbildung 32 verdeutlicht.

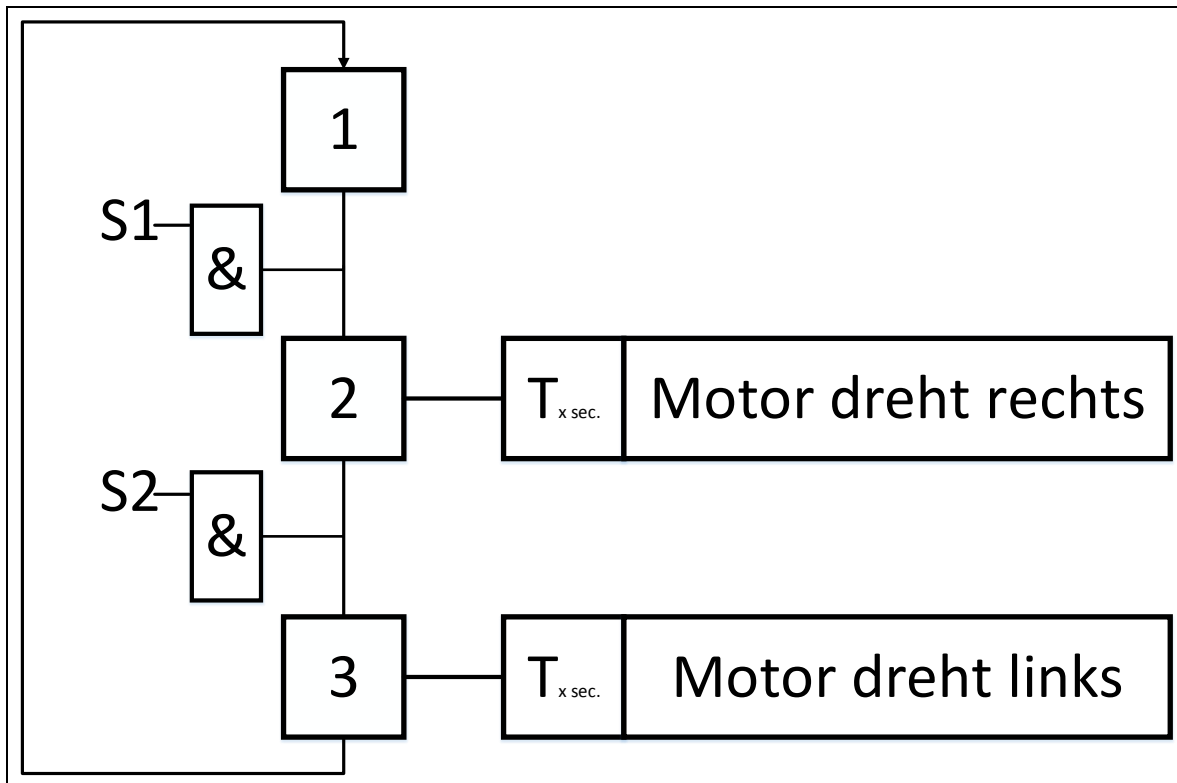


Abbildung 32: Ablaufplan des Motors

Dies ist der einfachste Fall wie eine derartige Steuerung aussehen könnte. Es gibt deswegen auch eine Menge Verbesserungspotential, welches in Kapitel 8 näher erläutert wird..

Damit die komplette Anlage wirtschaftlich ist, muss die Lichtmaschine in irgendeiner Art und Weise Strom produzieren und in einer Batterie zwischenspeichern oder sofort an einen Verbraucher weitergeben. Mithilfe der Stromabnahme kann zusätzlich die Geschwindigkeit der Katze gesteuert werden (Vertiefung in Kapitel 8), da sich die Lichtmaschine je mehr Strom abgenommen wird, schwerer drehen lässt. In einem ersten Konzept jedoch, wird der Strom in einer Batterie zwischengespeichert und für den Elektromotor genutzt. In dieser Konstellation wird zunächst getestet, ob das Konzept mit dem Motor richtig funktioniert und das Segel auch sicher umkippen lässt. Damit zugleich auch ein Verbraucher simuliert wird, wird ein regelbarer Widerstand eingebaut. Dieser wird zunächst per Hand an die jeweiligen Windverhältnisse angepasst. Mithilfe dieser Annahmen lässt sich somit ein vereinfachter Stromlaufplan, der in Abbildung 33 dargestellt ist, konstruieren.

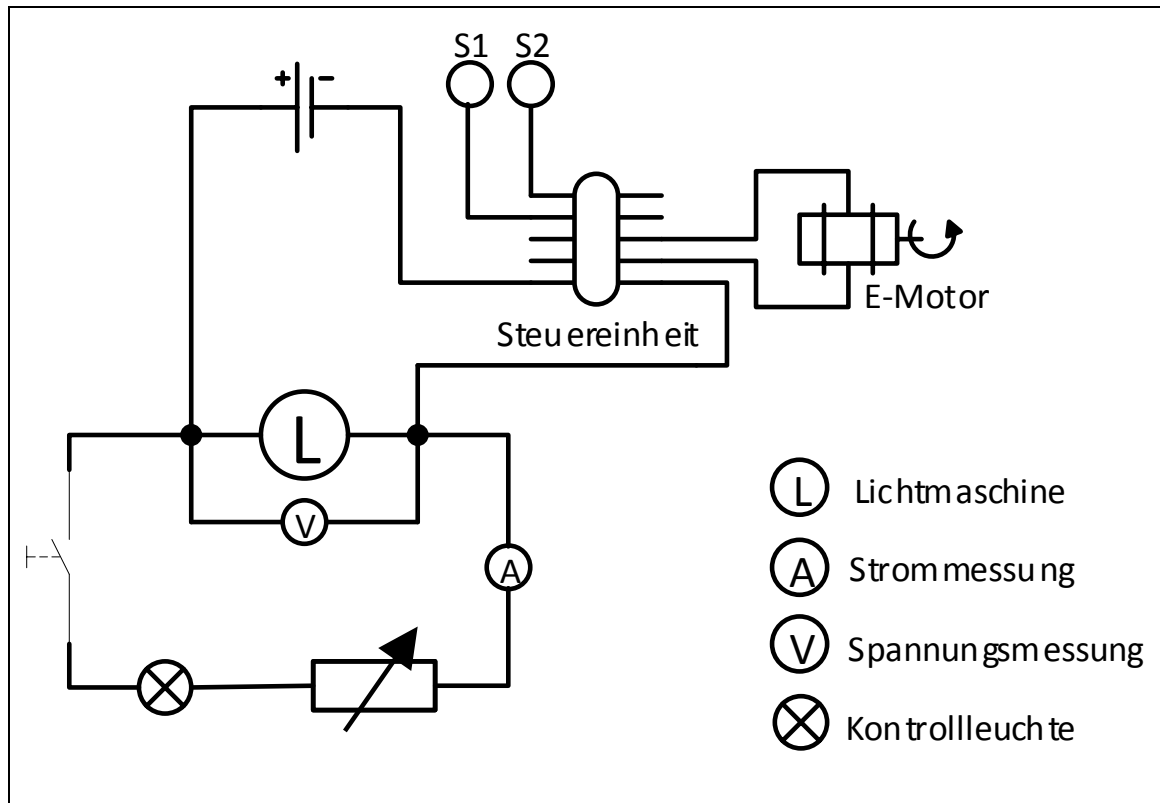


Abbildung 33: Vereinfachter Schaltplan

Das Volt- sowie Amperemeter und die Kontrollleuchte dienen zur äußeren Beobachtung. Eingeschalten wird die „Verbraucherseite“ händisch mit einem Schalter. Mithilfe zweier Sensoren kann so der Elektromotor gesteuert werden und der Verbraucher wird durch einen regelbaren Widerstand ersetzt.

7.2 Praktische Umsetzung mittels Schützschtaltung

Die Umsetzung mithilfe einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) erwies sich als relativ aufwendig und vor allem teuer, um nur die Funktion des Motors zu testen. Deshalb wird auf eine etwas veraltete aber trotzdem praktische Lösung zurückgegriffen, einer sogenannten Schützschtaltung. Die Magnetschalter kommen jedoch weiterhin zum Einsatz, die einen Impuls geben und somit die Lage der Katze an den Umkehrpunkten festlegen. Dadurch wird jeweils ein Zeitschutz gesteuert, das für eine bestimmte Zeit Strom an den Motor weitergibt und dieser sich damit dreht. Aufschluss über die Schaltung gibt Abbildung 34. Überfährt die Laufkatze somit den Magnetschalter I1, schließt dieser kurz und betätigt das Zeitschutz Z1. Dieses schließt für eine von Hand einstellbare Zeit Δt seine Schließkontakte und lässt somit den Motor in eine bestimmte Richtung drehen.

Wird der zweite Magnetkontakt I2 überfahren Schaltet dieser das Zeitschütz Z2 und der Motor dreht für eine bestimmte Zeit in die andere Richtung.

