

**Max- Steenbeck- Gymnasium
Elisabeth- Wolf- Str. 72
03042 Cottbus**

Facharbeit im Leistungskurs Physik

**Schuljahr 2008/2009
Jahrgangsstufe 12**

**„Über den Wind und seine Nutzung
durch den Menschen“**

**Alwine Dorothea Schulze
Wohnpark Am Funkturm 56
03205 Calau**

November/ Dezember 2009

Gliederung

1. Einleitung
2. Wie entsteht Wind?
 - 2.1. Einfluss der Sonne
 - 2.2. Corioliskraft
 - 2.3. Windstärken
 - 2.4. Wirbelstürme
3. Wozu kann Wind genutzt werden?
 - 3.1. Drachen
 - 3.2. Windsurfen
 - 3.3. Segelboote
 - 3.4. Segelflugzeuge
 - 3.5. Windmühlen
4. Aerodynamische Berechnungen am Windrad
 - 4.1. Gesetz von Bernoulli
 - 4.2. Anstellwinkel des Rotors zum Wind
 - 4.3. Bemerkungen zur Drehzahl
5. Analyse eines neuartigen Rotortyps
6. Bau des Rotors
 - 6.1 Dokumentation
 - 6.2 Testdrehung
7. Auswertung
8. Anhang
9. Literatur- und Quellenverzeichnis
10. Selbstständigkeitserklärung

1. Einleitung

Das Thema „Wind“ ist sehr komplex und vielseitig.

Bereits im Jahr 2008 beschäftigte ich mich näher mit einigen Facetten des Windes, die dabei entstandene Facharbeit trägt den Titel: „Alternative Energieerzeugung am Beispiel Windenergie“. Es stand dort, wie der Name es bereits andeutet, vor allem die Energieerzeugung durch den Wind im Mittelpunkt. Aufbauend auf dieser Arbeit sollen die folgenden Texte nun weitere interessante Erkenntnisse rund um das Thema „Wind“ darstellen.

Zu Beginn der Arbeit soll die Entstehung von Wind auf der Erde betrachtet werden. Dabei sollen vor allem verschiedene Windstärken, von der leichten Brise bis hin zu Orkanen und Hurrikans, beschrieben werden. Die Bedeutung des Windes und vor allem seine Nutzung werden im nächsten Kapitel bei der Betrachtung verschiedener Sport- und Freizeitgeräte, aber auch anderen Anwendungen der Windkraft, weitergeführt. Sowohl Drachen, Windsurfer, Segelboote, Segelflugzeuge, als auch Windräder nutzen den Wind als Antriebskraft. Wie funktioniert dies jedoch physikalisch gesehen? Auf diese Frage sollen die Ausführungen unter dem Titel „Wie wird Wind genutzt?“ Antwort geben.

Der anschließende Teil der Arbeit soll nun die Thematik der Windräder im Einzelnen untersuchen. Er beginnt mit einer Erläuterung verschiedener Berechnungen am Windrad, sowie Erklärungen zum theoretischen und praktischen Wirkungsgrad von Windmotoren.

Im Folgenden wird ein eigener Vorschlag für einen neuartigen Rotortyp analysiert. Dabei werden sowohl bauliche Besonderheiten als auch die Wirkungsweise näher beleuchtet, wobei hier vor allem auf die Vorteile des Rotors eingegangen werden soll. Abschließend soll dieser Vorschlag nun auch in die Tat umgesetzt werden. Der letzte Teil der Arbeit soll das dabei entstehende Ergebnis dokumentieren.

2. Wie entsteht Wind?

Der Begriff Wind meint nichts anderes als bewegte Luftmassen. Doch warum ist die Luft der untersten Schicht der Erdatmosphäre nie in Ruhe? Diese Frage soll das folgende Kapitel ausführlich beantworten.

2.1 Einfluss der Sonne

Die Sonne, 149,6 Millionen Kilometer von der Erde entfernt, wirkt mit einer ständigen Strahlung auf unseren Planeten ein. Wichtig für die Entstehung von Wind ist hierbei die Wärmestrahlung. Die Atmosphäre der Erde wird also stets erwärmt. Die Atmosphäre der Erde, das sind die Gasgemische, welche die Lufthülle der Erde bilden und in die Erdrotation mit eingebunden sind. Ihre Hauptbestandteile sind Stickstoff, Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid und Ozon. Die Erdatmosphäre wird in 5 Schichten unterteilt, wie die Abbildung 2.1 im Anhang zeigt:

Als „Wetterschicht“ wird dabei die erdnächste Schicht, also die Troposphäre, bezeichnet. In der Troposphäre entsteht das Wetter der Erde, unter anderem der Wind. Denn die Troposphäre wird von zwei Seiten erwärmt: Zum einen von der Sonne und von der anderen Seite von der Erde selbst, welche, durch ihren heißen Flüssigkeitskern und unterhalb der Atmosphäre gespeicherter Wärmeenergie der Sonne, selbst eine große Wärmeenergie besitzt. Daher tritt in der Troposphäre das Phänomen auf, dass die Temperatur mit zunehmender Höhe abnimmt, wie auch in der Abbildung an dem rot eingezeichneten Graphen zu erkennen ist. Dieser Zustand ist jedoch sehr instabil. Luft ist dann erwärmt, wenn Luftmoleküle durch Energieaufnahme zu stärkerem Schwingen veranlasst wurden. Dadurch vergrößert sich ihr Volumen und die Luftdichte wird kleiner. Warme Luft ist also „leichter“ als kalte Luft, es wird hier die physikalische Größe des Luftdrucks eingeführt. Je nach Dichte übt ein bestimmtes Volumen an Luft einen unterschiedlich großen Druck auf die Erdoberfläche aus. Im Normalzustand strömt warme Luft, welche einen geringeren Luftdruck besitzt, immer nach oben, da sie von kalter Luft mit größerem Luftdruck verdrängt wird. Genau das geschieht auch in der Troposphäre: die Luft gerät in Bewegung, da sie stets versucht, sich umzuschichten. Es entsteht Wind.

Allerdings spielt die Sonne noch eine weitere Rolle bei der Entstehung von Wind auf der Erde. Je nach Jahres- und Tageszeit erwärmt die Sonne verschiedene Bereiche der Erde verschieden stark. Dies ist mit der Bewegung der Erde um die Sonne und um ihre eigene Achse zu erklären. Außerdem ist die Erde gegenüber der Sonne um $23,4^\circ$ geneigt. Das hat

zur Folge, dass die Sonnenstrahlen einen verschieden großen Weg durch die Atmosphäre zurücklegen müssen, bevor sie auf der Erde auftreffen (siehe Abbildung 2.2 im Anhang). Während sie am Äquator fast senkrecht einfallen, werden sie mit zunehmender Nähe zu den Polen schräger und legen somit einen größeren Weg durch die Atmosphäre zurück. Auf diesem Weg wird ihre Intensität abgeschwächt und sie können die Erde nicht so stark erwärmen wie am Äquator. So entstehen auf der Erde verschiedene Druckgebiete, je nach Temperatur der Luft. Diese werden in Hoch- und Tiefdruckgebiete eingeteilt. Hochdruckgebiete sind, wie der Name bereits sagt, Gebiete mit hohem Luftdruck, also kalten Luftmassen. Dagegen werden Tiefdruckgebiete von warmen Luftmassen gekennzeichnet. Doch auch dieser Zustand der verschiedenen Luftdruckgebiete ist nicht stabil, sodass ein ständiger Ausgleich zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten auf der Erde stattfindet. Die Luft gerät in Bewegung, es entsteht Wind. Der Wind richtet sich dabei immer von einem Hoch zu einem Tiefdruckgebiet, da der „Mangel“ an Luftmolekülen im niedrigen Luftdruck durch den „Überschuss“ an Luftmolekülen der kalten, schweren Luft ausgeglichen wird.

2.2 Corioliskraft

Neben der unterschiedlichen Erwärmung der Erdatmosphäre gibt es noch weitere Phänomene, welche die Windentstehung auf der Erde beeinflussen. Dazu gehört die Corioliskraft. Laut Quelle [3] ist diese eine „Kraft, die auf Körper wirkt, die sich im rotierenden System selbst bewegen. Sie wirkt senkrecht zur Bahngeschwindigkeit.“ Also wirkt auch eine Kraft auf eine Masse (z.B. Luftmasse), die sich auf der Erde bewegt. Sie überstreicht dabei unterschiedliche Bahngeschwindigkeiten der sich drehenden Erdkugel (am Äquator sehr hohe Bahngeschwindigkeit, an den Polen Bahngeschwindigkeit 0). Bewegt sich eine Masse vom Nordpol zum Äquator, so wird sie nach Westen abgelenkt, da die Bahngeschwindigkeit der Erde auf dem Weg zum Äquator immer mehr zunimmt. Die Lufthülle wird also stets von ihrer eigentlichen Bewegungsrichtung abgelenkt und bewirkt somit, dass der Ausgleich zwischen Hoch- und Tiefdruckgebieten niemals geradlinig erfolgt, sondern spiralförmig um das Zentrum des jeweiligen Hoch- oder Tiefdruckgebietes. Auf der Nordhalbkugel umkreisen die Winde jeweils ein Hochdruckgebiet im Uhrzeigersinn und ein Tiefdruckgebiet entgegen dem Uhrzeigersinn, auf der Südhalbkugel ist es genau andersherum. Abbildung 2.3 im Anhang stellt den Sachverhalt grafisch dar. Die ablenkende Wirkung der Erdrotation auf die Winde wurde im Jahr 1835 von dem französischen Mathematiker Gustave Gaspard Coriolis errechnet.

Allerdings sind auch Flüsse und alle anderen Bewegungen auf der Erde dieser Kraft ausgesetzt.

Die Entstehung von Winden auf der Erde ist also ein hochkomplexes Thema, welches viele Faktoren berücksichtigen muss, von denen nur einige hier genannt werden können. Längerfristige Vorhersagen und exakte Berechnungen für Winde sind daher nicht möglich.

2.3 Windstärken

Je nach Windgeschwindigkeit wird der Wind in verschiedene Windstärken eingeteilt. Je größer der Druckunterschied zwischen einem Hoch- und einem Tiefdruckgebiet ist, desto heftiger bläst der Wind. Prallen nun extrem kalte Luftmassen auf extrem warme Luftmassen, so können Orkane entstehen, welche eine sehr große Windgeschwindigkeit und damit extrem große Kräfte besitzen. Die Beaufort- Skala (2.4 im Anhang) zeigt die 12 Windstärken, welche im Jahr 1806 von dem englischen Admiral Sir Francis Beaufort eingeteilt wurden. Er gab mit den Windstärken die auf Gegenstände einwirkende Kraft bzw. die sichtbaren Auswirkungen des Windes an. Windstille sei dabei Stärke 0 und Orkane, welche Verwüstungen schwerster Art hervorrufen, Stärke 12. Später konnten die Windgeschwindigkeiten experimentell gemessen werden, was zu genaueren Angaben führte. Daher wurde die Skala auf 17 Stufen erweitert.

2.4 Wirbelstürme

Wirbelstürme bezeichnen in der Regel Winde mit einer vertikalen Drehachse. Besonders die Tropengebiete sind von Wirbelstürmen häufig betroffen, wobei die verschiedenen Bezeichnungen hierbei nicht zu Verwirrungen führen sollen. In der Nähe von Südostasien werden sie Taifune genannt, Nord- und Mittelamerika bezeichnen die gleichen Phänomene als Hurrikans, Australiens Küste spricht von Willy- Willys und Europäer verwenden oft den Begriff Zyklonen, welcher auch in der folgenden Erklärung verwendet werden soll.

Die Entstehung von Zyklonen erfolgt immer über großen Meeresflächen, welche eine Wassertemperatur von mindestens 27°C haben. Denn hier können größere Mengen des Wassers in kurzer Zeit verdunsten. Der Wasserdampf sammelt sich einige Kilometer über der Wasseroberfläche als Gewitterwolken. Dazu kondensiert er in den Höhen wieder, wodurch dort eine große Menge an Energie freigesetzt wird. Die Luft innerhalb der Wolke wird also aufgeheizt, dehnt sich aus und steigt weiter nach oben. Nun entsteht über der warmen Meeresoberfläche ein Unterdruck, welcher durch von den Seiten herbeiströmende

Luftmassen ausgeglichen wird. Durch die Corioliskraft kommt es zu Verwirbelungen, welche die Zyklone bilden. Oberhalb der Wolke hingegen ist der Luftdruck sehr hoch. Zum Ausgleich verteilt sich die Luft wieder, in dem sie der Zyklone entgegen gerichtet (Antizyklone) nach unten wirbelt. Im Zentrum dieses Wirbelsturms liegt das so genannte „Auge“. Im Auge herrscht ein nahezu gleichmäßiger Luftdruck und demzufolge kaum Wind. Am Rande des Auges hingegen können Windgeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h auftreten. Die Abbildung 2.5 im Anhang zeigt eine schematische Darstellung eines solchen Sturmes.

Quelle [4] beschreibt den Vorgang folgendermaßen: „An den Rändern des Auges [...] schraubt sich heiße Luft nach oben und saugt kalte Luft ein wie ein Abflussrohr. [...] Durch die Energiezufuhr, die immer größer wird, je länger der Wirbel über das warme Wasser zieht und verdunstete Wassermengen aufnimmt, wird der Sturmwirbel immer enger und nimmt dabei gleichzeitig an Stärke zu.“ Der Durchmesser eines solchen Wirbelsturmes liegt bei 100 bis 250 km, wobei sich die Fläche später meist ausdehnt, wenn die Zyklone abstirbt. Dies geschieht nicht selten erst nach mehreren Tagen.

