

Junge Wissenschaft

Jugend forscht in Natur und Technik

Young Researcher

The European Journal of Science and Technology



Klimawandel und Kohlen- stoffkreislauf

Themen: Windenergie aus dem Garten // Automatisiert in den Himmel // Geprüfte Babymilch // Kohl im Sonnenbad // Berührungslos Musizieren

Außerdem im Heft: Titelthema: Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem // Wissenschaftsjahr: Ozeanversauerung - das andere Kohlendioxidproblem // Fraunhofer Talent Take Off: So gelingt der Einstieg ins Studium // Studien- und Berufsführer // Literaturtipps





DURCHBRUCH.

Mit **start2grow** zur
erfolgreichen Gründung!



Sie haben eine Idee, aber noch keinen Businessplan?
Oder Ihr Businessplan braucht den letzten Schliff?
In jedem Fall sind Sie bei start2grow | 37 richtig!

Unsere Bausteine für Ihre erfolgreiche Gründung:

- Kostenfreie Teilnahme
- Bundesweiter Wettbewerb
- Hohe Geld- und Sachpreise
- Interaktive Events
- Sonderpreis „Technologie“
- Netzwerk mit über 600 Coaches
- Kontakte zu Wirtschaft, Wissenschaft und Kapital

Jetzt informieren und anmelden: www.start2grow.de

Danke

Vielen Dank allen Firmen und Unternehmen, die mit Patenschafts-abonnements in die Zukunft investieren:



Deutsche Hochschulwerbung



Prof. Dr. Wilfried Kuhn,
Villmar/Gießen

Ganz am Anfang

Vor 110 Jahren berechnete der schwedische Physiker Svante Arrhenius erstmals den Treibhauseffekt und nutzte dabei Erkenntnisse zum Wärmetransport in Gasen, die Physiker bereits im 19. Jahrhundert gewonnen hatten. Für Arrhenius enthielt das Ergebnis, dass der Menschen gemachte Anstieg des CO₂ Gehaltes in der Atmosphäre die Temperaturen auf der Erde erhöht, einen positiven Aspekt: Er hoffte auf gleichmäßigere und bessere klimatische Verhältnisse insbesondere in den kälteren Teilen der Erde.

Arrhenius Erkenntnisse blieben viele Jahre unbeachtet. Erst 50 Jahre später begann sich die Wissenschaft wieder für die Atmosphäre zu interessieren. Hauptgrund war die beginnende Raumfahrt. Erste Messprogramme wurden gestartet: Die Messstation auf dem hawaiianischen Vulkan Maua Loa liefert seit 1958 ununterbrochen Daten zum CO₂ Gehalt der Atmosphäre. Und das Ergebnis ist eindeutig: Der CO₂ Gehalt steigt stetig an. Die neuesten Zahlen des Global Carbon Project für 2016 liegen bei $36,4 \pm 2,3 \cdot 10^{13}$ kg CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen und der Industrie. Die gute Nachricht daran ist, dass der Wert nur 0,2 Prozent höher ist als 2015. Aber wie gigantisch dieser Wert ist, zeigt die Tatsache, dass noch 1990 „nur“ etwa $22 \cdot 10^{13}$ kg CO₂ in die Atmosphäre gepustet wurden.

Seit 1972 versuchen Wissenschaftler mit Welt - Umwelt- und Welt-Klimakonferenzen, Politiker und die Weltöffentlichkeit auf die Entwicklungen aufmerksam zu machen. Ein erster Durchbruch gelang 1992 in Rio de Janeiro mit einer Klimarahmenkonvention. 1997 folgte das Kyoto-Protokoll, das Zielwerte für den Ausstoß von Treibhausgasen in den Industrieländern festlegte. 2015 wurde die Pariser Vereinbarung beschlossen mit dem Ziel, die Erderwärmung auf maximal 2 °C zu begrenzen. Nach den Szenarien der Klimaforscher bedeutet dies,

die Treibhausgasemissionen, also nicht nur die Emissionen von CO₂, sondern auch für Methan, Fluorkohlenwasserstoffe und Stickoxide, bis 2060 auf Null zu fahren.

Haben mit diesem Beschluss von 2015 die Klimaforscher ihre Aufgabe erfüllt? Prof. Jochem Marotzke vom Max-Planck-Institut für Meteorologie sagt hier eindeutig nein: Die Klimaforschung hat gezeigt, dass die Menschen gemachte Erwärmung stattfindet. Aber sie hat nicht artikuliert, was diese Erwärmung bedeutet und ob sie mit Überraschungen einhergehen wird. Marotzke hat drei Leitfragen formuliert, mit denen sich die Klimaforschung in den nächsten Jahren beschäftigen muss: Wohin geht der Kohlenstoff? Wie ändert sich das Wetter mit dem Klima? Wie beeinflusst das Klima die Bewohnbarkeit der Erde und ihrer Regionen? Praktisch auf allen Gebieten steht die Klimaforschung erst am Anfang. Wissenschaftler werden in den nächsten Jahren die Erde und ihre Atmosphäre auf eine nie dagewesene Weise vermessen. So ist Deutschland Mitglied der europäischen Forschungsinfrastruktur ICOS (Integrated Carbon Observation System) und trägt mit Messstationen dazu bei, den Austausch der Treibhausgase zwischen Atmosphäre, Ozean und Ökosystem zu messen und zu verstehen.