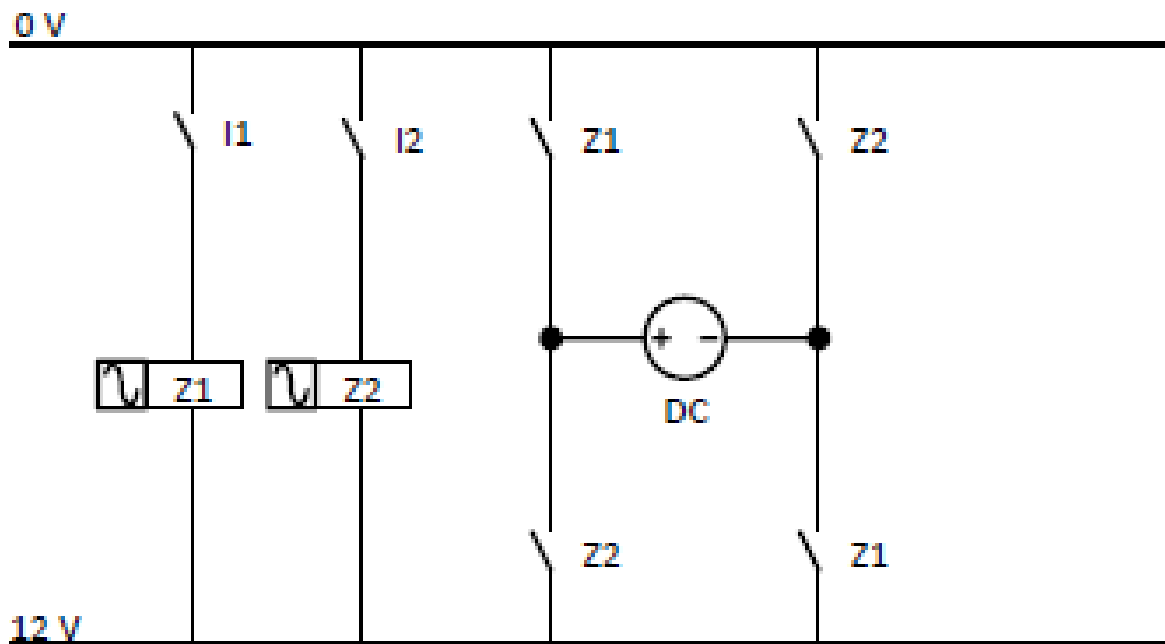


Abbildung 34: Motorsteuerung mittels Zeitschütz

Die Prüfung im Labor an einer Steckwand mit oben genannten Bauteilen und einem Gleichstrommotor erwies sich als positiv. Abbildung 35 zeigt die Steckwand im Labor mit der Schaltung und dem Motor.

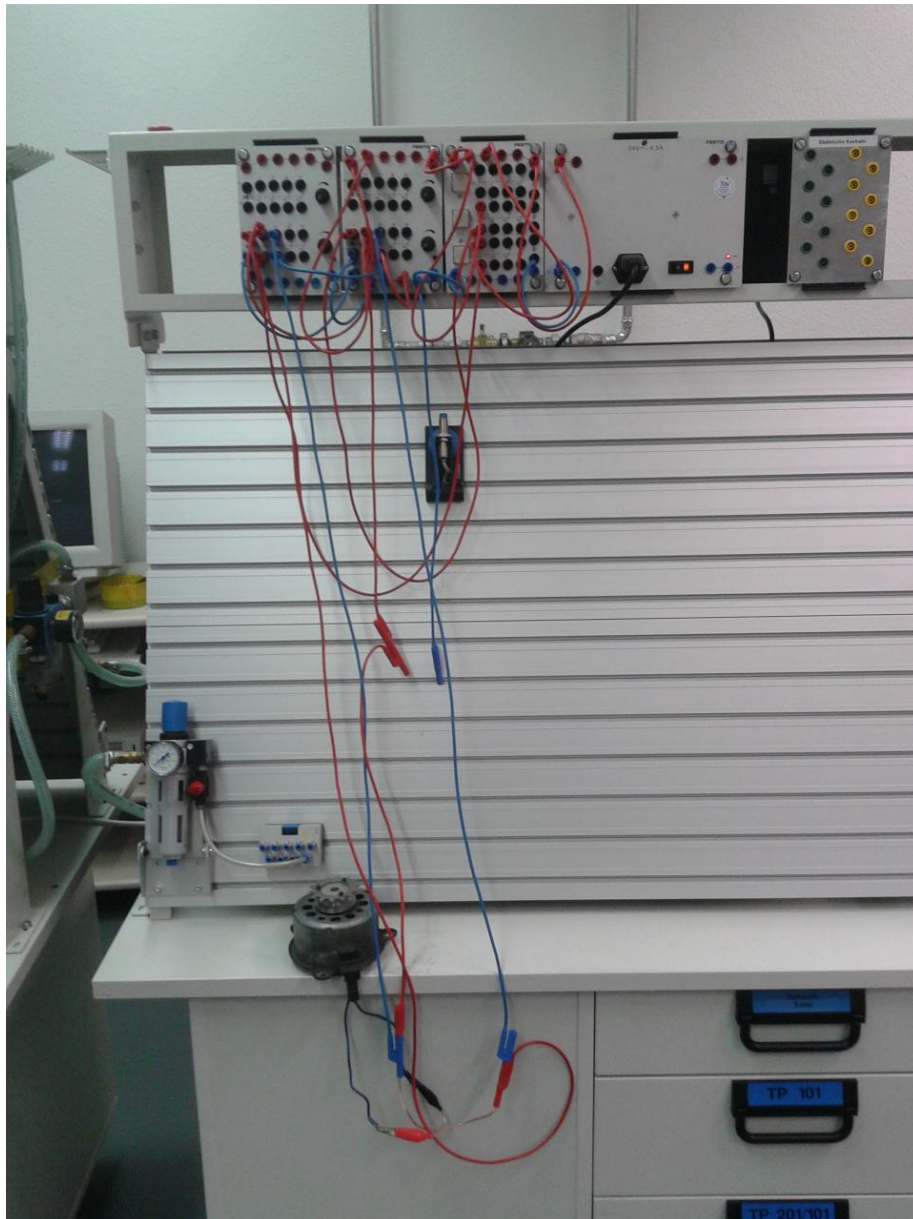


Abbildung 35: Prüfung der Schaltung an einer Steckwand im Labor

8 Ansätze zur Leistungsoptimierung

(Verf. von Sedlmayr T.)

Die Steuerung der Leistungsabnahme an der Lichtmaschine mit einem regelbaren Widerstand, der per Hand eingestellt werden muss, ist definitiv nicht die optimale Lösung. Außerdem ist es sicherlich nicht wirtschaftlich den Motor immer einzuschalten, auch wenn der Wind für den Kippvorgang ausreichen würde. Deshalb wird im Folgenden auf verschiedene Fälle eingegangen, wie die maximale Leistung aus dem Generator entnommen werden kann. Dazu werden

drei verschiedene Konzepte verfolgt, die in einer weiteren fortführenden Studienarbeit näher untersucht werden und somit die beste Lösung ermittelt werden kann. Zuerst wird jedoch auf die grundlegenden Energien in diesem System eingegangen. Zum einen gibt es die kinetische Energie der Katze, die abhängig von der Geschwindigkeit und somit auch von der Windstärke ist. Am Umkippvorgang tritt eine zweite Energie auf. Wie bereits erwähnt ist dort eine Feder montiert, die um einen bestimmten Betrag Δs gestaucht werden muss, damit das Segel an den Anschlag fahren kann und somit kippt. Die letzte Energie besteht im Umkippvorgang selbst, diese ist aber nicht bekannt und muss durch Versuche ermittelt werden. Ausgehend von Abbildung 36 und oben genannten Annahmen lässt sich somit eine Energiegleichung aufstellen.

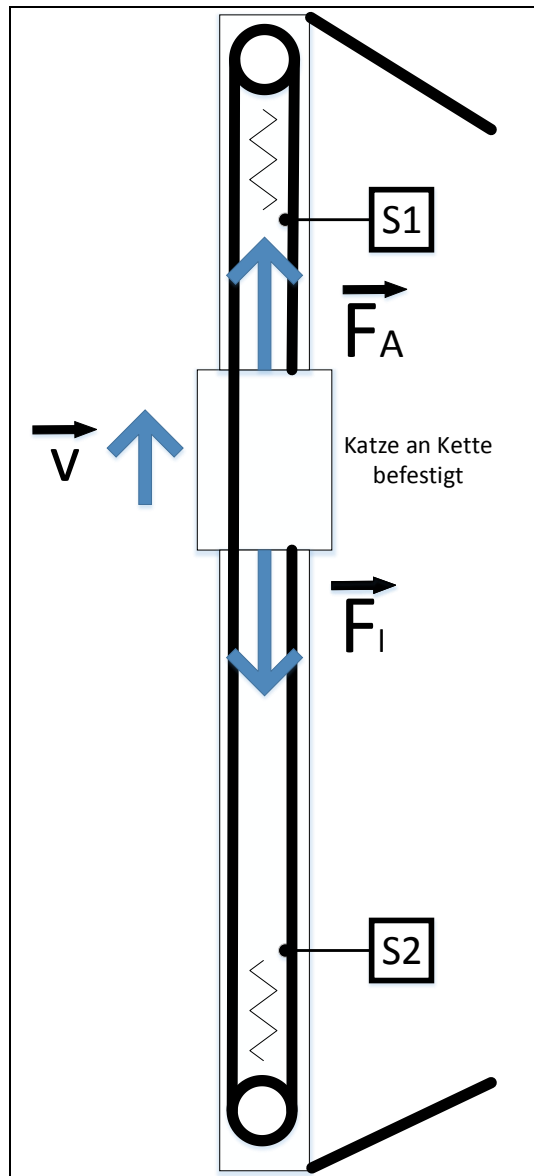


Abbildung 36: Angreifende Kräfte an der Katze

Die Energie der Katze muss somit größer sein als die benötigte Energie zur Stauchung der Feder plus die Energie, die für den Kippvorgang selbst benötigt wird, die immer konstant und aus den verwendeten Federkenngrößen bekannt sind. Es muss also folgendes gelten:

$$E_{kin} > E_F + E_K \quad (8.1)$$

$$0,5 * m_K * v^2 > 0,5 * c_F * \Delta s^2 + E_K$$

Es lässt sich aus oben gezeigter Abbildung ebenfalls erkennen, dass die Geschwindigkeit nicht nur von der Auftriebskraft, sondern auch von der Kraft der Lichtmaschine, die entgegenwirkt abhängt und je nach Leistungsabnahme variiert. Über folgenden Zusammenhang kann so über die Leistung auf die

Geschwindigkeit geschlossen werden, wenn ein verlustfreies System angenommen wird:

$$P_L = U * I \quad (8.2)$$

$$P_K = F_L * v_K \quad (8.3)$$

Wird nun angenommen, dass die Geschwindigkeit kurz vor dem Umkippvorgang konstant ist, bedeutet dies dass die Auftriebskraft gleich der Kraft der Lichtmaschine ist und so das Segel nicht mehr weiter beschleunigt wird. Mithilfe dieser Zusammenhänge lassen sich somit folgende Ansätze zur Leistungsoptimierung aufstellen.