Im Unterschied zu den tropischen Wirbelstürmen, welche über dem Meer entstehen, gibt es auch Tornados (oder Windhosen genannt). Diese können allerdings nur in Nordamerika existieren, da spezielle Großwetterlagen nur dort das Zusammentreffen von Kaltfronten mit extrem heißen Luftmassen ermöglichen. Tornados entstehen im Inneren großer Gewitterwolken. Wie bei den Zyklonen entsteht auch hier bei der Kondensation von Wasser eine Energiemenge, welche die Luft erwärmt und nach oben treibt. Existieren nun neben dieser Luftbewegung noch weitere Höhenwinde, kann es dazu kommen, dass die aufsteigende Warmluft in eine schraubige Drehung versetzt wird. Als Druckausgleich werden weitere Luftmassen mehrere tausend Meter hoch in diese wirbelnde Säule hineingesaugt. Sie hängt nun wie ein Rüssel an der Gewitterwolke und besitzt im Außenbereich Windgeschwindigkeiten von bis zu 400 km/h. Im Zentrum des Wirbels entsteht ein enormer Unterdruck, welcher alles ansaugt, was im Umkreis liegt. Nicht selten wirbelt er große Gegenstände, Fahrzeuge und Lebewesen auf und hinterlässt somit eine Spur der Verwüstung.

3. Wie wird Wind genutzt?

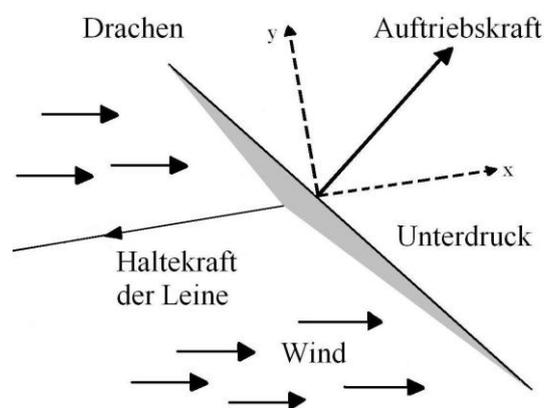
Im letzten Kapitel wurde nun erklärt, welche großen Kräfte durch bewegte Luftmassen freigesetzt werden und welche Schäden dadurch unter anderem entstehen können. Dass Wind eine Energie mit sich trägt, beweist schon die folgende Rechnung:

- Wind hat eine Geschwindigkeit v
- Luft hat eine Masse m
- Gleichung für kinetische Energie: $E = \frac{1}{2} m v^2$

Die Energie des Windes ist also von Geschwindigkeit und Masse der Luft abhängig. Diese Rechnung soll allerdings erst später näher betrachtet werden. Im nun folgenden Kapitel soll veranschaulicht werden, auf welche Weise Menschen die Kraft des Windes für sich nutzen. Im Mittelpunkt steht dabei die Technik, welche ihren Antrieb im Wind findet.

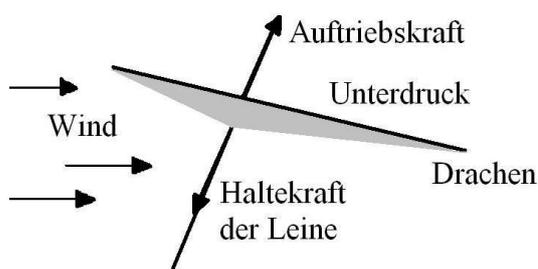
3.1 Drachen

In vielen Ländern der Erde ist es vor allem bei Kindern ein großer Spaß, im Herbst einen Drachen zu bauen und diesen dann bei entsprechenden Windverhältnissen draußen steigen zu lassen. Doch warum können Drachen, ohne von der Erdanziehungskraft zurückgeholt zu werden, am Himmel schweben? Um diese Frage zu beantworten, soll zunächst der Aufbau eines solchen Drachens betrachtet werden. Da gibt es ein Gestänge, auch Drachekreuz genannt, auf welches ein Segel gespannt ist. Hält man dieses Segel nun schräg in den Wind, so ergibt sich folgende Situation: Der Wind übt eine Kraft auf den Drachen aus, zusätzlich entsteht hinter dem Segel ein Unterdruck, welcher den Drachen schräg nach oben zieht. Diese so genannte Auftriebskraft kann in eine x - und eine y -Komponente zerlegt werden, wie die Abbildung zeigt. An dem Drachen ist noch eine Leine befestigt, welche eine Person in der Hand hält. Diese Person rennt nun mit der Leine entgegen



dem Wind. Die Leine wirkt also entgegen der x -Komponente des Kraftpfeils und hebt diese auf. Somit wirkt theoretisch nur noch die y -Komponente der Auftriebskraft, welche den Drachen in die Höhe steigen lässt. Damit dieser Vorgang wirklich funktioniert, muss beim Bau des Drachens darauf geachtet werden, dass die Leine den Drachen in einer bestimmten Position hält. Dazu verwendet der Drachebauer meist eine Schnurwaage.

Während er nun nach oben steigt, ändert er seinen Anstiegswinkel gegenüber der Erde, bis er fast parallel zur Windrichtung steht. Somit bietet er dem Wind nur noch eine geringere Angriffsfläche. Er wird nicht weiter nach oben getrieben, da sich Auftriebskraft des Drachens mit der Haltekraft der Leine, zusammen mit der Gewichtskraft des Drachens, aufhebt. Dass er jedoch diese leichte Schräge behält, liegt an der speziellen Bauart eines Drachens. Der Massenmittelpunkt und somit der Gewichtsschwerpunkt des Drachen liegen etwas unterhalb des Auftriebsschwerpunktes. Als Auftriebsschwerpunkt wird dabei der Punkt gesehen, an welchem die Auftriebskraft durch den Wind zentral wirkt. Er wird maßgeblich von der Form des Drachens beeinflusst, wohingegen der Massenmittelpunkt im Wesentlichen von der Masse des Drachenkreuzes abhängt. Die Auftriebskraft und die Gewichtskraft des Drachens stehen nur dann genau entgegengesetzt aufeinander, wenn



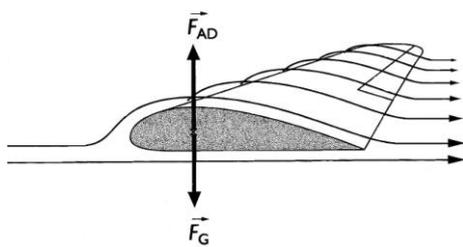
sich der Drache leicht schräg gegen den Wind anstellt. Durch die leichte Schräge entsteht oberhalb des Segels immer noch ein Unterdruck und somit eine Auftriebskraft, welche die Gewichtskraft des Drachens aufhebt und ihn am Himmel hält. Er kann so bei gleich bleibendem

Wind stundenlang an einer Stelle stehen bleiben. Das ist also die Funktionsweise eines herkömmlichen Drachens. Im Laufe der Zeit sind verschiedene Variationen des Drachens entstanden, so gibt es heute unter anderem auch Lenkdrachen, bei welchen die Auftriebs- und Haltekräfte etwas anders aufgeteilt sind. Das Grundprinzip, warum ein Drache in der Luft bleibt, ist dabei allerdings gleich geblieben.

3.2 Windsurfen

Ein bekannter Sport ist auch das Surfen. Der Sportler besitzt dabei ein stromlinienförmig gebautes, schwimmendes Brett, welches mit einem Segel ausgestattet ist. Dieses Surfbrett soll ihm ermöglichen, auf den Wellen entlang zu gleiten. Der erste Schritt ist dabei, dass er auf dem Brett sein Gleichgewicht halten kann. Steht er sicher, so kann er den Mast des Segels aufstellen. Das Segel selbst besitzt einen Haltegriff (Gabelbaum) für den Surfer, ist nach allen Seiten drehbar am Brett befestigt und besteht aus einem wetterfesten, biegsamen Material. Das Segel ist nicht nur Antrieb des Surfbretts, sondern auch zum Lenken da. Doch zunächst soll der Antrieb des Surfers betrachtet werden. Er funktioniert nach dem Tragflächenprinzip. Durch den Wind ergibt sich ein so genannter Segelbauch, also eine Auswölbung des Segels in eine Richtung. Zum Start wird das Segel schräg in den Wind

gehalten, sodass die Luft seitlich an dem Segel vorbeiströmt, die folgende Abbildung zeigt,



Kräfte an einem Tragflügel
 F_{AD} dynamische Auftriebskraft
 F_G Gewichtskraft

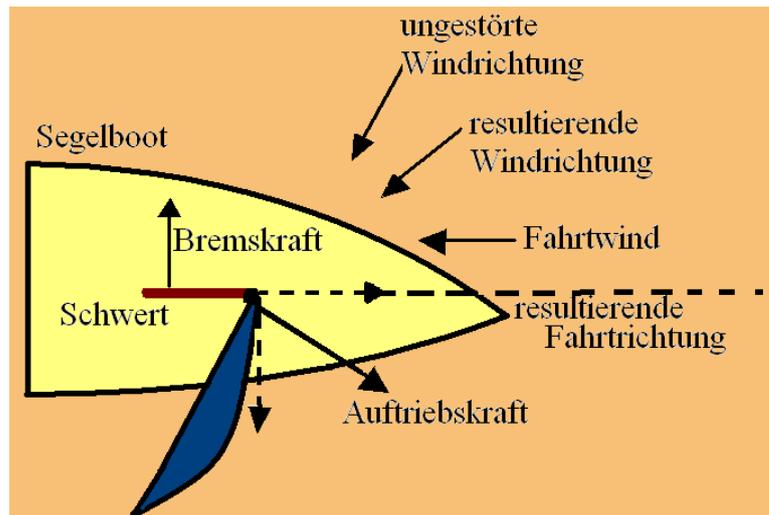
wie genau. Durch die Asymmetrie des Segels entsteht nun folgende Situation: die Luft strömt mit gleicher Geschwindigkeit an das Segel heran. Um daran vorbeizugelangen, teilt sie sich auf, ein Teil der Luft strömt links am Segel vorbei, ein anderer rechts. Durch die Auswölbung im Segel ist dabei jedoch einer der beiden Wege länger, was zur Folge hat, dass

ein Luftteil schneller am Segel vorbeiströmen muss, als der andere, damit sie sich zur gleichen Zeit wieder hinter dem Segel treffen. Die Luftteilchen auf der einen Segelseite haben also eine höhere Geschwindigkeit als die Luftteilchen der anderen Seite. Daraus ergibt sich auf der schneller bewegten Seite ein niedrigerer Luftdruck. Als Druckausgleich entsteht eine Kraft welche senkrecht zur Segelfläche und in Richtung des niedrigen Druckes wirkt. Diese Auftriebskraft entsteht nach dem Gesetz des statischen Unterdrucks immer dann, wenn ein asymmetrisch geformter Körper von Flüssigkeiten oder Gasen umströmt wird. Sie bringt das Surfbrett dazu, sich zu bewegen. Um nun auch die Richtung steuern zu können, in die sich der Surfer bewegt, muss nur das Segel etwas nach vorn oder hinten gedreht werden. Bei mittlerer Stellung des Segels befindet sich der so genannte „Druckpunkt“ des Segels genau über dem Schwertdruckpunkt, welcher meist in der Nähe des Massenmittelpunktes des Surfbretts liegt (genauere Erklärungen zur Kräfteverteilung am Segel und zum Schwert folgen in Kapitel 3.3). Es fährt nun geradeaus. Wird das Segel etwas nach vorn bewegt, so wandert die Auftriebskraft ebenfalls nach vorn und auf den Bug, also den Vorderteil des Surfbretts, wirkt eine stärkere Kraft ein als auf das Heck des Surfbretts. Die Fahrtrichtung ändert sich also durch Kippen des Segels. Dabei bestimmt die genaue Auslenkung des Segels den Fahrwinkel des Surfers zur Windrichtung, in diesem Fall fährt es allerdings eher mit dem Wind. In entgegen gesetzter Richtung fährt es, wenn das Segel nach hinten gekippt wird und der Druckpunkt nun hinter dem Schwertdruckpunkt des Surfbretts liegt. Dann wirkt auf das Heck des Surfbretts eine größere Kraft als auf den Bug, daraus folgend steuert es gegen den Wind. So kann der Surfer nahezu beliebig auf dem Wasser fahren und auf den Wellen reiten. Eine Besonderheit des Surfens gegenüber anderen Segelsportarten ist das so genannte „Gleiten“. Der Surfer muss sich hierbei durch die Seitenkraftkomponente zum "Gegenhalten" nach hinten lehnen. Dabei zieht er das Segel in eine schräge Position. Bei extrem starkem Wind liegt der Surfer fast auf der Wasseroberfläche und hält das Segel dicht über sich. Bei dieser

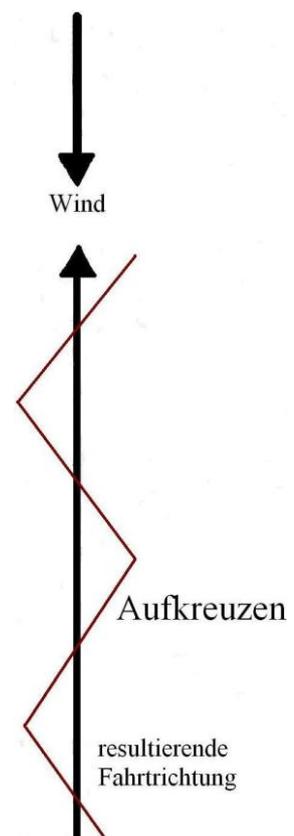
Segelposition entsteht nun eine Kraftkomponente nach oben, die das Gewicht des Surfers und des ganzen Brettes fast vollständig kompensiert. Das Brett gleitet dann mit extrem hoher Geschwindigkeit übers Wasser. Surf-Profis nutzen diesen Effekt auch, um über Wellen zu springen. Durch die Entlastung sind sie länger in der Luft als ein „normaler“ Sprung es zulassen würde. Eine weitere Besonderheit für den Surfer ergibt sich beim „Achterwind“. Hierbei kann er die Segelfläche einfach in den Wind drehen. Der Wind bläst dann direkt in das Segel und bewegt es nur durch seine Druckkraft auf das Segel vorwärts, der Tragflügeleffekt kommt hierbei nicht zur Wirkung.