Doch nicht nur die Wissenschaft ist gefordert, sondern jeder einzeln: So hat Dominik Blaser sein Windrad auch deshalb entwickelt (siehe ab Seite 16), um ein Bewusstsein für Energie zu schaffen. Ich bin sicher, in der Jungen Wissenschaft werden noch viele Artikel aus dem weiten, interdisziplinären Feld der Klimaforschung erscheinen.

Viel Spaß beim Lesen wünscht

*Dr. Sabine Walter,
Mitherausgeberin und Chefredakteurin der
Jungen Wissenschaft*

Impressum

Gründungsherausgeber:
Prof. Dr. rer. nat. Paul Dobrinski †

Herausgeber:
Prof. Dr. Manfred Euler,
Dr. Dr. Jens Simon,
Dr.-Ing. Sabine Walter

Verlag:
Verlag Junge Wissenschaft
Athanasios Roussidis
Neuer Zollhof 3
40221 Düsseldorf

Chefredaktion:
Dr.-Ing. Sabine Walter
s.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Redaktion:
Areti Karathanasi, Alina Yüksel,
Athanasios Roussidis

Erscheinungsweise:
vierteljährlich

Preis:
30,00 € zzgl. Versand für 4 Ausgaben;
Schüler, Studenten, Referendare, Lehrer
zahlen nur 20,00 € zzgl. Versand;
Einzelpreis: 9,50 € zzgl. Versand

Anzeigen:
Areti Karathanasi
Telefon (02 11) 74 95 64-82
a.karathanasi@verlag-jungewissenschaft.de

Grafik & Layout:
Ideenfilter Werbe-
und Designagentur GmbH
Neuer Zollhof 3, 40221 Düsseldorf
Eleni Aivazidou

Objektleitung
Areti Karathanasi
Telefon (02 11) 74 95 64-82
a.karathanasi@verlag-jungewissenschaft.de

Bilder:
stock.adobe.com

Druck:
Tannhäuser Media GmbH
Büttgenbachstraße 7
40549 Düsseldorf

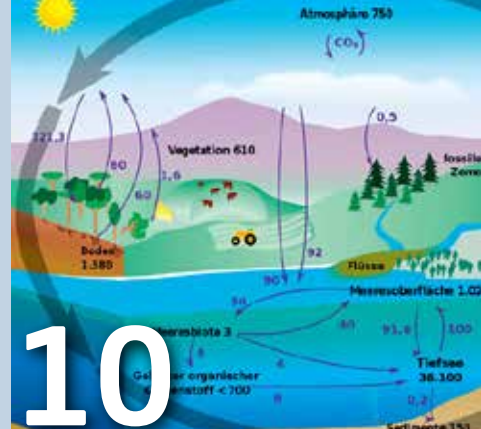
Geschäftsbedingungen:
Es gelten die Allgemeinen Geschäftsbedingungen des Verlags Junge Wissenschaft
Athanasios Roussidis

ISSN 0179-8529

12

Wissenschaftsjahr: Ozeanversauerung - das andere Kohlendioxidproblem

Unsere Meere nehmen einen Teil des Kohlendioxids aus der Atmosphäre auf. Damit mildern sie die globale Erwärmung. Aber zu welchem Preis? Eine Vielzahl mariner Lebewesen ist von der sogenannten Ozeanversauerung bedroht und Artengemeinschaften werden sich verändern - ein Problem, das uns alle angeht.



10

Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem

Als Kohlenstoffkreislauf bezeichnen Forscher den Weg, den der Kohlenstoff durch das Erdsystem nimmt. Vom Menschen verursachte Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan verändern diesen natürlichen Kreislauf tiefgreifend. Genauer zu verstehen, wie der Kohlenstoffzyklus in all seiner Komplexität funktioniert, ist deshalb heute dringlicher denn je.

Editorial	3
Inhalt	4 - 5
Neues	6 - 9
Intensivierte Landwirtschaft führt überall zu den gleichen Arten	6
Radiokarbonmethode kann trotz hoher CO ₂ Emissionen weiter genutzt werden	6
Studie zeigt Auswirkungen der Antarktis auf den Klimawandel	7
PTB ebnet den Weg für die Neudefinition des Ampere	8
Neue Materialien für preiswerten Sonnenstrom	9

Magazin I 10 - 13

Titelthema: Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem	10
Wissenschaftsjahr: Ozeanversauerung - das andere Kohlendioxidproblem	12

Magazin II 62 - 70

Fraunhofer Talent Take Off - Vernetzen 2016: So gelingt der Einstieg ins Studium	62 - 63
Studien- und Berufsführer	64 - 66
Literaturtipps	69 - 70