Ansatz 1: Beschleunigung der Katze auf v_{\max}

Grundlegende Idee dieses Ansatzes ist es die Katze immer auf maximale Geschwindigkeit zu beschleunigen, indem die Leistungsabnahme an der Lichtmaschine konstant gehalten wird. Die Geschwindigkeit der Katze wird dann entweder über die Leistung abgefragt oder über mehrere verteilte Sensoren an einem der beiden Ritzel über das die Kette der Katze läuft. Vorteil dieser Lösung wäre es, neben der stetigen Geschwindigkeitserfassung auch eine Wegerfassung zu ermöglichen und somit den Motor zu steuern, wenn die Mindestgeschwindigkeit für den Umkippvorgang nicht erreicht ist. Durch die Wegerfassung kann zudem die Zeit des laufenden Motors bestimmt werden.

Ansatz 2: Beschleunigung der Katze auf 1/3 der Windgeschwindigkeit

Recherchen zufolge ist bei einer Katzengeschwindigkeit von einem Drittel der Windgeschwindigkeit die Steigleistung am größten. Die Geschwindigkeit wird dabei über einen regelbaren Widerstand, der je nach Windstärke von der Steuereinheit so geregelt wird, dass die Kraft die die Lichtmaschine erzeugt genau so groß ist, dass sich ein oben genanntes Geschwindigkeitsverhältnis einstellt. Da die Auftriebskraft gleich der entgegenwirkenden Kraft, die vom Generator erzeugt wird, kann zudem auf die Windgeschwindigkeit geschlossen werden, da für ein Segel folgende Formel gilt.

$$F_A = c_a * \frac{\rho}{2} * A_{Fl} * w_{\infty}^2 \quad (8.4)$$

Über die Beziehung der Leistung, kann die Steuereinheit so jederzeit errechnen, wie viel Strom entnommen werden muss, um eine gewisse Geschwindigkeit an der Katze zu erhalten. Dennoch werden Sensoren benötigt, die ein Signal geben, wenn der Motor starten muss. Dies kann nun wieder wie in Ansatz 1 beschrieben auf 2 Arten geschehen. Der Motor startet allerdings auch hier nur wieder wenn die Katze eine bestimmte Mindestgeschwindigkeit nicht erreicht.

Ansatz 3: Mechanische Winkeleinstellung

Dieser Ansatz versucht das Problem der Geschwindigkeit rein mechanisch in den Griff zu bekommen. Hierbei wird eine windabhängige Winkeleinstellung des verwendet. Dies geschieht mit einem elastischen Element, wie beispielsweise einer Feder. Je nach Windstärke neigt sich das Segel also unterschiedlich stark, sodass die Auftriebskraft immer dieselbe ist und stets die Mindestgeschwindigkeit erreicht wird. Bei ganz geringem Wind hingegen, stellt sich erneut das Problem ein, dass die Energie des Segels nicht mehr ausreicht und durch den Motor am Kippvorgang unterstützt werden muss. Abhilfe von jeglicher elektrischer Unterstützung, wird nur durch einen definierten Windgeschwindigkeitsbereich, in dem das Windkraftwerk immer umkippen kann, geschafft.

Durch die Auswertung und Dokumentation der verschiedenen Ansätze, kann im Anschluss auf die optimale Lösung geschlossen werden. Im Hinblick darauf, dass das Windkraftwerk in Entwicklungsländer als billigere Alternative zu einem Windrad zum Einsatz kommt, muss natürlich auch auf die technische Umsetzbarkeit und Rentabilität bei der Bewertung der einzelnen Ansätze Rücksicht genommen werden.

9 Statik des Segelkraftwerks

(Verfasst von Marco Hafner)

Da es sich beim Segelkraftwerk um ein Windkraftwerk handelt, das in windigen Gegenden aufgestellt und genutzt werden soll, ist die Anlage ständig den Kräften des Windes ausgesetzt. Durch die Länge des Masten ergeben sich daraus große

Widerstandskräfte und Momente. Damit die Anlage trotzdem sich aufgestellt und betrieben werden kann, ist es nötig die Statik zu prüfen.

Die Anlage kann zwei unterschiedliche Zustände haben:

[1] Betriebszustand:

In diesem Zustand sind die Segel gesetzt und die Anlage arbeitet. Dieser Zustand ist nur bis zu einer Windgeschwindigkeit von $12 \frac{m}{s}$ zulässig, da das Segel nur bis zu dieser Windgeschwindigkeit ausgelegt wurde.

[2] Stillstand:

Bei diesem Zustand sind die Segel der Anlage gerefft oder sogar demontiert und die Katze in die untere Anschlagstellung gefahren. Dieser Zustand wird eingenommen, wenn keine Energie produziert werden soll oder aufgrund von Windgeschwindigkeiten über $12 \frac{m}{s}$ kein Betrieb möglich ist.

Da noch nicht abzuschätzen ist bei welchem Zustand die größeren Kräfte auf den Masten und die Abspannseile wirken, müssen beide Fälle betrachtet werden.

9.1 Betriebszustand

Die Widerstandskräfte F_{Wges} , die im Betriebsfall auf den Masten wirken, setzen sich zusammen aus der horizontalen Komponente der resultierenden Windkraft F_{Rh} auf die Segel und der Widerstandskraft F_{WM} des Mastens.

$$F_{Wges} = F_{Rh} + F_{WM} \quad (9.1)$$

Wie in Abbildung 37 zu sehen ist, lässt sich die Kraft F_{Rh} auf den Masten, die durch das Segel entsteht, über die Winkelfunktionen berechnen.

$$F_{Rh} = 2 * F_R * \cos(\xi + \varphi) \quad (9.2)$$

$$\xi = \arccos\left(\frac{F_{W\perp}}{F_R}\right) \quad (9.3)$$

Mit dem Faktor 2 wird berücksichtigt, dass zwei Segel an der Katze hängen. Der Winkel φ und die Kraft $F_{W\perp}$ wurden bereits in Kapitel 4.3 berechnet.



Abbildung 37: Geometrische Beziehung

Die Widerstandskraft F_{WM} setzt sich aus der Kraft F_{WSt} auf die Endstangen und der Kraft F_{WALS} auf die schmale Seite des Aluminiumprofils zusammen. Im Betriebszustand richtet sich die gesamte Anlage immer im Wind aus, wodurch die schmale Seite immer zum Wind zeigt.

$$F_{WM} = 2 * F_{WSt} + F_{WALS} \quad (9.4)$$

Mit den geeigneten Widerstandsbeiwerten für Rundstangen c_{St} und Rechteckflächen $c_{\blacksquare s}$ lassen sich beide Kräfte berechnen.

$$F_{WSt} = c_{St} * \frac{\rho}{2} * A_{St} * v_{Wind}^2 \quad (9.5)$$

$$F_{WALS} = c_{\blacksquare s} * \frac{\rho}{2} * A_{Als} * v_{Wind}^2 \quad (9.6)$$

A_{St} und A_{Als} sind jeweils die Projektionsflächen der angeströmten Körper.

Das Moment M auf den Masten kann über die bekannte Kraft F_{Wges} bestimmt werden. Es gilt:

$$M = \frac{1}{2} * h * \frac{F_{Wges}}{2} \quad (9.7)$$

Zur Berechnung der auftretenden Biegespannungen σ wird die Formel

$$\sigma = \frac{M}{J} * s \quad (9.8)$$

verwendet. M ist hierbei das Biegemoment auf den Mast, J das Flächenträgheitsmoment des Masten-Querschnitts und s der Abstand zur neutralen Faser.

Die jeweiligen Biegespannungen in den Endstangen aus Stahl [siehe Quelle 12, S.127] und dem Aluminiumprofil [siehe Quelle 12, S.166], müssen unter den maximal zulässigen Spannungen bleiben.