3.3 Segelboote

Ähnlich wie das Surfbrett bewegt sich auch ein Segelboot vorwärts. Segelboote - in Form, Größe und Ausführung sehr verschieden - gleichen sich jedoch alle im grundlegenden Aufbau: das Boot besitzt einen Mast, also einen langen Pfahl aus Holz oder Metall, an welchem ein Segel, also ein großes, meist dreieckig geschnittenes Tuch, aufgezogen werden kann. Unten am Mast befindet sich, senkrecht zum Mast liegend, der Baum, an welchem die Unterseite des Segels festgemacht werden kann. Der Mast steht fest, aber der Baum, welcher nur am Mast festgemacht ist, kann auf einer horizontalen Ebene um den Mast recht frei gedreht werden. Das Segel ist also, obwohl es fest aufgespannt bleibt, beweglich. Dieser Effekt wird dazu ausgenutzt, das Segel immer optimal in den Wind zu stellen. Hat es diese Position erreicht, so sichert man sie, indem der Baum mit Seilen in seiner Position festgezogen und somit gegen weiteres Drehen gesichert wird. Optimal in den Wind stellen heißt dabei, es so zu positionieren, dass die Kraftübertragung am effektivsten vonstatten gehen kann. Die meisten Segelboote besitzen neben dem eben beschriebenen Hauptsegel noch ein Vorsegel, welches in ähnlicher Weise etwas weiter vorn am Boot festgemacht ist und ebenfalls zur Kraftübertragung dient. Die Funktionsweise ist hierbei wieder das Tragflügelprinzip, welches bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wurde. Es entsteht eine Druckausgleichskraft senkrecht zur Segelfläche. Würde diese Kraft allerdings ungebremst die Antriebskraft des Bootes sein, so würde es stets seitlich über das Wasser fahren. Um die resultierende Fahrtrichtung eines Segelbootes so zu lenken, dass es „geradeaus“ fährt, besitzt jedes Segelboot ein Schwert. Das Schwert ragt nach unten aus dem Boot ins Wasser hinaus. Es durchbricht die stromlinienförmige Form der Bootsunterseite und beeinflusst somit die Kraftwirkung am Boot. Es erzeugt also eine Bremskraft in eine bestimmte Richtung.



Die Abbildung zeigt die schematische Darstellung eines Kräfteparallelogramms der entstehenden Kräfte am Boot. Die Auftriebskraft, zerlegt in zwei Komponenten, wird in eine Richtung abgebremst durch die Gegenkraft, oder auch Bremskraft, des Schwertes. Daraus folgt, dass die resultierende Kraftrichtung verschoben wird und sich das Boot in einem spitzen Winkel zur Windrichtung vorwärts bewegt. Dabei kann das Boot eine schnellere Geschwindigkeit erreichen, als der Wind. Durch ein Steuer kann die Fahrtrichtung des Bootes gesteuert werden. Allerdings kann ein Segelboot nie direkt gegen den Wind fahren. Das Tragflügelprinzip und die Lenkung durch das Schwert funktioniert nur in einem Sektor jeweils 45° rechts und links der Windrichtung. Insgesamt gibt es also etwa einen 90° Winkel, in dem das Boot nicht fahren kann, wobei die genaue Größe dieses Winkels je nach Bauart des Bootes variieren kann. Da ein Boot jedoch meist ein Ziel hat und ihm der Weg dahin eine bestimmte Richtung vorgibt, muss es manchmal gegen den Wind fahren. Dazu gibt es ein spezielles Segelmanöver, welches „Aufkreuzen“ genannt wird. Dabei fährt das Boot nicht in einem direkten Kurs, sondern in einer Zick-Zack- Linie auf sein Ziel zu. Der Segler lenkt das Boot dazu erst knapp rechts außerhalb des nicht befahrbaren Sektors vorbei und wiederholt das gleiche knapp links neben dem eben erwähnten Sektor. Das ist zwar gegenüber dem direkten Kurs gegen den Wind ein recht großer Umweg, aber durch das Kraftübertragungsprinzip der einzige Weg für das Boot, gegen



den Wind zu steuern. Es ist bei diesem Manöver auch zu beachten, dass die Bootsgeschwindigkeit nahe dem unsegelbaren Bereich schon drastisch abnimmt. Wählt man beim Aufkreuzen also einen Kurs sehr nahe am Sektor, man spricht auch von „hart am Wind“, so ist der Weg zwar kleiner, aber man braucht für die kürzere Strecke trotzdem wesentlich länger. Es empfiehlt sich hier also ein Kompromiss zwischen kurzem Weg und hoher Geschwindigkeit.

Neben dem Aufkreuzen gibt es noch weitere Kurse, die ein Segelboot einschlagen kann. Wie im Kapitel 3.2 schon beschrieben, kann es beim Achterwind (achter kommt dabei aus dem Niederdeutschen und meint alles, was hinter der Mitte liegt) sozusagen vor dem Wind segeln. Die Segel werden voll ausgerollt, die Seile vom Baum werden gelöst und der Wind drückt das Segel direkt vor sich her und schiebt somit das Boot an. Allerdings ist das nicht der schnellste Kurs des Bootes, wie bereits gesagt kann es bei entsprechendem Kurs eine größere Geschwindigkeit erreichen als der Wind selbst. Das liegt daran, dass (außer beim Achterwind) nicht die Windkraft selbst, sondern eine am Segel entstehende Druckausgleichskraft für den Antrieb des Segelbootes verantwortlich ist. Am größten ist diese Kraft, wenn der Wind direkt von der Seite, also in Fahrtrichtung gesehen direkt von rechts oder links, kommt. Dies nennt man „Halber Wind Kurs“. Hier fährt das Boot am schnellsten. Als Anströmrichtung ist hierbei jeweils die Kombination aus wirklicher Windrichtung und Fahrtwind gemeint. Kommt der Wind nun weiter von schräg vorn, so bezeichnet man den Kurs als „Am Wind“. Dreht der Wind nun weiter, sodass er schon fast von vorn kommt, reden die Segler vom „Hart Am Wind Kurs“. Weiterhin gibt es noch den „Raumschots Kurs“ - wenn der Wind weiter von hinten kommt als bei „Halber Wind Kurs“ - und den „Vorwind Kurs“ – hierbei weht der Wind direkt von hinten. Die Aufgabe des Seglers ist es nun, das Segel je nach Windrichtung richtig zu stellen. Wenn der Wind weiter von vorn kommt, müssen die Segel auch weiter angezogen werden, damit sie einen wirklichen Widerstand für den Wind bieten. Wenn der Wind aber weiter von hinten kommt, so müssen die Segel weiter herausgelassen werden, damit überhaupt eine Kraftübertragung stattfindet. Dies ist für die Seeleute eines großen Schiffs oft harte Arbeit, vor allem, wenn sie „Hart am Wind“ fahren. Es gibt viele Geschichten von der Umsegelung von Kap Horn. Dort mussten die Seeleute "Hart am Wind" solange kreuzen, bis sie an Kap Horn vorbei waren. Das dauerte viele Wochen bei extremen Witterungsbedingungen. Oft wurde das Vorhaben unterwegs abgebrochen und mit "erholsamem" Achterwind zurückgesegelt.

3.4 Segelflugzeuge

Nicht nur auf dem Wasser wird die Kraft des Windes genutzt, auch in der Luft nutzt man sie, um sich vorwärts zu bewegen. Beispiel dafür sind Segelflugzeuge. Der Unterschied zu normalen Flugzeugen liegt hierbei darin, dass Segelflugzeuge keinen Motor besitzen. Sie bestehen nur aus einem stromlinienförmigen Körper mit zwei Tragflächen. Beim Flug muss folgendes Kräftegleichgewicht entstehen: Die Gewichtskraft des Flugkörpers muss durch den Auftrieb aufgehoben werden und der Luftwiderstand darf nicht größer sein als der Vortrieb. Wie der Auftrieb zustande kommt ist leicht zu erklären. Es ist die Auftriebskraft, dessen Entstehung bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert wurde. Der Start eines Segelflugzeugs sieht nun folgendermaßen aus: Das Flugzeug steht auf dem windigen Flugplatz, die Tragflächen des Segelflugzeugs werden von der Luft umströmt und es entsteht an den Tragflächen und auch am Höhenleitwerk, der umgangssprachlich Schwanz genannten Erhebung am hinteren Teil des Segelflugzeugs, eine Auftriebskraft, welche das Flugzeug im schräg nach oben gerichteten Flug anhebt. Der Startvorgang wird entweder durch eine Seilwinde oder durch ein vorausfliegendes Schlepp- Motorflugzeug eingeleitet, da die Bodenwinde nicht ausreichen, um ein Segelflugzeug anzuheben. Nach dem Abkoppeln von der Seilwinde bzw. dem Schlepper fliegt es völlig frei und sinkt nur dann, wenn der Auftrieb kleiner wird als die Gewichtskraft. Interessanter ist jedoch die Entstehung des horizontalen Gleichgewichts. Da das Segelflugzeug, wie bereits erwähnt, keinen Motor oder Propeller besitzt, um eine Antriebskraft zu erzeugen, wird hier die Kraft des Windes genutzt. Das hat natürlich viele Vorteile, zum Beispiel machen Segelflugzeuge keinen Lärm, es muss kein teures Benzin gekauft werden und somit werden auch keine Schadstoffe in die Umwelt abgegeben. Doch die Entstehung des Vortriebes ist etwas komplizierter. Er ist stets eine Komponente der Gewichtskraft und wirkt immer schräg in Richtung Erde. Das Segelflugzeug kann also nur im abwärts gerichteten Gleitflug vorwärts kommen. Allerdings wäre es nie lange in der Luft, wenn es nicht durch die Nutzung von Aufwinden immer wieder von neuem in die Höhe getrieben werden würde. Ein Aufwind von nur 2 m/s kann das Flugzeug innerhalb von 10 min auf eine Höhe von 900 m tragen. Die so gewonnene Höhe kann das Flugzeug dann wieder abgleiten, um den nächsten Aufwind zu suchen.

Doch was ist ein Aufwind überhaupt? Als Aufwinde werden Winde bezeichnet, welche von der Erde aus gesehen nach oben gerichtet sind und somit das Flugzeug mit sich nach oben tragen können. Der Segelflugsport teilt die Aufwinde im Allgemeinen in drei verschiedene Arten ein (siehe Abbildungen im Anhang). Es gibt Hangwinde, die

thermischen Aufwinde (kurz Thermik) und Wellenaufwinde. Am leichtesten verständlich ist die Erklärung der Hangwinde. Ein Wind, der in der Ebene horizontal weht, wird durch ein Hindernis (z. B. einen Hügel oder einen Wald) nach oben abgelenkt. Im aufsteigenden Teil des Luftstroms kann sich ein Segelflugzeug nach oben tragen lassen. Solche Aufwinde reichen mitunter doppelt so hoch wie das Hindernis selbst. Am häufigsten sind Hangwinde im Gebirge anzutreffen. Das Segelfliegen außerhalb gebirgiger Regionen wurde daher erst mit der Entdeckung der Thermik möglich. Sie ist die Erklärung dafür, dass große Greif- oder Wasservögel oft stundenlang ohne einen Flügelschlag auch im Flachland kreisen können. Und was bei den Vögeln funktioniert, das kann ebenso von Segelflugzeugen genutzt werden. Es werden hierbei Aufwinde genutzt, welche durch das Aufsteigen „warmer Luftblasen“ vom Erdboden entstehen. Hierbei ist die stabile Luftschichtung, welche im Kapitel 2.1 bereits erklärt wurde, wichtig. Warme Luft steigt immer nach oben. Allerdings ist die Luft der nächsten Erdatmosphärenschicht instabil geschichtet, mit zunehmender Höhe wird es also kälter. Wenn nun eine erwärmte Luftmasse vom Boden in Bewegung gerät und nach oben steigt, verliert auch sie mit zunehmender Höhe an Temperatur. Sie kühlt sich pro hundert Meter um 0,6 bis 1°C ab. Wenn es nun aber mit zunehmender Höhe stets schneller kälter wird, als die aufsteigende Luft während ihres Steigens an Temperatur verliert, so bleibt sie immer wärmer als ihre Umgebung. Das heißt, sie steigt immer weiter auf. Doch nicht nur das, sie erfasst auf ihrem Weg auch die sie umgebende Luft, welche durch den Temperatenausgleich gegenüber der eigentlichen Lufttemperatur wärmer wird und ebenfalls beginnt, eine aufsteigende Bewegung durchzuführen. Aus der anfänglichen aufsteigenden Blase ist nun eine Art Schlauch geworden. Diese Art von Aufwinden kommt dem Segelflugsport sehr zugute, da auf diese Art und Weise z. B. auch im norddeutschen Flachland Segelflugzeuge gestartet werden können. Hier gelten Wettersituationen, welche Steiggeschwindigkeiten von 2-3 m/s und Steighöhen von mehr als 1 200 m über Grund erlauben, als gut. In anderen Gegenden der Erde können thermische Aufwinde auch Steiggeschwindigkeiten bis zu 8 m/s und Steighöhen von 4 000 m und mehr verursachen.

Am höchsten lassen Segelflugzeuge jedoch die dritte Kategorie der Aufwinde steigen, die so genannten Wellenaufwinde. Sie entstehen durch den Resonanzeffekt an sich in Wellen vorwärts bewegenden Luftmassen. Meist entstehen sie, ebenso wie die Hangaufwinde, an Bergketten. Zur Veranschaulichung der Situation soll folgendes Beispiel aus der Quelle [11] helfen: „Beobachtet man einen schnell fließenden Gebirgsbach, in dem ein großer Stein oder Fels liegt, so bemerkt man oft folgende Situation: Beim Überfließen des

Hindernisses bildet das Wasser einen Buckel und hinter dem Buckel eine Art Tal. Etwas dahinter folgt ein weiterer Buckel, obwohl sich an dieser Stelle kein Hindernis mehr befindet. Was man dort beobachtet ist eigentlich nichts anderes als eine Welle, nur dass diese sich immer an der gleichen Stelle befindet, da sich anstelle der Welle das Wasser fortbewegt.“ Das gleiche Phänomen kann auch in der Atmosphäre auftreten, wenn sich Wind über eine Bergkette bewegt. Steht nun an der Stelle der Nachschwingung eine weitere Bergkette, so wird dieser Wellenberg durch den Resonanzeffekt deutlich höher sein als der über der ersten Bergkette. Dieser Vorgang kann sich nun auch an einer dritten Bergkette fortsetzen. Allerdings ist das Vorhandensein von Bergketten für die Entstehung von Wellenaufwinden nicht unbedingt erforderlich, man spricht auch von thermischen Wellenaufwinden. Sie können bis in die Stratosphäre reichen (Erklärung Atmosphärenschichten der Erde siehe Kapitel 2.1) und bei Segelflugzeugen Steiggeschwindigkeiten von mehr als 15 m/s erzeugen. Der anerkannte Höhenweltrekord, den ein Segelflugzeug aufgrund eines Wellenaufwindes je erreicht hat, liegt bei fast 15 000 m. Da Segelflugzeuge in der Regel jedoch nicht nur besonders hoch fliegen, sondern auch Kunststücke wie Drehungen oder Loopings in der Luft vollführen, muss ein Segelflugzeug auch lenkbar sein. Es kann sich um alle drei Achsen im Raum drehen. Im Wesentlichen wird es mit den Rudern (Abbildung 3.1 im Anhang) gesteuert. Das Höhenruder befindet sich am Höhenleitwerk des Segelflugzeugs. Es kann durch einen Steuerknüppel im Cockpit nach oben oder unten ausgelenkt werden und beeinflusst somit die Balance der Querachse (grafische Darstellung der Flugzeugachsen Abbildung 3.2 im Anhang). Wird es nach oben ausgelenkt, so entsteht eine größere Auftriebskraft am Höhenruder. Der Schwanz des Flugzeugs wird dadurch nach oben gehoben, die Nase neigt sich nach unten. Das Seitenruder befindet sich ebenfalls am hinteren Teil des Flugzeugs, er wird Seitenleitwerk genannt. Diese Lenkvorrichtung kann eine Rechts- oder Linksdrehung des Flugzeugs in der Horizontalen bewirken. Dazu wird das Seitenleitwerk nach einer Seite ausgelenkt. Eine Auslenkung nach links bewirkt dabei eine stärkere Kraft auf der linken Seite des Flugzeugs, die Flugzeugnase dreht sich also nach links. Als Ergänzung zu diesem Steuerelement gibt es noch die Querruder. Sie sind jeweils am äußeren Ende der Tragflächen angebracht. Wird nun z. B. das rechte Querruder nach oben ausgelenkt, so wird dort ein Abtrieb erzeugt und gleichzeitig wird das linke Querruder nach unten ausgelenkt und erzeugt einen Auftrieb. Die rechte Fläche senkt sich und die linke Fläche hebt sich, das Flugzeug dreht sich also um die Längsachse. Dieses Ruder ist notwendig als Ergänzung zum Seitenruder, da nur durch kombiniertes Einsetzen der beiden Ruder ein

sauberer Kurvenflug möglich ist. Zur besseren Steuerung der Landung gibt es noch verschiedene Bremsklappen, welche ebenfalls an den Tragflächen des Flugzeugs angebracht sind. Sie können beim Landeanflug ausgefahren werden, den Luftwiderstand der Tragflächen erhöhen und das Flugzeug somit abbremsen. Allgemein kann noch gesagt werden, dass jedes Segelflugzeug bestimmte Flugeigenschaften bzw. Flugleistungen besitzt. Dazu gehört zum einen die Mindestgeschwindigkeit, also die Geschwindigkeit, mit der sich das Flugzeug mindestens vorwärts bewegen muss, damit es in der Luft bleibt. Sie liegt meist bei etwa 60 – 70 km/h. Zum anderen sei auch die Höchstgeschwindigkeit gegeben, welche niemals überschritten werden darf, damit die Tragflächen durch die starken Luftkräfte nicht abbrechen können. Hierbei wird meist ein Wert zwischen 200 und 300 km/h angegeben. Je nach Bauart des Segelflugzeugs unterschiedlich sind Gleitverhältnis und geringstes Sinken. Das Gleitverhältnis gibt an, wie weit ein Flugzeug in ruhiger, ungestörter Luft gleiten kann. Normale Segelflugzeuge besitzen dabei einen Wert zwischen 1:25 und 1:45, was bedeutet, dass das Flugzeug aus einer Höhe von 1 000 m zwischen 25 und 45 km weit segeln kann. Das geringste Sinken liegt etwa in der Größenordnung von 60 cm pro Sekunde. Damit könnte ein Segelflieger bei ruhiger Luft aus 1 000 m Höhe also etwa 25 Minuten segeln. Um beim Flug stets zu wissen, wie sich die Luft draußen verhält, ist das Cockpit eines Segelflugzeugs mit verschiedenen Messgeräten ausgestattet. Dazu gehören ein Höhenmesser, ein Fahrtmesser, ein Variometer, ein Kompass, ein Funkgerät und der Faden. Der Höhenmesser erklärt sich mit seinem Namen schon selbst, er gibt die momentane Höhe des Segelflugzeugs an. Dazu muss er vor dem Start auf den aktuellen Luftdruck des Flugplatzes eingestellt werden. Da mit zunehmender Höhe der Luftdruck sinkt, berechnet er aus der Luftdruckabnahme die Höhe des Flugzeuges. Ebenfalls ein Differenzluftdruckmessgerät ist der Fahrtmesser. Er misst den Druck der relativ unverwirbelten Luft, durch die sich das Flugzeug bewegt und den Druck der Luft, welche beim Flug in ein Staurohr am Flugzeug eindringt. Diese Luft wird durch die Bewegung des Flugzeugs in einem bestimmten Grad verwirbelt. Aus der Differenz der beiden Luftdrücke kann der Fahrtmesser nun die momentane Geschwindigkeit des Segelflugzeugs in der Horizontalen anzeigen. Variometer gibt es in vielen verschiedenen Ausführungen, im Grunde zeigen sie jedoch alle die vertikale Steig- oder Sinkgeschwindigkeit des Segelflugzeugs relativ zur umgebenden Luft an. Die Funktionsweise der unterschiedlichen Variometerarten ist sehr verschieden und soll daher an dieser Stelle nicht näher untersucht werden. Auch Kompass und Funkgerät brauchen nicht näher erläutert werden, da diese Geräte aus verschiedensten Bereichen bekannt sind.

Der Faden allerdings ist ein für den Segelflug typisches Kennzeichen. Er ist an der Frontscheibe des Cockpits angebracht und zeigt dem Piloten stets, aus welcher Richtung der Wind weht. Der gut ausgebildete Pilot ist mit allen technischen Anzeigen und Steuerelementen eines Segelflugzeuges vertraut und kann in einem Segelflugzeug allein durch die Kraft des Windes mehrere Stunden lang über der Erde fliegen.

3.5 Windmühlen

Neben dem Sport findet die Windkraft auch Anwendung in der Wirtschaft. Bereits im Mittelalter haben die Müller mit ihren damals schon gut funktionierenden Bockwindmühlen Mehl gemahlen. Die Windkraft wurde dabei in eine Drehbewegung der Windmühlenflügel und weiter in eine Bewegung des Mühlsteines umgewandelt. Die Technik der Windmühlen wurde im Lauf der Jahre weiterentwickelt, sodass es verschiedenste Variationen von historischen Windmühlen gibt. Doch im 20. Jahrhundert wurde die Windkraft bei der Suche nach alternativen Energieerzeugern als wirtschaftliche Nutzenergie wiederentdeckt. Die Umwandlung der Windkraft in eine Drehbewegung vollzieht sich nun an immer mehr modernen Windrädern, welche mit Hilfe eines Generators die Drehbewegung des Windrades in Strom umwandeln. Dieser Strom wird in das Stromnetz des jeweiligen Landes eingespeist und trägt somit seinen Teil zur „sauberen“ Stromgewinnung, also Stromerzeugung ohne umweltschädliche Abfallprodukte, bei. Die Funktionsweise am Rotor (eine Bezeichnung für den Windmühlenflügel) ist das bereits in Kapitel 3.2 erklärte Tragflügelprinzip. Rotorblätter sind asymmetrisch geformt und bieten dem daran entlang strömendem Wind somit einen ungleichmäßigen Widerstand. Geschwindigkeit und Luftdruck verändern sich, es entsteht eine Druckausgleichskraft, welche den Rotor in Bewegung bringt: das Windrad dreht sich. Im folgenden Kapitel sollen nun Berechnungen am Windrad genauer betrachtet und erläutert werden.

4. Aerodynamische Berechnungen am Windrad

Die Aerodynamik, zu Deutsch Strömungslehre, ist ein Teilgebiet der Physik, mit dessen Hilfe sich viele Berechnungen am Windrad anstellen lassen. Das nun folgende Kapitel soll ausgewählte aerodynamische Gesetze erläutern und bestimmte Rechnungen am Windrad vorstellen.

4.1 Gesetz von Bernoulli

Wie viel Energie des Windes kann überhaupt durch ein Windrad „abgeerntet“ werden? Auf diese Frage gibt der Physiker Bernoulli, welcher sich im 18. Jahrhundert mit der Strömungslehre beschäftigt hat, Antwort. Wendet man seine Erkenntnisse auf die Vorgänge an einem von Wind umströmten Repeller an, so kann der Leistungsbeiwert c , also der theoretische Wirkungsgrad des Repellers, berechnet werden. Wie bereits gesagt, kann ein Windrad nicht die gesamte Energie des Windes umwandeln. Man kann sich vorstellen, dass sonst die Luft hinter dem Windrad augenblicklich stehen bleiben würde. Einen Teil seiner Energie muss man dem Wind also lassen. Der Ansatz zur Herleitung der Lösungsformel für dieses Problem soll die allgemeine Gleichung zur Berechnung von kinetischer Energie sein:

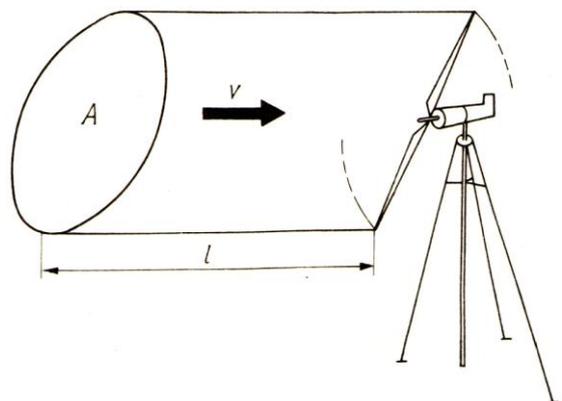
$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2.$$

Die Geschwindigkeit v wird durch die Windgeschwindigkeit gegeben, die Masse m durch eine bestimmte Luftmasse. Sie kann berechnet werden durch:

$$m = \rho \cdot V. \quad \rho \dots \text{Luftdichte } (\rho = 1,29 \text{ kg/m}^3)$$

Zur Berechnung ist es notwendig, für V ein bestimmtes Volumen zu definieren.