Als nächstes wird die Zugbelastung L_1 der Stahlseile an der Spitze des Mastens berechnet. Dazu wird zunächst einmal das vorliegende System betrachtet (siehe Abbildung 38, links). Der ungünstigste und somit interessante Fall ist, wenn die Katze mit den Segeln am obersten Punkt des Aluminiumprofils ist. Weiter wird angenommen, dass nur ein Abspannseil die ganzen Kräfte aufnehmen muss. Dadurch ergibt für das Momentengleichgewicht

$$0 = F_{Rh} * (l_1 + l_2) + F_{WM} * \left(\frac{l_1}{2} + l_2\right) - L_{1x} * (2 * l_2 + l_1) \quad (9.9)$$

Durch Umformen und Auflösen nach der x-Komponente der Seilkraft L_1 erhält man

$$L_{1x} = \frac{F_{Rh} * (l_1 + l_2) + F_{WM} * \left(\frac{l_1}{2} + l_2\right)}{2 * l_2 + l_1} \quad (9.10)$$

Um von L_{1x} auf L_1 schließen zu können wird noch der Winkel, den die Abspannseile zur Horizontalen haben, benötigt. Prinzipiell gilt, je steiler der Winkel zwischen dem Abspannseil und der Horizontalen ist, desto größer ist die resultierende Kraft L_1 . Da der schlimmste Fall betrachtet wird, ist der maximal mögliche Winkel ε_{max} zu bestimmen. Dazu wird die rechte Skizze aus Abbildung 38 betrachtet. Damit die Funktion der Anlage nicht gestört wird - Drehung um die Achse des Mastens muss möglich sein - dürfen die Segel am höchst möglichen Punkt nicht mit den Abspannseilen kollidieren. Somit ergibt sich für den Winkel

$$\varepsilon_{max} = \arctan\left(\frac{l_2}{b_{segel}}\right) \quad (9.11)$$

Über die Beziehung

$$L_1 = \frac{L_{1x}}{\cos(\varepsilon_{max})} \quad (9.12)$$

kann nun auf die am Stahlseil wirkende Kraft bestimmt werden. Aus dem Vergleich der Kraft L_1 mit den zulässigen Zugkräften für ein 4 mm Stahlseil kann ermittelt werden ob der Masten sicher steht.

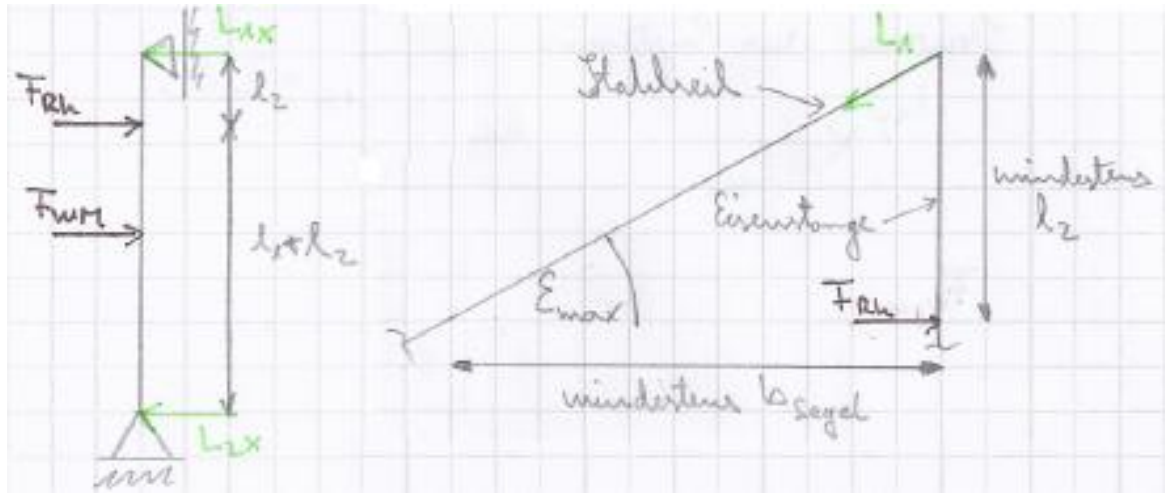


Abbildung 38: Statisches System zur Berechnung der maximalen Zugkraft im Stahlseil [13]

9.2 Stillstand

Aus den Berechnungen in Kapitel 9.1 ist zu erkennen, dass das schwächste Glied der Anlage die Rundstangen an den Enden des Mastens sind. Deshalb ist es hier besonders interessant zu wissen, bis zu welcher Windgeschwindigkeit der Masten den wirkenden Kräften standhalten kann.

Dazu wird von den maximal zulässigen Biegespannungen auf die Windgeschwindigkeit zurückgeschlossen. Durch umformen der Formel 9.8 und gleichsetzen mit der Formeln 9.7 erhält man nach dem Auflösen nach F_{Wges} die maximal erlaubte Widerstandskraft F_{Wmax} auf den Masten.

$$F_{Wmax} = \frac{4 * \sigma_{zul} * J}{h * s} \quad (9.13)$$

Wegen den fehlenden Segel, richtet sich die Windkraftanlage nicht mehr in den Wind. Dadurch kann der ungünstigere Fall auftreten, dass sich die größere Fläche A_{Alb} des Aluminiumprofils zum Wind stellt und die Widerstandskraft F_{WALb} erzeugt. Somit gilt für die Widerstandskraft F_{Wges} auf den Masten

$$F_{Wges} = F_{Wmax} = F_{WM} = 2 * F_{WSt} + F_{WALb} \quad (9.14)$$

Durch einsetzen der Formel 9.5 und der Gleichung

$$F_{WALb} = c_{\blacksquare b} * \frac{\rho}{2} * A_{Alb} * v_{Wind}^2 \quad (9.15)$$

in die Formel 9.14 folgt:

$$F_{Wmax} = 2 * c_{St} * \frac{\rho}{2} * A_{St} * v_{Wind}^2 + c_{\blacksquare b} * \frac{\rho}{2} * A_{Alb} * v_{Wind}^2 \quad (9.16)$$

Durch Ausklammern und Umformen der kann die maximal erlaubte Windgeschwindigkeit v_{Wind} berechnet werden.

$$v_{Wind} = \sqrt{\frac{2 * F_{Wmax}}{\rho * (2 * c_{St} * A_{St} + c_{\blacksquare b} * A_{Alb})}} \quad (9.17)$$

[13]

10 Montageanleitung

Damit das Segel von jedermann zusammengebaut werden kann, hilft folgende Anleitung bei der genauen Vorgehensweise. Schritt 1 besteht in der Montage der Katze. Hierbei werden sämtliche Rollen an die beiden Blechhälften geschraubt, die im Anschluss miteinander verbunden werden. Zugleich können die Lager und die Anschläge, die für die Kippvorrichtung verantwortlich sind, angeschraubt werden. In Schritt 2 wird das Herzstück des Projektes zusammengesetzt, das Segel. Dabei werden die Eckstücke aus Aluminium mit den Aluzylindern verschraubt und in die Bambusrohre eingeführt. Beide Teile werden anschließend miteinander verschraubt. Abbildung 39 stellt dieses System dar.

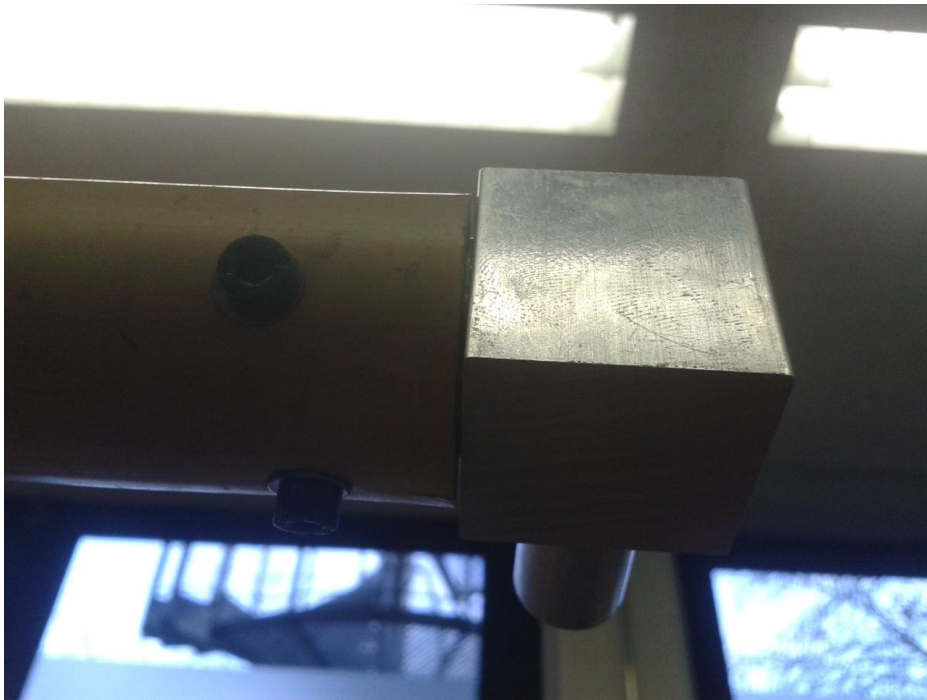


Abbildung 39: Eckstück mit Bambus verschraubt

Nachdem alle Bambusrohre mit den Eckstücken versehen sind, können diese zu einem Rahmen zusammengebaut werden. Gleichzeitig wird das Segel mit den Schlaufen auf den Rahmen aufgezogen und festgezurr, bevor mit dem vierten Bambusstab der Rahmen komplettiert wird. Nachfolgend wird ein U-Profil aus Alu um eine der kürzeren Bambusrohre gelegt, sodass die offene Seite des Profils nach innen zeigt. Auf dieses Profil werden weitere Aluprofile geschraubt. Auf diese wird je eine Platte gesetzt. Im dritten Schritt erfolgt die Verspannung der Segel. Hierfür werden Stahlseile von den Platten auf die Ecken gespannt um das ganze Segel in sich zu stabilisieren. Abbildung 40 zeigt das mit den Stahlseilen noch nicht verspannte Segel. In Schritt 4 wird die Katze an den Masten montiert, sodass nachfolgend die beiden verspannten Segel mit dem U-Profil und den Lagern an der Katze montiert werden können. Beide Segel werden an nach oben ragenden Aluprofilen mit weiteren Streben verstärkt, sodass die Gewichtskräfte beider Segel aufgehoben werden. Dies geschieht alles in einer gewissen Schräglage des Mastes bzw. am Boden.