Laut [1] soll das ein zylindrisches Volumen mit der Grundfläche A und der Länge L sein. Hierbei wird schon das Haupthindernis der Nutzung von Windenergie deutlich: es muss ein sehr großes Luftvolumen V genutzt werden, um auf eine nennenswerte Größe für m zu kommen. Hier ein Zahlenbeispiel für die gegebene Gleichung: Ein Windrad mit dem



Flügelradius von 40m (Durchschnittswert von modernen Windkraftanlagen) soll mit einer Windgeschwindigkeit von $v = 10 \text{ m/s}$ (Windstärke 5 nach Beaufort- Skala) angeblasen

werden. In 1s strömen dann 50 265, 5 m³ Luft an dem Windrad vorbei. Eingesetzt in die Gleichung zur Berechnung der kinetischen Energie ergibt sich folgender Wert:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3 \cdot 50\,265,5 \text{ m}^3 \cdot (10 \text{ m/s})^2$$

$$E_{\text{kin}} = 3\,242 \text{ kJ}.$$

Diese vom Wind angebotene Energie lässt sich jedoch, wie bereits beschrieben, nicht vollständig von einem Windrad nutzen.

Zunächst soll nun der Staudruck berechnet werden, welcher die Windenergie je Kubikmeter angibt. Nach [1] wird er auch Energiedichte W_v genannt und berechnet, indem die bewegte Masse durch ihr Volumen dividiert wird:

$$W_v = (\frac{1}{2} m v^2) / V = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2.$$

Das Leistungsangebot des Windes berechnet sich nun aus Energiemenge dividiert durch die Zeit t , in der sie angeboten wird. Für t gilt dabei $t = L/v$, woraus sich für die Leistung P folgende Gleichung ergibt:

$$P = \frac{1}{2} m \cdot L \cdot v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3.$$

Aus dieser Gleichung kann nun abgeleitet werden, dass die angebotene Leistung des Windes proportional zur "Erntefläche" A durch das Windrad und zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit ist. Allerdings ist sie nur ein Zwischenschritt zur Berechnung der theoretischen energetischen Ausbeute durch das Windrad.

Strömt die Luft mit der Geschwindigkeit v durch die Windradebene, so wird sie durch das Windrad auf die Geschwindigkeit v' abgebremst. Der Staudruck hinter dem Windrad (Leeseite) ist also wesentlich geringer als der Staudruck vor dem Windrad (Luvseite). Die Abbildung von [1] zeigt die grafische Darstellung dieses Sachverhalts. Der Staudruck nimmt durch die Abbremsung durch das Windrad um folgenden Betrag ab:

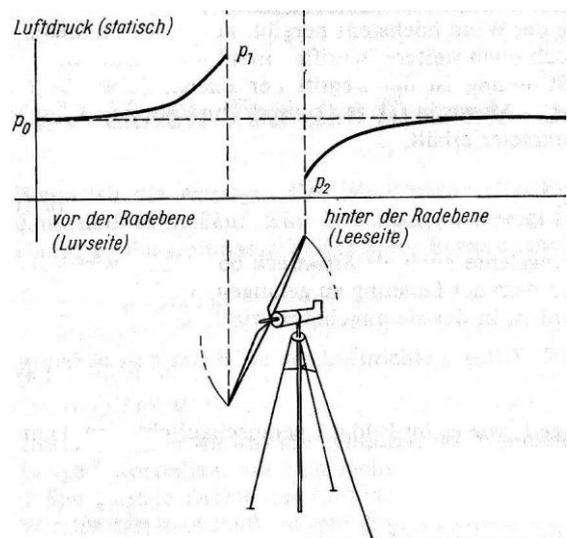
$$\Delta W_{v1} = W_{v1} - W_{v0} = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot v'^2.$$

Die Geschwindigkeit v' auf der Leeseite des Windrads bleibt jedoch nicht gleich, sie verringert sich noch einmal um den Wert v_n . Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\Delta W_{v2} = W_{v2} - W_{v0} = \frac{1}{2} \rho \cdot v_n^2 - \frac{1}{2} \rho \cdot v'^2.$$

Insgesamt muss der Drucksprung am Windrad also berechnet werden mit:

$$\Delta W_v = \Delta W_{v1} - \Delta W_{v2} = \frac{1}{2} \rho \cdot (v^2 - v_n^2).$$



Um nun den Leistungsbeiwert zu berechnen, muss zunächst die auf das Windrad wirkende Kraft F berechnet werden. Da wir bereits die Formel für die Bewegungsenergie gegeben haben und stets gilt Energie = Kraft * Weg, kommt man durch vielfältiges Umformen auf folgende Gleichung für die auf den Rotorflügel wirkende Kraft F :

$$F = \Delta W_v \cdot A.$$

Da Leistung allgemein das Produkt aus Kraft und Geschwindigkeit ist, ergibt sich nun für die Leistung P' des Windrades folgender Zusammenhang:

$$P' = F \cdot v' = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v' \cdot (v^2 - v_n^2).$$

Die endgültige Form erhält P' , indem die mittlere Geschwindigkeit v' in der Windradebene durch den Term $v' = \frac{1}{2} \cdot (v + v_n)$ ersetzt wird:

$$P' = \frac{1}{4} \cdot A \cdot \rho \cdot (v + v_n) \cdot (v^2 - v_n^2).$$

Das Verhältnis aus der Leistung P' , welche theoretisch im Windrad umgesetzt wird, zur durch den Wind angebotenen Leistung P gibt nun den Leistungsbeiwert c an:

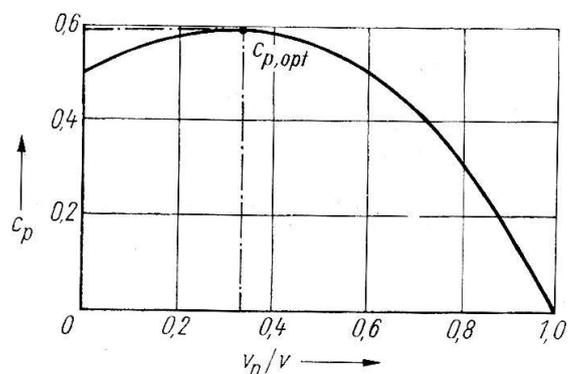
$$c = P'/P$$

$$c = \frac{(v + v_n) \cdot (v^2 - v_n^2)}{2 \cdot v^3}.$$

Die Abbildung aus [1] stellt c als Funktion in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit v_n hinter dem Windrad dar. Erkennbar ist dort, dass c seinen Hochpunkt an der Stelle $v_n = v/3$ hat.

Der Leistungsbeiwert beträgt dann:

$$c = 16/27 = 0,59259.$$



Laut [1] wird er auch als Betz- Faktor bezeichnet. Aus ihm lässt sich folgende Erkenntnis ablesen: Ein Windrad, welches die Windgeschwindigkeit ideal auf ein Drittel abbremst, hat den höchsten Wirkungsgrad. Es kann 60% der Energie des Windes übernehmen.

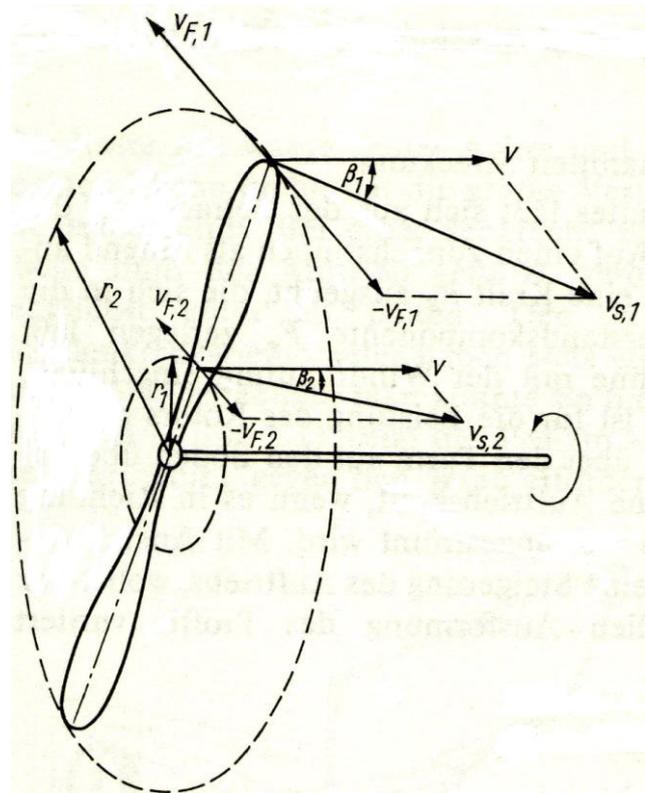
4.2 Anstellwinkel des Rotors zum Wind

Wie im letzten Kapitel bereits angedeutet wurde, liegt zwischen dem theoretischen und dem praktischen Wirkungsgrad ein großer Unterschied. Es wurde noch kein ideales Windrad gebaut, welches tatsächlich 60% der Energie des Windes umsetzen kann. Eine Ursache dafür ist folgendes Problem: der Anstellwinkel des Rotors zum Wind kann stets nur für eine bestimmte Windgeschwindigkeit exakt bemessen werden. Zur Veranschaulichung soll, wie bereits im Kapitel 3.3 zur Thematik Segelboote, ein Kräfteparallelogramm gezeigt werden. Beim Segelboot addieren sich Windgeschwindigkeit und Fahrtwind zu einer resultierenden Windrichtung, welche stets in

eine Richtung wirkt. Bei einem Windrad ist dies jedoch aufgrund der kreisförmigen Bewegung etwas komplizierter. Die Umfangsgeschwindigkeit wird, wie bei allen sich im Kreis drehenden Objekten, mit zunehmendem Radius größer. Im Zentrum des Windrades ist sie eher gering, am äußeren Rand hingegen sehr groß. Daraus ergeben sich an jedem Punkt des Rotorblatts eine verschieden große resultierende Geschwindigkeit und somit

auch eine unterschiedliche resultierende Windrichtung. Die nebenstehende Abbildung aus [1] zeigt die Kräfte am sich bewegenden Repeller grafisch dargestellt. v_F sei hierbei die Umfangsgeschwindigkeit, v die Windgeschwindigkeit und v_S die resultierende

Anströmgeschwindigkeit. Zu erkennen ist, dass an den beiden verschiedenen Entfernungen von der Achse ($r_1 < r_2$) v_S sowohl unterschiedliche Größen, als auch unterschiedliche Richtungen aufweist. Der Winkel, welcher sich zwischen der ursprünglichen



Windrichtung und der Richtung der resultierenden Anströmung ausbildet, ist in der Abbildung mit β bezeichnet. Er wird beim Rotorbau, speziell bei der Ausformung des optimalen Anstellwinkels α_{opt} zum Wind, stets beachtet.

Laut [1] liegt α_{opt} , also der Winkel zwischen Windrichtung und Mittellinie des Rotorblattes, welcher eine größtmögliche Kraftwirkung durch den Wind ermöglicht, zwischen 5° und 10° . Zur Ausformung dessen muss nun noch β addiert werden, dessen Größe durch Dreiecksbeziehungen leicht ausgerechnet werden kann. Da β jedoch an jeder Stelle des Rotorblattes eine unterschiedliche Größe erhält, entsteht eine Verwindung des Windmühlenflügels. Eine Abbildung solch eines Rotorblattes ist im Anhang unter der Nummer 4.1 zu sehen.

Das Problem liegt jedoch, wie bei der Berechnung von β zu erkennen ist, in der Windgeschwindigkeit. Der Winkel β , und somit auch der optimale Anstellwinkel des Rotors, hängt direkt von der Windgeschwindigkeit ab. Ein Rotor kann also immer nur optimal für eine bestimmte Windgeschwindigkeit gebaut werden. Wie im Kapitel 2.1

beschrieben wurde, variieren jedoch Windgeschwindigkeiten aufgrund ihrer verschiedenen Entstehungsarten und der vielfältigen Einflüsse auf ihre Entstehung ständig. Demnach kann eine Windkraftanlage, auch wenn sie noch so gut berechnet worden ist, nur selten nahe an ihren optimalen Wirkungsgrad kommen. Natürlich gibt es noch weitere Einflüsse, welche den praktischen Wirkungsgrad verringern, doch der Anstellwinkel ist hierbei sehr entscheidend. Die Abbildung 4.2 im Anhang zeigt, warum. Steht der Repeller nicht in dem Winkel zum Wind, wie er sollte, so entstehen an der Flügelspitze unerwünschte Verwirbelungen des Windes. Diese Verwirbelungen und ihre Auswirkungen auf die Energieumsetzung durch den Rotor sind zwar erklärbar, aber unberechenbar. Daher kann der praktische Wirkungsgrad eines Windrades nur durch experimentelle Versuche ermittelt werden.

4.3 Bemerkungen zur Drehzahl

Ein häufig gebrauchter Wert, um Angaben zur Leistungsfähigkeit eines Motors zu machen, ist die Drehzahl n . Beispiele für in der Praxis häufig genutzte Motoren sind Kraftwerksturbinen oder Drehstrom-Asynchronmotoren. Für diese und viele weitere Motoren ist die hohe Drehzahl, mit der sie arbeiten, charakteristisch. Denn aus dieser kann eine große Energiemenge rausgeholt werden. Genau dies ist aber der Punkt, indem sich „Windmotoren“ von der Allgemeinheit differenzieren. Sie arbeiten mit einem hohen Druck am Rotor, aber meist eher niedrigen Drehzahlen. Natürlich gibt es in dieser Hinsicht von Rotorart zu Rotorart Unterschiede, anzumerken ist auch, dass die Drehzahl ebenso von der Windgeschwindigkeit abhängt. Ist das Windrad so konzipiert, dass es bereits bei geringer Windgeschwindigkeit anlaufen soll, hat es meist schon bei mittleren Windgeschwindigkeiten seine maximale Drehzahl erreicht. Das hat zur Folge, dass sein Wirkungsgrad bei stärker werdendem Wind abnimmt. Hat der Repeller allerdings aufgrund von Größe, Form und Masse ein eher schlechtes Anlaufmoment, was bedeutet, dass er erst bei mittlerer Windgeschwindigkeit anläuft, so kann er dafür zumeist bei starkem Wind eine wesentlich höhere Energiemenge erzielen. Es arbeitet dann statt mit einer hohen Drehzahl mit einem enorm großen Druck, was sehr stabile Bauweisen und extrem festes Material erfordert. Denn andernfalls würde der starke Druck des Windes die Rotorflügel einfach abbrechen. Die Materialbelastung ist daher ein entscheidendes Thema beim Bau von Windrädern. Vor dem Bau sollten zu genauen Planung stets mittlere Windgeschwindigkeit am Standort und Verwendungszweck des Rades ermittelt werden.

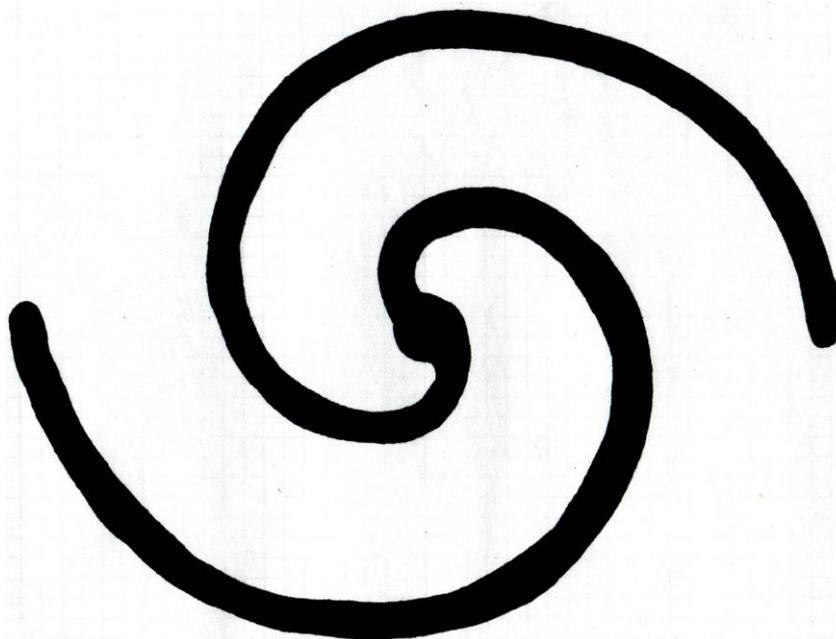
5. Analyse eines neuartigen Rotortyps

Die im letzten Kapitel genannten physikalischen Gegebenheiten eines Rotorblattes ermunterten meinen Vati und mich zu dem Versuch, selbst nach geeigneten Lösungsvorschlägen zu suchen. Die folgenden drei Probleme, welche sich bei der Energieumwandlung am Rotor ergeben, beschäftigten uns dabei vor allem:

- Die geringe Drehzahl eines Rotors, welche dazu führt, dass extrem große Kräfte über das Rotorblatt übertragen werden müssen und somit hohe Anforderungen an die Statik eines Rotorblattes gestellt werden müssen, um möglichst viel Energie übertragen zu können.
- Der Anstellwinkel zum Wind in Form von einer Verwindung des Flügels, welche stets nur für eine bestimmte Windstärke genau berechnet kann und andernfalls zu Strömungsabrissen am Rotor führt, welche ebenfalls den Wirkungsgrad des Windrades verringern.
- Das Gesetz von Bernoulli, welches besagt, dass nur ein Teil der Windenergie in Bewegungsenergie am Rotor umgesetzt werden kann.

Die heute oft verwendeten dreiblättrigen Rotoren sind diesen Faktoren stets ausgesetzt. Aber auch andere bereits entwickelte Rotorarten ähneln sich in ihrer Wirkungsweise sehr und können den genannten Fakten nicht entgehen.

Was wäre allerdings, wenn die einzelnen Blätter des Rotors nicht geradlinig auf der Nabe (Zentrum des Rotors) stehen würden, sondern spiralförmig um sie gewunden werden? Die folgende Abbildung soll diese Idee visualisieren.



Unterschiede zu den 2- oder 3- blättrigen Rotoren gäbe es auf jeden Fall, interessieren sollen uns im Folgenden die oben genannten 3 Problemstellungen.

Wie bereits beschrieben wurde, ist die Drehzahl eines 3- blättrigen Rotors eher gering. Denn das Rotorblatt bewegt sich stets senkrecht zu seiner Mittellinie auf einer Kreisbahn und beeinflusst dadurch die Windgeschwindigkeit tangential zu seinem Umkreis. Dadurch ergibt sich an jeder Stelle des Rotorblatts eine anders gerichtete und verschieden große resultierende Anströmgeschwindigkeit. Die letztendliche Drehzahl wird durch den äußersten Punkt des Rotorblattes gegeben, denn dieser muss für eine volle Umdrehung den gesamten Umfang des Rotors durchlaufen und beeinflusst die Anströmgeschwindigkeit am meisten. Diese Funktionsweise wäre bei einer 2- blättrigen Spirale (sie muss 2- blättrig sein, damit die Symmetrie des Rotors aufrechterhalten wird) anders. Und zwar würde hier nicht die Kreisbewegung des Rotorblattes die Anströmgeschwindigkeit beeinflussen, sondern die Bewegung, welche entlang des Spiralaradius verläuft. Zur Veranschaulichung soll folgendes Gedankenexperiment helfen: Stellen wir uns eine Spirale vor, die sich dreht. Beobachten wir diese, so achten wir nicht auf einen Punkt, zum Beispiel den äußersten Spiralpunkt, welcher sich auf einer Kreisbahn um den Mittelpunkt bewegt. Für uns sieht es eher so aus, als würde sich die Spirale stets von ihrem Mittelpunkt nach außen hin aufweiten. Und genau diese Bewegung beeinflusst am Rotor die Anströmgeschwindigkeit. Das heißt, dass sich die Drehzahl deutlich verbessern müsste. Denn während der Drehbewegung würde nicht der ganze Radius des Rotors über den vollen Umfang die resultierende Anströmgeschwindigkeit festlegen. Nein, die Spirale beeinflusst nur mit ihrer einfachen Radiuslänge die Windgeschwindigkeit.

Würde man also einen herkömmlichen 2- oder 3- Blattrotor mit einer 2- Blattspirale (beide Rotoren haben den gleichen Radius) vergleichen, so ergäbe sich folgendes Verhältnis:

$$u = 2 \pi r \qquad u \sim 6 r$$

Der Spiralrepeller könnte sich also theoretisch während einer Umdrehung des herkömmlichen Rotors 6-mal drehen. Eine höhere Drehzahl bedeutet immer eine geringere Kraftübertragung bei gleicher Energie. Kann Windenergie mit höheren Drehzahlen genutzt werden, so wären bei gleicher Rotorstatik größere Durchmesser möglich, wodurch sich die verfügbare „Erntefläche“ mit der 2. Potenz ($A = \pi / 4 d^2$) erhöhen würde.

Interessant ist außerdem, dass sich bei dieser Bewegung der Winkel zum Wind nach außen hin nicht verändert. Die resultierende Anströmgeschwindigkeit würde also stets den gleichen Winkel zum Rotorblatt haben. Der Rotor könnte also ein gleichmäßiges Profil haben, was ihn in der Fertigung wesentlich einfacher macht, als es bei herkömmlichen Rotoren der Fall ist. Allein um diese beiden Gegebenheiten zu überprüfen, die Erhöhung der Drehzahl und die Vereinheitlichung des Anstellwinkels, entschlossen wir uns, den Rotor zu bauen. Doch beim weiteren Nachdenken kam uns noch ein Gedanke, welcher im folgenden Text erläutert werden soll.

Wenn sich die Spirale dreht, lenkt sie, je nach Anstellwinkel, den anströmenden Wind nach außen. Sie versetzt ihn in eine schraubenförmige Bewegung, sodass sich die Luft hinter der Spiralebene leicht trichterförmig nach außen bewegen müsste. Der Anteil der auf diese Weise abgelenkten Luftmasse würde erst außerhalb des Spiraldurchmessers eine Bremswirkung auf den anströmenden Wind ausüben, so dass der Windanteil, der durch die Spirale selbst strömt, möglicherweise größer ist als ohne Ablenkung. Das Bernoulli-Gesetz würde dann für den Durchmesser der Spirale plus einen Anteil für den durch Ablenkung nach außen geführten Windanteil angesetzt werden müssen. Sollte sich diese zunächst rein hypothetische Überlegung bestätigen, wäre der Spiralrepeller in der Lage, mehr Energie umzusetzen als sein unkorrigierter Durchmesser es nach Bernoulli erlaubt.

Doch zunächst muss nun bewiesen werden, dass sich die Spiralkonstruktion überhaupt als Repeller eignet.

6. Bau des Rotors

6.1 Dokumentation

Bevor es zum Bau des Rotors kommen konnte, musste dieser natürlich genau geplant werden. Wie es aber laut Erfahrung bei Bauarbeiten oft der Fall ist, zeigen sich in der Praxis oft spontane bessere Lösungen für einige Arbeitsschritte. Die folgenden Texte sollen die Arbeiten dokumentieren, Bilder zum Bau befinden sich im Anhang.

1. Arbeitsschritt

Um zu Beginn eine stabile Grundplatte für die Rotorform zu erarbeiten, kauften wir zunächst ein Holzbrett im Baumarkt, welches die Maße 1200 x 600 x 12mm aufwies. Entscheidend war dabei, dass es eine gewisse Dicke besitzt und mehrschichtig geklebt ist, da die Stabilität des Rotors entscheidend von dieser Grundplatte abhängen wird. Eine Höhe von 12mm erschien uns dabei als eine gute Lösung. Aus diesem Brett sollte nun also die Doppelspirale ausgesägt werden. Doch bevor dies passieren konnte, musste sie natürlich zuerst als Vorlage auf die Platte gebracht werden. Die zu beantwortende Frage war nun also: Wie konstruiert man eine Doppelspirale mit möglichst genauen Maßen, größtmöglicher Platzausnutzung und symmetrischer Form?

Dazu legten wir zunächst einen Mittelpunkt auf dem Brett fest, durch welchen wir die Mittelsenkrechten der jeweiligen Seitenkanten zeichneten. Dies geschah per Maßband und stabilem Winkelmesser aus Eisen. Anschließend konstruierten wir die jeweiligen Winkelhalbierenden zu den entstandenen rechten Winkeln, die dabei entstandenen Winkel wurden noch einmal halbiert. Die Zeichnung wies nun 16 jeweils im gleichen Winkel zueinander stehende im Mittelpunkt beginnende Geraden auf. Da sich eine Spirale dadurch auszeichnet, dass sie sich nach außen hin gleichförmig immer mehr aufweitet, mussten nun die jeweiligen Abstände der Spirallinie vom Mittelpunkt ausgerechnet werden. Dazu teilten wir den größten Radius der Spirale, welcher 40cm beträgt, durch die Anzahl der Geraden, also 16. ($40\text{cm} : 16 = 2,5\text{cm}$) Auf der ersten Gerade muss die Spirale also 2,5cm vom Mittelpunkt entfernt sein, dementsprechend auf der zweiten Gerade 5cm, auf der dritten 7,5cm, auf der vierten 10cm, ...usw. Die 16. Gerade erreicht dann den vollen Radius von 40cm. Erwähnt werden muss hierbei, dass es wichtig ist, diese Berechnungen schon anzustellen, bevor der Mittelpunkt der Spirale festgelegt wird. Denn die Grundplatte einer Spirale ist keinesfalls, wie vielleicht zuerst vermutet werden könnte, quadratisch. Zeichnet man die Senkrechte zum größtmöglichen Radius durch den Mittelpunkt, so stellt

sich folgender Zusammenhang heraus: Der größtmögliche Radius auf dieser Senkrechten ist in unserem Fall das Dreiviertel des größten Radius der Spirale. Das liegt an der Anzahl der Umdrehungen, welche die Spirale durchläuft. Unsere Spirale sollte genau eine Umdrehung haben. Das heißt, dass sie nach 270° (75% von 360° , einem vollen Kreis) ein Dreiviertel des größten Radius misst. Da bei unserer Konstruktion das Dreiviertel des größten Radius durch die Breite der Platte schon vorgegeben war (die Platte war 60cm breit, das Dreiviertel des größten Radius kann also höchstens 30cm sein) ergab sich daraus ein größter Radius der Spirale von 40cm. Die mit den berechneten Maßen auf den jeweiligen Geraden abgetragenen Punkte wurden anschließend miteinander verbunden und somit zu einer Spirale vervollständigt. Der gesamte Vorgang wurde noch einmal wiederholt, allerdings um 180° gedreht, sodass die Doppelspirale nun vollständig zu erkennen war. Um sie auch aussagen zu können, verschoben wir die vorhandenen Linien jeweils um 5cm nach innen, sodass eine Doppelspirale mit der Materialstärke von 5cm entstand. Der Mittelpunkt wurde zu einem Kreis mit dem Radius von 5cm verstärkt. Denn besonders hier im Drehpunkt des Repellers wirken im Arbeitszustand starke Kräfte. Ebenfalls zur Verstärkung zeichneten wir senkrecht zu den beiden äußersten Punkten der Doppelspirale eine 12mm dicke Strebe ein. Sie stützt die gedrehte Holzform und vermeidet bei einer Drehung des Rotors zu stark auftretende Schwingungen desselbigen.