Abbildung 40: Segel im nicht verspannten Zustand

Schritt 5 besteht nun noch darin das Richtgetriebe und den Motor an den Masten anzuflanschen und die Ketten in die Ritzel einzuhängen sowie das Gewicht zwischen Kette und Katze zu integrieren. Zusätzlich muss die Elektrik noch miteinander verdrahtet und verbunden werden, bevor der Mast schließlich mithilfe eines Fahrzeuges aufgestellt werden kann. Hierfür werden bereits zwei Stahlseile mit deren Ankern im Boden befestigt und die Bodenplatte so montiert, dass das ganze System nicht wegrutschen kann. Steht der Mast senkrecht wird der dritte Bodenanker und alle zusätzlichen Heringe der Bodenplatte montiert. Sind alle Stahlseile gespannt und ist das System sicher verschraubt, kann der erste Testlauf starten.

(Verfasst von Sedlmayr T.)

11 Zusammenfassung und Ausblick

Dass nachhaltige Energieerzeugung weltweit immer wichtiger wird, kann schon allein an den steigenden Benzinpreisen ausgemacht werden. Aufgrund dessen wurde in dieser Arbeit ein neuartiger Prototyp für ein Windkraftwerk überarbeitet und verbessert.

In diesem Rahmen wurde zunächst ein neues Segel für die Anlage konstruiert, das den Windkräften standhält aber trotzdem leicht ist. Das Ergebnis ist ein Segel, dessen Rahmen aus Bambus besteht. Für eine ausreichende Steifigkeit wird das Segel mit Stahlseilen abgespannt. Der Zusammenbau des Segels stellte sich jedoch schwieriger als erwartet dar. Da Bambus ein Naturprodukt ist, stimmten oftmals die Maße nicht mit den geplanten überein. Deshalb musste oftmals improvisiert werden um alle Teile so miteinander verbinden zu können, damit alles stabil genug ist.

Ein weiterer Punkt der im Laufe dieser Arbeit bearbeitet wurde war der Kippmechanismus des Segels am oberen bzw. unteren Ende des Mastes. Damit ein sicheres und zuverlässiges Umkippen stattfinden kann, wurde die Anlage um einen Elektromotor ergänzt. Dieser greift direkt an die Kette des Segels und ermöglicht es, durch Einschalten im richtigen Moment, die Kette weiter zu ziehen und somit das Segel bis zum Umkipppunkt an den Anschlag fahren zu lassen. Die dazu benötigte Steuerung soll über eine Schütz-Schaltung realisiert werden.

Um eine weitere Steigerung der Energiegewinnung der Anlage zu erreichen, wurden unterschiedliche Ansätze zur Leistungsoptimierung entwickelt. Aufgrund von Probleme, die sich bei der Suche für einen geeigneten Standort für dieses Kraftwerk ergaben, konnten diese Ansätze jedoch noch nicht erprobt werden.

Wegen den hohen Auflagen der Stadt und der DHBW, musste zuerst eine Gefährdungsbeurteilung durch Herrn Franetzki und eine Statikberechnung, welche Teil der Arbeit ist, durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass bei normalen Betrieb der Anlage bis zur Auslegungswindgeschwindigkeit keine Gefahr von der Anlage ausgeht.

Insgesamt muss man jedoch feststellen, dass das Projekt, ein voll funktionsfähiges neuartiges Windkraftwerk, das von jedermann aufgestellt und

betrieben werden kann, noch lange nicht abgeschlossen ist. Aufgrund dessen, wird in einer nachfolgenden Projektarbeit auf die Funktionsfähigkeit dieses Prototyps, die wegen Zeitmangel und logistischen Problemen nicht mehr getestet werden konnte, eingegangen. Weiter sollen auch die verschiedenen Ansätze zur Leistungsoptimierung erprobt werden. Teil dieser Versuche ist es auch herauszufinden, ob es eventuell sinnvoll ist eine windabhängige Winkeleinstellung des Segels zu realisieren. Zusätzlich soll in einem späteren Zeitpunkt die komplette Elektronik an die Konstruktion angepasst werden.

Literaturverzeichnis


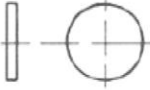

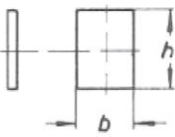






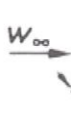


- [1] Martin Kühn:
Windnergie, Rückenwind für zukunftsfähige Technik
Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2007
- [2] Jungbauer Andreas:
Windenergienutzung in einem regenerativen Energiesystem, Analyse
der Windkraftanlagen Eberschwang und Laussa
Technische Universität Graz, Graz 1998
- [3] Dr.-Ing. Brigitte Schmidt, Doz. Dr.-Ing. Ditmar Schmidt:
Grundkurs Windenergie
Solarinitiative Mecklenburg-Vorpommern e.V., o.J.
- [4] Willi Bohl, Wolfgang Elmendorf:
Technische Strömungslehre, Stoffeigenschaften von Flüssigkeiten und
Gasen, Hydrostatik, Aerostatik, Inkompressible Strömungen,
Kompressible Strömungen, Strömungsmesstechnik
Auflage 14, Vogel Buchverlag, Würzburg 2008
- [5] o.V., o.J.:
<http://www.renewable-energy-concepts.com/german/windenergie/wind-basiswissen/wie-entsteht-wind.html>
Einsichtnahme: 10.12.2014

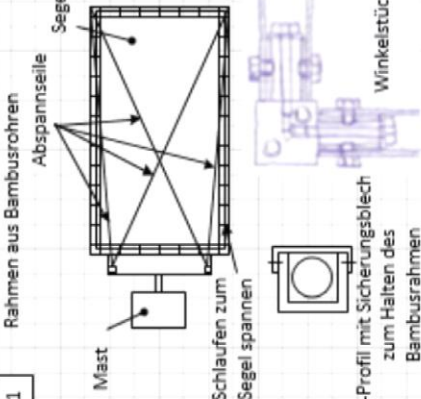
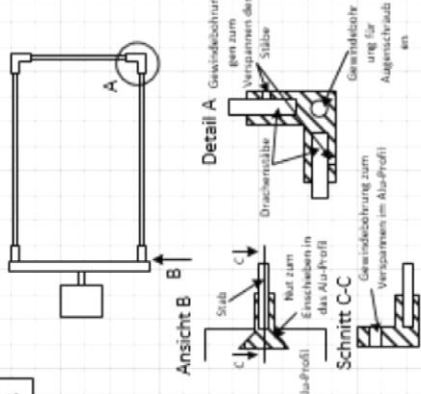
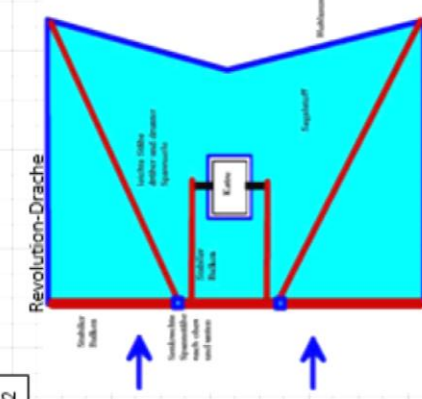
-
- [6] o.V., o.J.:
http://www.atmosphere.mpg.de/enid/a4556e32db307aaf8ffa36c45532bd05,0/Basis/2__Kreislaeufe___Windsysteme_114.html
Einsichtnahme: 11.12.2014
- [7] o.V., o.J.:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Corioliskraft>
Einsichtnahme: 12.12.2014
- [8] o.V., o.J.:
http://de.wikipedia.org/wiki/Planetarische_Zirkulation
Einsichtnahme: 12.12.2014
- [9] o.V., o.J.:
http://de.wikipedia.org/wiki/Katabatischer_Wind
Einsichtnahme: 12.12.2014
- [10] F. A. Brockhaus GmbH:
Brockhaus - Die Enzyklopädie: in 24 Bänden, Band 4 (BRON-CRN)
Auflage 20, Leipzig-Mannheim 1996
Suchbegriff: Coriolis-Kraft
- [11] o.V., o.J.:
Bambus und seine mechanischen Eigenschaften
<http://bambus.rwth-aachen.de/de/PDF-Files/Mechanische%20Eigenschaften%20von%20Bambus%20-%20%20Version%202.pdf>
letzter Aufruf: 11.01.2014