2. Arbeitsschritt

Nachdem die Form der Repellergrundplatte nun vorgegeben war, konnte es ans Sägen gehen. Mit einer Stichsäge wurden nach und nach die überflüssigen Holzteile, welche die Doppelspirale umrundeten, entfernt. In den bereits eingezeichneten Mittelpunkt wurde zur Sicherung dessen ein Loch gebohrt. Nach anschließendem gründlichen Feilen und Schleifen des Holzes war die Repellergrundplatte fertig. Wichtig war bei diesem Arbeitsschritt genaues Arbeiten, da die Symmetrie der Doppelspirale unbedingt aufrechterhalten werden musste. Eine Unsymmetrie des Repellers hätte eine ungewollte Verschiebung des Gewichtsschwerpunktes und somit eine Verschlechterung des Anlaufmomentes zur Folge. Allerdings waren wir mit unserer Arbeit recht zufrieden, da die Holzgrundlage wesentlich stabiler war als gedacht. Dies liegt vermutlich an der Holzstärke und den eingearbeiteten Stützstreben. Diese Stabilität ist eine Voraussetzung für die Wetterfestigkeit des Repellers.

3. Arbeitsschritt

Da die Grundlage des Repellers nun fertig gestellt war, konnte die nächste große Aufgabe in Angriff genommen werden: die Formung des Profils. Dazu verwendeten wir im Handel erhältlichen Bauschaum. Dieser hat die Eigenschaft, dass er nach mehrstündigem Trocknen ein großes Platzvolumen mit festem Material ausfüllt, dafür jedoch eine sehr geringe Masse hat. Allerdings hat er auch einen Nachteil: er ist aus verschiedenen nicht natürlichen Stoffen zusammengesetzt, welche eine mangelhafte Umweltfreundlichkeit aufweisen. Er erschien uns trotzdem, da es sonst kein einfach erhältliches Material mit einer so extrem geringen Dichte gibt, als geeignet für den Bau eines Repellerprototypen. Wir besprühten die Grundplatte also beidseitig mit diesem Schaum. Damit er im zunächst flüssigen Zustand das Holz nicht verlässt, umrundeten wir die Doppelspirale mit einem sehr festen Klebeband. Dieses bildete eine Art Begrenzung, innerhalb welcher sich der Schaum während des Trocknungsvorganges ausdehnen konnte. Anschließend konnte es ohne Probleme wieder entfernt werden.

4. Arbeitsschritt

Da die Ausdehnung des Schaums mehr oder weniger beliebig erfolgt, konnte er bisher nur die Grundlage für das Flügelprofil bilden. Im nächsten Arbeitsschritt musste er nun geformt werden. Dazu planten wir zunächst, einen heißen Draht zu verwenden. Er sollte von Strom durchflossen werden und sich dadurch so erhitzen, dass er den Bauschaum glatt durchtrennen könnte. Allerdings scheiterte dieses Vorhaben an der technischen Umsetzung, welche sehr aufwendig und uns noch dazu aufgrund der anliegenden hohen Spannung als sehr risikoreich erschien. Daher wendeten wir doch Plan B, welcher durch eine Eisensäge und Schleifpapier verkörpert wurde, an. Allen Erwartungen zum Trotz erwies sich diese Methode als sehr praktikabel. Wir schnitten also zunächst gerade Kanten in den Schaum, welche dann mit leicht schrägen Schnitten zu dem entsprechenden Tragflügelprofil vervollständigt wurden. Wir richteten uns bei der Form nach der Abbildung eines Tragflügelprofils, welche im Kapitel 3.2 zu finden ist. Mit dem Schleifpapier rundeten wir die entstandenen Kanten noch etwas ab, sodass unser Rotor nun ein glattes Profil aufweist.

5. Arbeitsschritt

Zur Stabilität und Festigung des Bauschaums bestrichen wir nun das komplette Profil mit speziellem, sehr dickflüssigem Styroporkleber. Dieser verleiht dem Material nicht nur Festigkeit und eine glatte Oberfläche, sondern er ermöglicht es auch, ihn mit beliebiger Farbe zu überstreichen.

6.2 Testdrehung

Nachdem der Rotor nun also fertig gebaut war, fehlte in unserer Arbeitsfolge nur noch ein wichtiger Teil: Der Nachweis, dass er sich auch tatsächlich dreht. Denn auch wenn die Spirale schon von dem ein oder anderen Zuschauer der Bauarbeiten als sehr schönes Kunstobjekt gelobt wurde, sollte das doch nicht ihre eigentliche Bestimmung werden. Da die Witterung derzeit nicht viel Auswahl zuließ und uns auch keine technischen Mittel wie Windmaschinen oder ähnliches zur Verfügung standen, blieb uns daher nur folgendes einfaches Experiment, um eine Ersteinschätzung abgeben zu können.

Der Repeller wurde auf einen Schraubenzieher gesteckt, welcher den Drehpunkt bilden sollte. Mit dem Schraubenzieher mitsamt Repeller in der Hand musste nun eine Testperson möglichst schnell gegen den Wind rennen. Dabei sollte ein zusätzlicher Fahrt- oder Gegenwind entstehen, welcher im günstigsten Fall stark genug sein sollte, um den Repeller in Bewegung zu versetzen. Angemerkt werden muss dabei, dass die normale Windgeschwindigkeit zur Versuchszeit sehr schwach war, laut Beaufort Skala etwa Windstärke 2. Nehmen wir nun an, die Testperson erreicht eine Geschwindigkeit von etwa 15km/h, dann läge das Anlaufmoment des Rotors mit einem Radius von 0,4 m bei etwa 7m/s, was natürlich zunächst nur eine grobe Schätzung ist. Falls diese Situation jedoch tatsächlich eintreten würde, so wäre die Spirale auf jeden Fall eine ernstzunehmende Rotorform.

Nach mehrfachen Wiederholungen des beschriebenen Versuchs, auch unter Einbezug objektiver Beobachter, können wir nun aber tatsächlich sagen:

Die Spirale dreht sich!

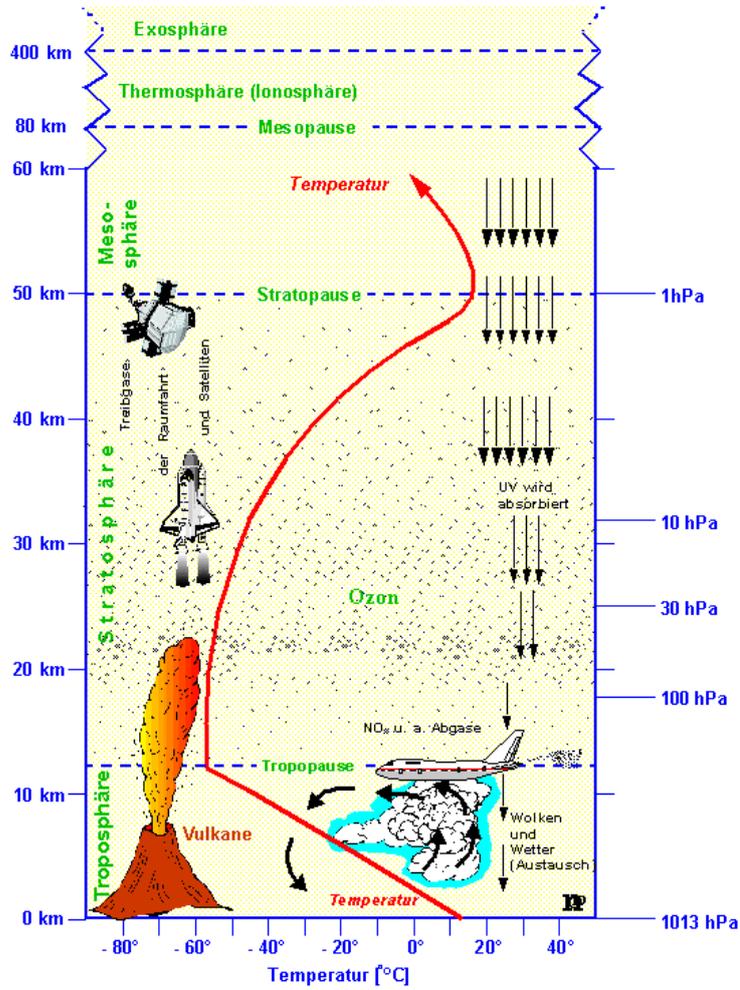
7. Auswertung

Nachdem ich mich nun zum wiederholten Mal ausführlich mit dem Thema Wind und dessen Nutzung beschäftigt habe, bleibe ich bei der Überzeugung, dass Wind eine sichere Energiequelle für uns Menschen ist. Wind ist unerschöpflich und er steht uns fast immer zur Verfügung. Mit dieser Facharbeit wollte ich die verschiedenen Möglichkeiten, wie seine Energie genutzt werden kann, veranschaulichen. Allerdings denke ich, dass an der technischen Umsetzung von Windrädern, welche die Windenergie in Strom umwandeln sollen, in Zukunft noch viel geforscht werden kann. Unser Vorschlag eines Spiralrepellers ist ein Beispiel dafür. Ob er sich tatsächlich als Repeller eignen würde, muss natürlich noch bewiesen werden. Dazu sollen noch einige Auswertungsexperimente folgen, welche jedoch aufgrund der Wetterverhältnisse zurzeit nicht durchführbar sind. Dass er sich aber überhaupt dreht, ist für uns schon einmal ein großer Erfolg, welcher uns dazu ermutigt, mit der Doppelspirale weiterzuforschen.

Anknüpfend an die Aufforderung, welche ein kluger Mann mit Namen Roger Schütz einmal sagte: „Tu was du für richtig hältst, aber bleib nicht allein damit!“, entschloss ich mich, die Facharbeit zu veröffentlichen. Dazu habe ich sie unter www.schulze-calau.de online gestellt. Vielleicht gibt es noch andere Menschen, welche an den Themen, die ich bearbeitet habe, interessiert sind oder meiner Arbeit nützliche Informationen entnehmen können. Vielleicht findet sich auch jemand, der die Idee eines Spiralrepellers interessant findet. Das würde mich als Verfasserin dieser Arbeit natürlich sehr freuen.

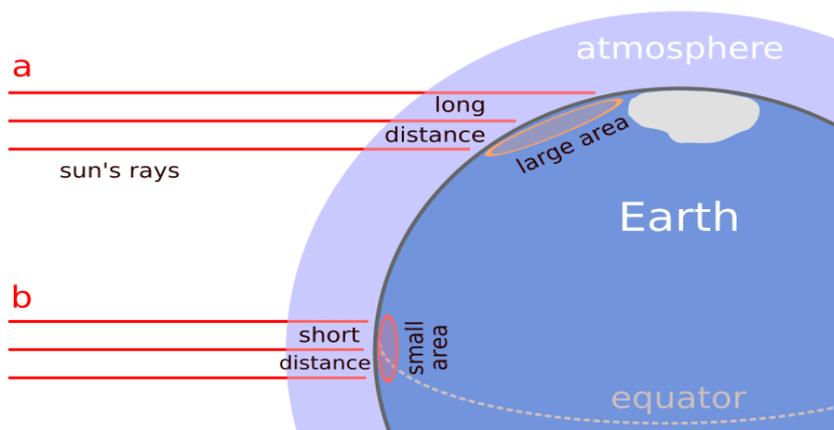
8. Anhang

Abbildung 2.1: Schichten der Erdatmosphäre



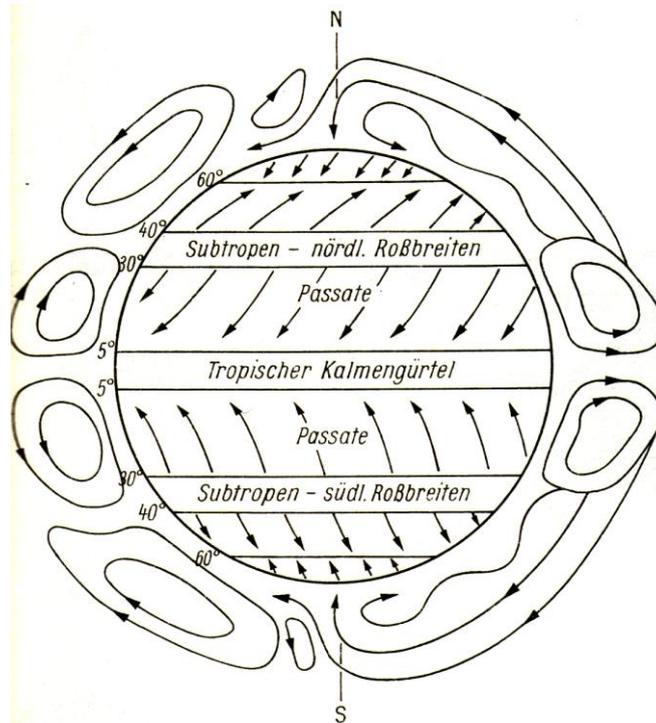
Quelle [12]