-
- [12] U. Fischer, R. Gomeringer, M. Heinzler, R. Kilgus, F. Näher, S. Oesterle, H. Paetzold, A. Stephan:
Tabellenbuch Metall
Auflage 45, Europa, Haan-Gruiten 2011
- [13] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, W. A. Wall:
Technische Mechanik 2, Elastostatik
Auflage 11, Springer, Berlin Heidelberg 2012
- [14] Prof. Dr.-Ing. Peter R. Hakenesch:
Aerodynamik des Flugzeugs (Skript zur Vorlesung)
Version 2.3, o.J.
- [15] Dr. Manfred Franetzki

Anhang

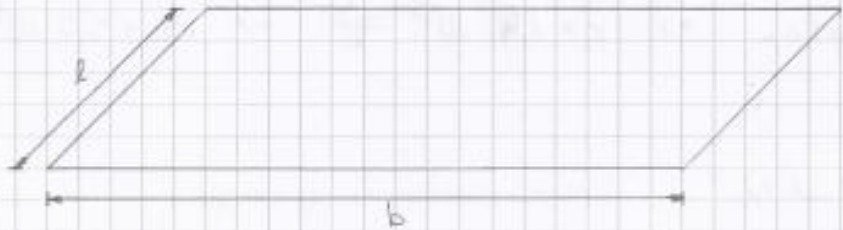
Anhang I

Körperform		Widerstandsbeiwert c_w
		1,17
Kreisplatte		
		$\frac{h}{b} \begin{cases} 1 & 1,1 \\ 2 & 1,15 \\ 4 & 1,19 \\ 10 & 1,29 \\ 18 & 1,40 \\ \infty & 2,01 \end{cases}$
Rechteckplatte		
	Halbkugel von außen angeströmt	ohne Boden 0,34 mit Boden 0,40
	Halbkugel von innen angeströmt	ohne Boden 1,33 mit Boden 1,17
	Zylinder von der Stirn- seite her angeströmt	$\frac{l}{d} \begin{cases} 1 & 0,91 \\ 2 & 0,85 \\ 4 & 0,87 \\ 7 & 0,99 \end{cases}$
	Kegel (ohne Boden) von der Spitze her angeströmt	$\alpha \begin{cases} 30^\circ & 0,34 \\ 60^\circ & 0,51 \end{cases}$
	schlanker Kegel von der Grundfläche her ange- strömt	= 0,58
	quadratisches Prisma senkrecht angeströmt	für $b \rightarrow \infty$ = 2,05
	quadratisches Prisma diagonal angeströmt	für $b \rightarrow \infty$ = 1,55
	Würfel senkrecht angeströmt	= 1,05
	Würfel diagonal angeströmt	= 0,8

<p>11. Januar 2014</p>	<p>1</p> <p>Rahmen aus Bambusrohren</p> 	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +billiger als CFK-Stäbe +einfache Konstruktion +geringe Durchbiegungen des Rahmens +leichter Rahmen +Segel leicht zum aufziehen <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> -schwerer als CFK-Stäbe -Maße von Naturprodukte schwanken 	<p>3</p> <p>Segel/Rahmen/Tragflügel</p> 	<p>Rahmen-Segel</p> <p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +leichter Rahmen +sehr stabil (Kohle- oder Glasfaser) +Segel leicht zum Aufziehen +leicht an restliche Konstruktion anzubinden <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> -eventuell zu große Verbiegungen -teuer
<p>2</p> <p>Revolution-Drache</p> 	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +leichtes Segel +sehr Biegsam +sehr stabil (Kohle- oder Glasfaser) <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Flächenverlust wegen Segelform -schlecht an die restliche Konstruktion anzubinden -eventuell zu große Verbiegungen -sehr teuer -Segel kann nicht „gerefft“ werden 	<p>4</p> <p>Vorteile:</p> <p>Nachteile:</p>		

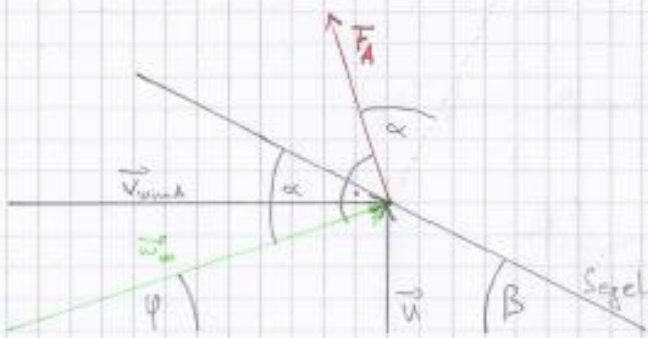
Anhang III

Berechnung der Kräfte auf dem Flügel



Geg: $l = 1,5 \text{ m}$ $b = 2,5 \text{ m}$ $\Rightarrow A_{FL} = b \cdot l = 3,75 \text{ m}^2$
 $\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $v_{\text{Wind}} = 12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $u = \frac{1}{2} v = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
 $\beta = 30^\circ$

Lot auf das Segel



$$w_\infty = \sqrt{v_{\text{Wind}}^2 + u^2}$$

$$w_\infty = 12,65 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{u}{v_{\text{Wind}}}\right)$$

$$\varphi = 18,44^\circ$$

$$\alpha = \beta + \varphi$$

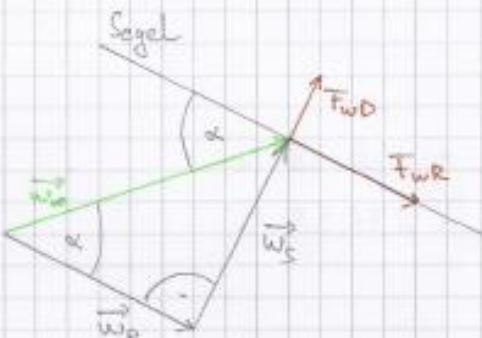
$$\alpha = 48,44^\circ$$

$$F_A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{FL} \cdot w_\infty^2$$

$$c_A = 0,8 \quad \text{aus Diagramm}$$

$$\Rightarrow F_A = 294,04 \text{ N}$$

Bestimmung der Widerstandskraft



$$w_s = w_\infty \cdot \sin \alpha$$

$$w_s = 9,46 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$w_p = w_\infty \cdot \cos \alpha$$

$$w_p = 8,39 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$F_{WR} = c_R \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{FL} \cdot w_p^2$$

$$F_{WD} = c_D \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_{FL} \cdot w_s^2$$

$$c_R = \frac{1,328}{\sqrt{Re}}$$

$$Re = \frac{w_p \cdot l}{\nu}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

$$\eta = 17,1 \mu\text{Pa}\cdot\text{s} \Rightarrow \nu = 1,4 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \Rightarrow Re = 9,0 \cdot 10^5$$

$$c_R = 0,0014$$

$$\Rightarrow F_{wR} = 0,51 \text{ N} \quad (\text{verschwindend gering})$$

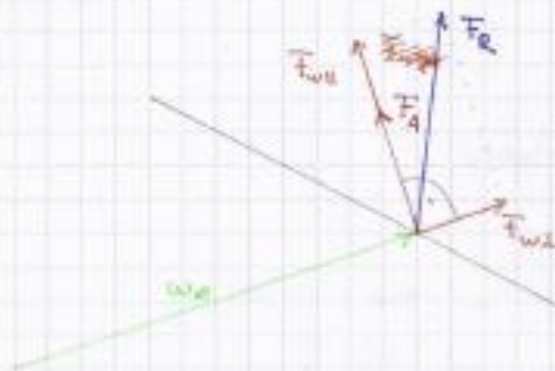
$$c_D = 1,15 \quad \text{aus Tafel 39 Bohl/Edwendorf}$$

$$\Rightarrow F_{wD} = 236,48 \text{ N}$$

$$F_w = 236,48 \text{ N}$$

$$F_w = F_{wD} \quad (\text{ohne Reibung})$$

Daraus folgt für Kräfte auf Segel:



$$F_{w1} = F_w \cdot \cos \alpha \Rightarrow F_{w1} = 156,88 \text{ N}$$

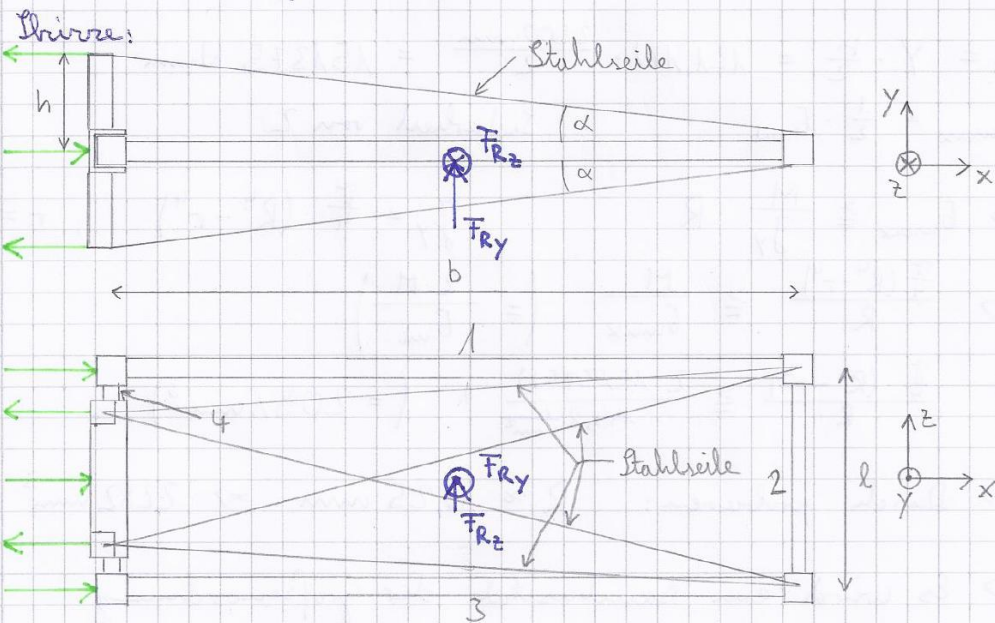
$$F_{w2} = F_w \cdot \sin \alpha \Rightarrow F_{w2} = 176,95 \text{ N}$$

$$F_R = \sqrt{(F_{w1} + F_A)^2 + F_{w2}^2}$$

$$F_R = 484,40 \text{ N}$$

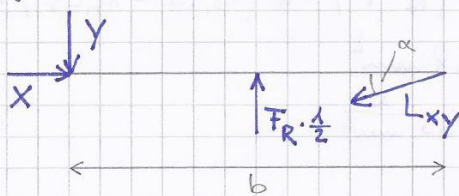
Anhang IV

Dimensionierung des Seigels

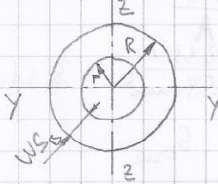


Bambus 1 oder/und 3:

System



Querschnitt



$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 &\Rightarrow X = L_{xy} \cdot \cos \alpha \\ \sum F_y = 0 &\Rightarrow \frac{F_R}{2} = Y + L_{xy} \cdot \sin \alpha \\ \sum M = 0 &\Rightarrow \frac{F_R}{2} \cdot \frac{b}{2} = L_{xy} \cdot \sin \alpha \cdot b \end{aligned}$$

NR:

$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \frac{h}{b} \\ \Rightarrow \alpha &= \arctan\left(\frac{h}{b}\right) \end{aligned}$$

Gegeben: $h = 250 \text{ mm}$ $b = 2500 \text{ mm}$ $l = 1500 \text{ mm}$
 $WS_R = 4 \text{ mm}$ $F_R = 484,4 \text{ N}$ $E_{zul} = 144,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
 $\alpha = 5,71^\circ$

$$\Rightarrow L_{xy} = \frac{F_R}{4 \cdot \sin \alpha} = \frac{484,4 \text{ N}}{4 \cdot \sin(5,71^\circ)} = 1217 \text{ N}$$

$$\Rightarrow Y = \frac{F_R}{2} - L_{xy} \cdot \sin \alpha = \frac{484,4 \text{ N}}{2} - 1217 \text{ N} \cdot \sin(5,71^\circ) = 121,1 \text{ N}$$

$$\Rightarrow X = L_x = L_{xy} \cdot \cos \alpha = 1211 \text{ N}$$

Biegung

$$M = Y \cdot \frac{b}{2} = 121,1 \text{ N} \cdot \frac{2500 \text{ mm}}{2} = 151375 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \sigma_{\text{zul}} \quad : \text{Sicherheit von 2}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{max}} \geq \frac{M}{J_y} \cdot R \quad J_y = \frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4) \quad ; \quad r = R - 4 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \frac{\frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)}{R} \geq \frac{M}{\sigma_{\text{max}}} \quad \left(= \frac{2 \cdot M}{\sigma_{\text{zul}}} \right)$$

$$\frac{\frac{\pi}{4} \cdot (R^4 - r^4)}{R} \geq \frac{2 \cdot 151375 \text{ N}}{144,8 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \quad \left(= 2091 \text{ mm}^3 \right)$$

$$\Rightarrow \text{Durch probieren: } R \approx 16,25 \text{ mm} \Rightarrow 2282 \text{ mm}^3 \geq 2091 \text{ mm}^3$$

\Rightarrow Es wird ein Bambusstab der Größenordnung
 $\varnothing 30 \text{ mm} - 35 \text{ mm}$

Druck

$$\sigma_D = \frac{L_x}{A}$$

$$\sigma_D = \frac{1211 \text{ N}}{358 \text{ mm}^2} = 3,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_D < \sigma_{D\text{zul}}$$

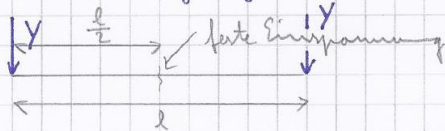
$$A = \pi \cdot (R^2 - r^2) = \pi \cdot (16,25^2 - 12,25^2) \cdot \text{mm}^2$$

$$A = 358 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{D\text{zul}} = 39 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Bambus 4

Wird nur Auslegung ohne Aluminiumprofil betrachtet



$$M = Y \cdot \frac{l}{2} = 121,1 \text{ N} \cdot 750 \text{ mm} = 90825 \text{ Nmm}$$

Weitere Rechenschritte sind analog zur Berechnung von
Bambus 1 und 3

$$\Rightarrow \frac{J_y}{R} \geq 1254,5 \text{ mm}^3$$

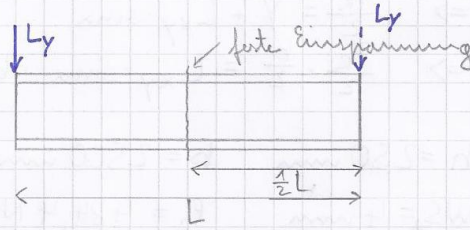
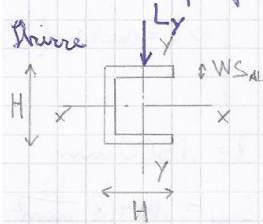
probieren mit nächst kleineren erhältlichen Bambusgröße

$$\Rightarrow R \approx 14 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 1594,1 \geq 1254,5 \text{ mm}^3$$

\Rightarrow Bambus 2 und 4: $\varnothing 22 - 26 \text{ mm}$

Aluminiumprofil



Annahme: $H = 35 \text{ mm}$ $WS_{Al} = 2 \text{ mm}$ (damit Bambus 2 und 4 aufgenommen werden können)

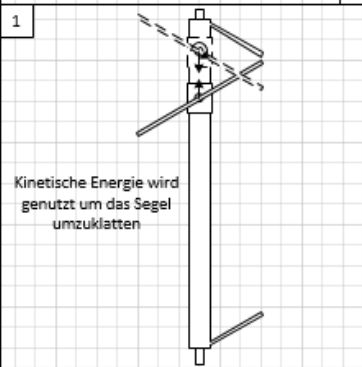
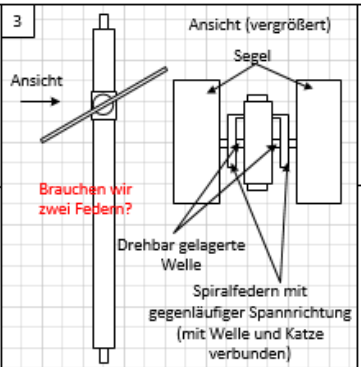
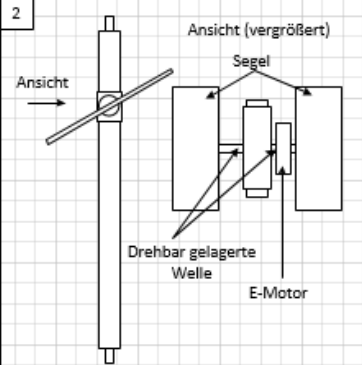
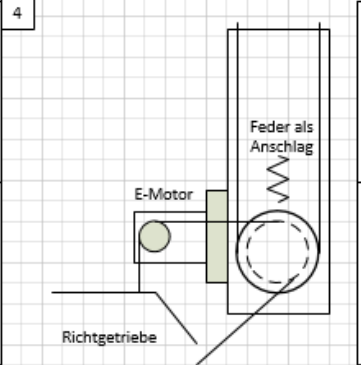
Gegeben: $L = 1400 \text{ mm}$

$$J_x = \frac{H^4}{12} - \frac{(H - WS_{Al}) \cdot (H - 2 \cdot WS_{Al})^3}{12} = \left(\frac{35^4}{12} - \frac{(35-2) \cdot (35-2 \cdot 2)^3}{12} \right) \text{ mm}^4 = 43127 \text{ mm}^4$$

$$M_x = L_y \cdot \frac{L}{2} = y \cdot \frac{L}{2} = 121,1 \text{ N} \cdot \frac{1400 \text{ mm}}{2} = 84770 \text{ Nmm}; L_y = y$$

$$\sigma_x = \frac{M_x}{J_x} \cdot \frac{H}{2} = \frac{84770 \text{ Nmm}}{43127 \text{ mm}^4} \cdot \frac{35 \text{ mm}}{2} = 34,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

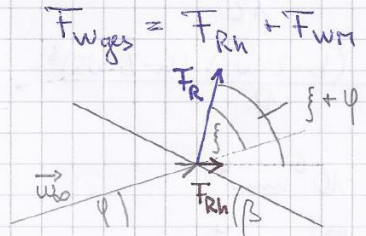
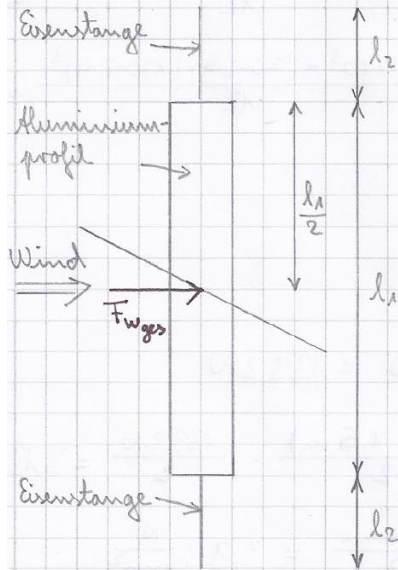
Anhang V

11. Januar 2014		Kippmechanismus		Segel kippen	
<p>1</p>  <p>Kinetische Energie wird genutzt um das Segel umzuklappen</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +billiges Konzept +keine komplizierte Konstruktion +kontrollierte Auf- und Abbewegung +kein zus. Gewicht <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - bei zu wenig Wind funktioniert Mechanismus nicht 	<p>3</p>  <p>Brauchen wir zwei Federn?</p> <p>Drehbar gelagerte Welle Spiralfedern mit gegenläufiger Spannrichtung (mit Welle und Katze verbunden)</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +kontrollierte Auf- und Abbewegung + billige Variante <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> - komplizierte Konstruktion - Funktion nicht sichergestellt 		
<p>2</p>  <p>Ansicht (vergrößert) Segel Drehbar gelagerte Welle E-Motor</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +garantiertes Umkippen +kontrollierte Auf- und Abbewegung <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Teil der elekt. Energie der Lichtmaschine wird verbraucht -elekt. Steuerung nötig -zusätzliches Gewicht 	<p>4</p>  <p>E-Motor Richtgetriebe Feder als Anschlag</p>	<p>Vorteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> +garantiertes Umkippen +keine komplizierte Konstruktion +kontrollierte Auf- und Abbewegung +kein zus. Gewicht <p>Nachteile:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Teil der elekt. Energie der Lichtmaschine wird verbraucht -elekt. Steuerung nötig 		

Anhang VI

Statische Berechnungen

1 Betriebszustand



$$F_{wges} = F_{Rh} + F_{wM}$$

$$F_{Rh} = 2 \cdot F_R \cdot \cos(\xi + \varphi)$$

$$\xi = \arccos\left(\frac{F_{wM}}{F_R}\right) \Rightarrow \xi = 68,6^\circ$$

$$\Rightarrow F_{Rh} = 2 \cdot 484,4 \text{ N} \cdot \cos(68,6^\circ + 18,44^\circ)$$

$$F_{Rh} = 50,5 \text{ N}$$

$$F_{wM} = 2 \cdot F_{wst} + F_{wals}$$

$$F_{wst} = c_{st} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot d \cdot l_2 \cdot v_{wind}^2$$

$$F_{wst} = 1,2 \cdot \frac{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot (12 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2$$

$$F_{wst} = 6,4 \text{ N}$$

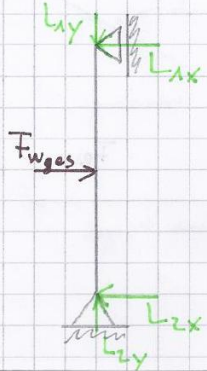
$$F_{wals} = c_{as} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot b \cdot l_1 \cdot v_{wind}^2$$

$$F_{wals} = 2,05 \cdot \frac{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2} \cdot 70 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 6 \text{ m} \cdot (12 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2$$

$$F_{wals} = 75,9 \text{ N}$$

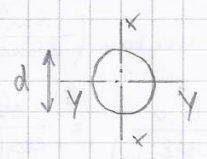
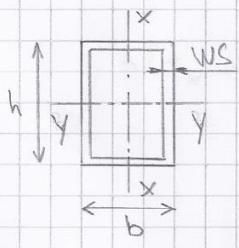
$$F_{wM} = 2 \cdot 6,4 \text{ N} + 75,9 \text{ N} = 88,7 \text{ N}$$

Skizze des Systems



Aluminiumprofil

Eisenstange



$$d = 40 \text{ mm}$$

Gegeben: $h = 170 \text{ mm}$ $b = 70 \text{ mm}$ $WS = 4 \text{ mm}$

Flächenträgheitsmomente des Aluminiumprofils

$$J_y = \frac{b \cdot h^3 - (b - 2 \cdot WS) \cdot (h - 2 \cdot WS)^3}{12} = \frac{70 \cdot 170^3 - (70 - 2 \cdot 4) \cdot (170 - 2 \cdot 4)^3}{12} \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow J_y = 6,69 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Flächenträgheitsmoment des Eisenstabs

$$J_x = J_y = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^4 = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{40 \text{ mm}}{2}\right)^4 = 0,13 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$F_{wges} = F_{RH} + F_{WM} = 50,5 \text{ N} + 88,7 \text{ N} = 139,2 \text{ N}$$

$$M_M = \frac{(l_1 + 2 \cdot l_2)}{2} \cdot \frac{F_{wges}}{2} = \frac{(6 \text{ m} + 2 \cdot 1,5 \text{ m})}{2} \cdot \frac{139,2 \text{ N}}{2} = 313,2 \text{ Nm}$$

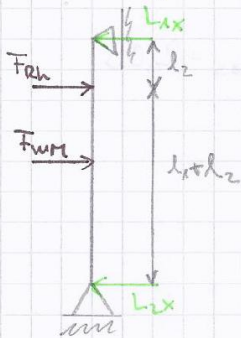
$$\sigma_{AlS} = \frac{M_M}{J_y} \cdot \frac{h}{2} = \frac{313,2 \text{ Nm}}{6,69 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} \cdot \frac{170 \text{ mm}}{2} = 3,98 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Spannungen sind sehr klein \Rightarrow hält Belastungen stand.

$$\sigma_{St} = \frac{M_M}{J_x} \cdot \frac{d}{2} = \frac{313,2 \text{ Nm}}{0,13 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} \cdot \frac{40 \text{ mm}}{2} = 48,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\sigma_{zul} = 225 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} > \sigma_{St} = 48,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Belastung der Abspannseile



$$\Sigma M = 0 = \cancel{F_{RH}} \cdot (l_1 + l_2) + F_{WM} \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2\right) - L_{1x} \cdot (2 \cdot l_2 + l_1)$$

$$L_{1x} = \frac{F_{RH} \cdot (l_1 + l_2) + F_{WM} \cdot \left(\frac{l_1}{2} + l_2\right)}{2 \cdot l_2 + l_1}$$

$$L_{1x} = \frac{50,5 \text{ N} \cdot (6 \text{ m} + 1,5 \text{ m}) + 88,7 \text{ N} \cdot \left(\frac{6 \text{ m}}{2} + 1,5 \text{ m}\right)}{2 \cdot 1,5 \text{ m} + 6 \text{ m}} = 86,4 \text{ N}$$

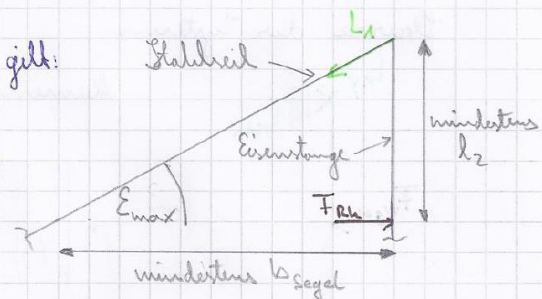
Über Geometrische Zusammenhänge gilt:

$$\epsilon_{max} = \arctan\left(\frac{l_2}{b_{segel}}\right)$$

$$\epsilon_{max} = \arctan\left(\frac{1,5 \text{ m}}{2,5 \text{ m}}\right) \Rightarrow \epsilon_{max} = 31^\circ$$

$$L_1 = \frac{L_{1x}}{\cos(\epsilon_{max})} = \frac{86,4 \text{ N}}{\cos(31^\circ)}$$

$$L_1 = 100,8 \text{ N}$$



2. Stillstand (geöffnetes Segel)

schwächstes Glied war die Eisenstange oben und unten am Mast.

$$\Rightarrow \frac{1}{2} \cdot \sigma_{zul} \geq \sigma_{st} \quad \sigma_{zul} = 225 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$
$$\frac{1}{2} \cdot 225 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \geq \sigma_{st} \Rightarrow \sigma_{st} \leq 112,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Gesucht ist die maximale Windgeschwindigkeit, der der Mast ausgesetzt werden darf. v_{max}

$$\sigma_{st} = \frac{M_{max}}{J_x} \cdot \frac{d}{2} \Rightarrow M_{max} = \frac{2 \cdot \sigma_{st} \cdot J_x}{d}$$

$$M_{max} = \frac{2 \cdot 112,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot 0,13 \cdot 10^6 \text{mm}^4}{40 \text{mm}} = 731,25 \text{Nm}$$

$$F_{wmax} = \frac{4 \cdot M_{max}}{(l_1 + 2l_2)} = \frac{4 \cdot 731,25 \text{Nm}}{9 \text{m}} = 325 \text{N}$$

$$F_{wmax} = F_{wges} = F_{wAlb} + 2 \cdot F_{wst}$$

$$F_{wmax} = c_{ab} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot h \cdot l_1 \cdot v_{max}^2 + 2 \cdot c_{st} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot d \cdot l_2 \cdot v_{max}^2$$

$$\Rightarrow v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{wmax}}{\rho \cdot (c_{ab} \cdot h \cdot l_1 + 2c_{st} \cdot d \cdot l_2)}} \quad c_{ab} \approx c_{st} \approx 2,05$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2 \cdot 325 \text{N}}{1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (2,05 \cdot 170 \text{mm} \cdot 6 \text{m} + 2 \cdot 1,2 \cdot 40 \text{mm} \cdot 1,5 \text{m})}}$$

$$v_{max} = 15,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$