Abbildung 2.2: Weg der Sonnenstrahlen durch die Erdatmosphäre



Quelle [12]

Abbildung 2.3: grafische Darstellung Corioliskraft durch die Erdrotation



nach Quelle [1]

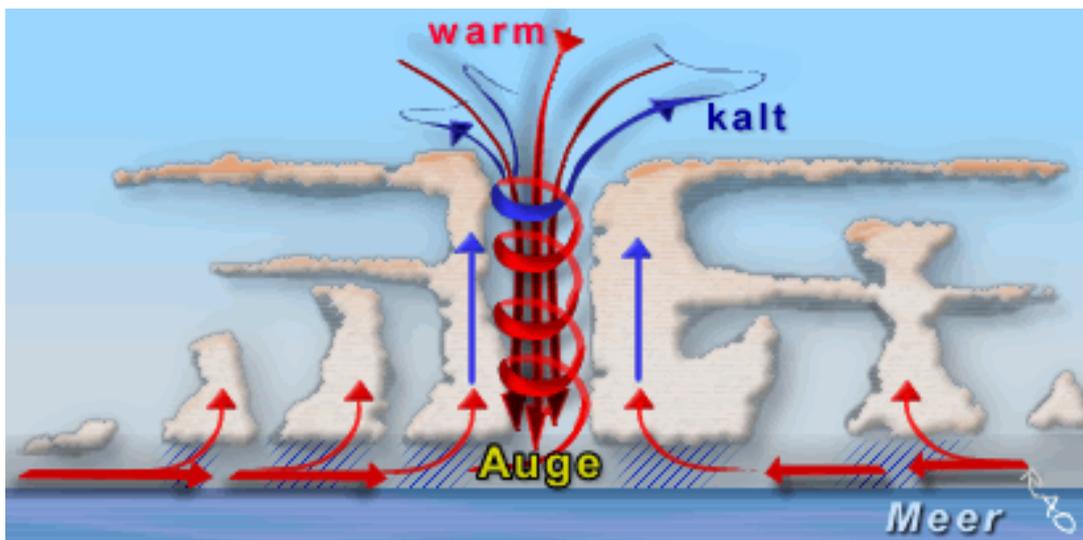
Tabelle 2.4: Beaufort- Skala

WINDSTÄRKEN NACH BEAUFORT			
Windstärke	Bezeichnung	Auswirkungen	Geschwindigkeiten des Windes in km/h
0	Windstille	vollkommene Luftruhe, Rauch steigt senkrecht empor	unter 1
1	leiser Zug	Rauch steigt nicht ganz senkrecht empor, Blätter aber noch unbewegt	1-5
2	leichte Brise	Blätter säuseln, Wind im Gesicht gerade spürbar	6-11
3	schwache Brise	Blätter und dünne Zweige bewegen sich, Wimpel werden gestreckt	12-19
4	mäßige Brise	Zweige und dünne Äste bewegen sich, loses Papier wird vom Boden aufgehoben	20-28
5	frische Brise	größere Zweige und Bäume bewegen sich, auf Seen bilden sich Schaumköpfe	29-38

6	starker Wind	auch starke Äste bewegen sich, an Hausecken und Drähten hörbares Pfeifen	39-49
7	steifer Wind	Bäume bewegen sich, spürbare Behinderung beim Gehen gegen den Wind	50-61
8	stürmischer Wind	Zweige werden von den Bäumen abgebrochen, erhebliche Gehbehinderung	62-74
9	Sturm	Dachziegel werden von den Häusern abgehoben	75-88
10	schwerer Sturm	Bäume werden entwurzelt, an Häusern schon bedeutende Schäden	89-102
11	orkanartiger Sturm	verbreitete schwere Sturmschäden	103-117
12-17	Orkan	verwüstende Wirkungen schwerster Art	>117

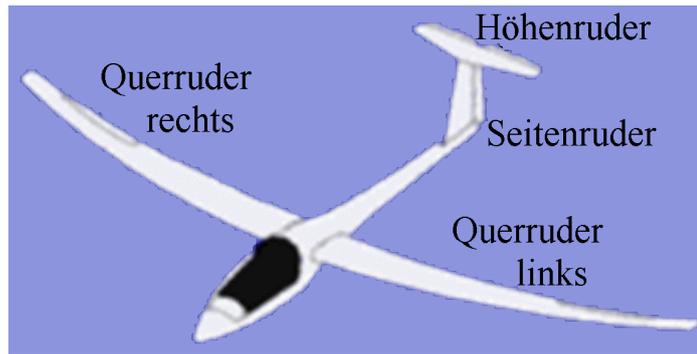
Quelle: Bertelsmann Jugendlexikon, Wissen Media Verlag GmbH, Gütersloh/München 2004 (Seite 702)

Abbildung 2.5: Schematische Darstellung einer Zyklone



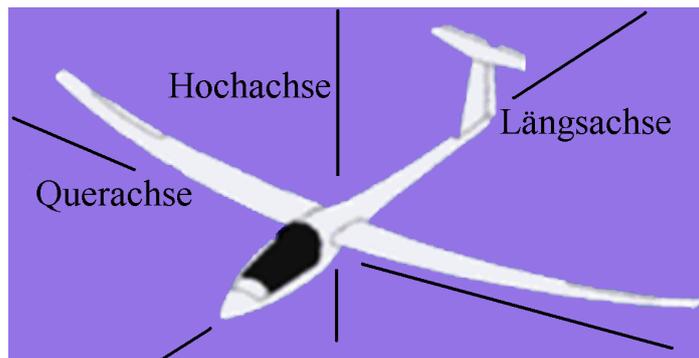
nach Quelle [11]

Abbildung 3.1: Ruder Segelflugzeug



nach Quelle [11]

Abbildung 3.2: grafische Darstellung Flugzeugachsen



nach Quelle [11]

Abbildung 3.3: Hangwind

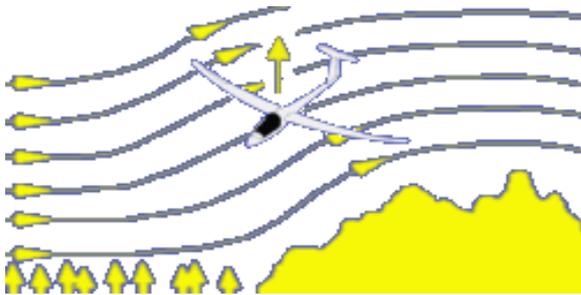
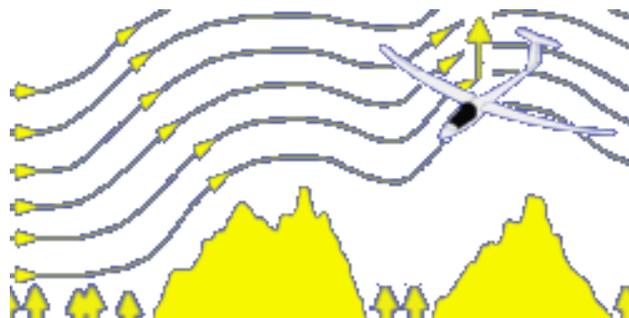


Abbildung 3.4: Thermik



Abbildung 3.5: Wellenaufwind



nach Quelle [11]

Abbildung 4.1: Verwindung im Rotorblatt

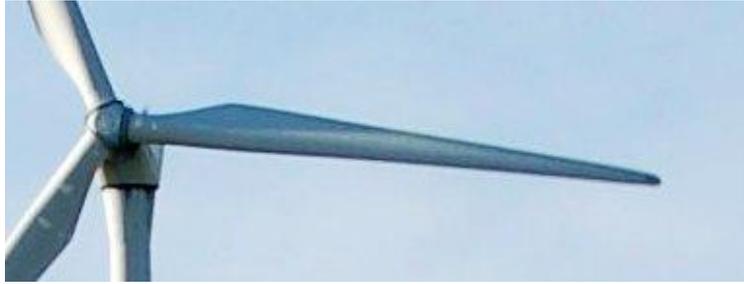
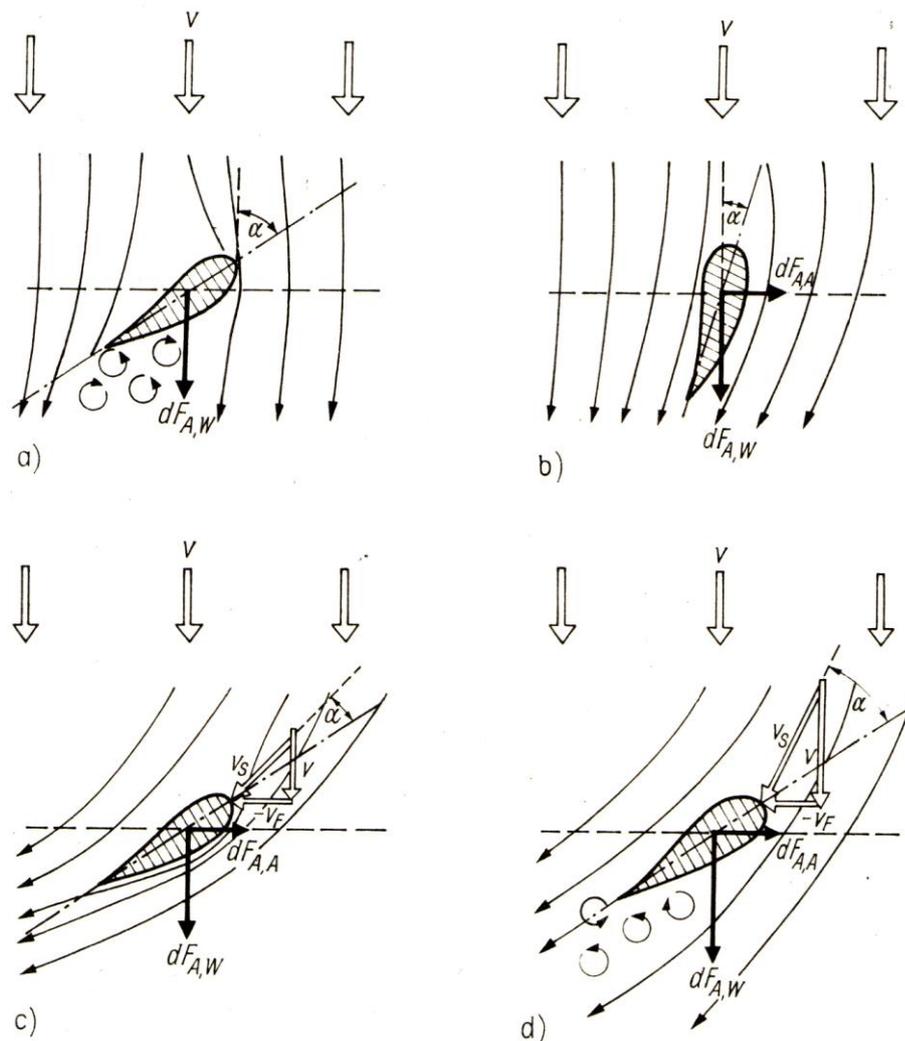


Abbildung 4.2: Strömungsverhältnisse am Rotorblatt bei verschiedenen Betriebszuständen



- stillstehendes Rotorblatt mit Anstellwinkel für Nennbetrieb, abgerissene Strömung, kein Auftrieb, Anfahren nicht möglich
- stillstehendes Rotorblatt mit verkleinertem Anstellwinkel, anliegende Strömung, Auftriebskraft vorhanden, Anfahren möglich
- rotierendes Rotorblatt im Nennbetrieb, Anstellwinkel α_{opt} gegenüber der resultierenden Anströmung, anliegende Strömung, höchstmögliche Auftriebskraft
- rotierendes Rotorblatt bei starker Bö mit Anstellwinkel für Nennbetrieb, abgerissene Strömung, dadurch Verminderung der Auftriebskraft

nach Quelle [1]

Abbildung 6.1: Konstruieren der Doppelspirale auf der Holzplatte



Abbildung 6.2: Schleifen der Repellergrundplatte



Abbildung 6.3: Profilformung des Repellers mit Bauschaum



Abbildung 6.4: Verarbeitung des Bauschaums



Abbildung 6.5: das fertige Profil



*Abbildung 6.6:
Einweihung des
Spiralrepellers*



9. Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Bennert/ Werner: „Windenergie“, VEB Verlag Technik Berlin
- [2] Rainer Crummenerl: Das Wetter, Band 7 der Reihe "Was ist was?", Nürnberg 1999
- [3] Wissensspeicher Physik Cornelsen Volk und Wissen
- [4] www.wissens-center.de
- [5] www.diebrennstoffzelle.de/alternativen/wind/entstehung.shtml
- [6] www.philippi-trust.de/hendrik/braunschweig/wirbeldoku/wirbelsturm.html
- [7] www.raonline.ch/pages/edu/st/hurricane01a1.html
- [8] www.wetter-klimawandel.de/entstehung-hurrikan.php
- [9] www.aurian.at/flyhigh/info/funktion.htm
- [10] www.kuef.de/fascination/segeln/lebenanbord/segel.html
- [11] www.dg-flugzeugbau.de/theorie-segelflug.html
- [12] Melanie Coldewey- Egbers,
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 82234 Oberpfaffenhofen
- [13] Diplom- Ingenieur Volker Schulze, 03205 Calau

10. Selbstständigkeitserklärung

Erklärung:

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis aufgeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Calau, den 03.01.10

Ort und Datum

Alvine Schube

Unterschrift