Jugend forscht 14 - 61

Windenergie aus dem Garten Detailkonstruktion einer Windturbine für den städtischen Garten	14
Automatisiert in den Himmel Entwicklung und Bau einer automatisierten Startrampe für eine Wasserrakete	26
Geprüfte Babymilch Entwicklung eines Testverfahrens für Haushalte zum Nachweis von Melamin in Milchpulver	36
Kohl im Sonnenbad Auswirkung eines veränderten Lichtspektrums auf die Bildung von Carotinoiden, Flavonoiden und Glucosinolaten	44
Berührungslos Musizieren Entwicklung eines berührungsfreispielbaren Instruments mit automatischer Begleitung	54

Windenergie aus dem Garten

Für eine Kleinwindanlage in einem Reihenhausegarten wurden die Rotoren so optimiert, dass die Lärmmission möglichst gering ist. Zudem wurde für die unsteten Windverhältnisse eine geeignete Sturmsicherung gebaut.

Autor: Dominik Blaser



Automatisiert in den Himmel

Füllt man eine PET Flasche mit Wasser und baut mit einer Fahrradpumpe Druck auf, wird die Flasche zur Wasserrakete. Dieser Befüllvorgang wurde automatisiert und so aus einem Spielzeug eine technische Anlage.

Autoren: Alexander Lüthard,
Joram Liebeskind



Geprüfte Babymilch

Der Melamin Skandal in China hat Säuglingen das Leben gekostet. Daher wurde ein Test entwickelt, der es erlaubt, unkompliziert im Haushalt kritische Menge Melamin nachzuweisen.

Autoren: Duo Andreas Qiu,
Kay Rübenstahl,
Michelle Naass



Kohl im Sonnenbad

Pflanzen enthalten für den Menschen notwendige Stoffe. Es wird untersucht, ob in ausgewählten Kohlarten die Konzentration dieser Stoffe durch die Veränderung des Lichtspektrums erhöht werden kann.

Autor: Alexander Rotsch



Berührungslos Musizieren

Das Theremin als Musikinstrument fasziniert wegen seiner berührungsfreien Spielweise. Da jedoch immer nur ein Ton erklingt, wurde eine automatische Akkordbegleitung entwickelt.

Autor: Benedikt Wagner



Junge Wissenschaft - Jugend forscht in Natur und Technik

Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger Autoren bis zum Alter von 23 Jahren mit anspruchsvollen Themen aus allen Bereichen der Naturwissenschaften und Technik.

Gründungsherausgeber:
Prof. Dr. rer. nat. Paul Dobrinski †

Herausgeber:
Prof. Dr. Manfred Euler
Dr. Dr. Jens Simon
Dr.-Ing. Sabine Walter

Beirat:
Dr. J. Georg Bednorz
Nobelpreisträger
IBM Research Division
Forschungslaboratorium Zürich

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c.
Manfred Eigen
Nobelpreisträger,
Max-Planck-Institut für
Biophysikalische Chemie,
Göttingen

Prof. Dr. Gerhard Ertl
Nobelpreisträger
Fritz-Haber-Institut der
Max-Planck-Gesellschaft, Berlin

Prof. Dr. Ernst O. Göbel
ehemaliger Präsident der
Physikalisch-Technischen
Bundesanstalt (1995 - 2011),
Braunschweig und Berlin

Dr. Uwe Groth
VDI Projektleitung
„Jugend entdeckt Technik“,
Hemmingen

Prof. Dr. Elke Hartmann
Universität Halle
VDI Bereichsvorstand
„Technik und Bildung“

Dr. Sven Baszio
Geschäftsführer der Stiftung
Jugend forscht e. V.,
Hamburg

Prof. Dr. Bernd Ralle
Schriftführer der Zeitschrift MNU,
Fachbereich Chemie,
Universität Dortmund

Wolfgang Scheunemann
Geschäftsführer der dokeo GmbH,
Stuttgart

Junge Wissenschaft sucht Paten!

Unterstützen Sie den Nachwuchs!

Engagieren Sie sich für den MINT-Nachwuchs mit einem oder mehreren Patenschaftsabonnements oder einer Patenschaft für eine ganze Schulklasse Ihrer Wahl und sponsern Sie die Junge Wissenschaft für ein Jahr.

Pate werden

Bestimmen Sie selbst die Schulen, die Schulklassen, die Fachbereiche, die Lehrstühle, die Bibliotheken und fördern und unterstützen Sie junge, talentierte und erstklassige MINT-Nachwuchsforscher.

Wissen fördern

Junge Wissenschaft ist europaweit das einzige Magazin für Nachwuchsforscher bis zu einem Alter von 23 Jahren, in dem peer-reviewed Beiträge publiziert werden. Der engagierte Beirat besteht u.a. aus renommierten Forschern und Nobelpreisträgern und zu den Autoren gehören auch die Gewinner des Bundeswettbewerbwerbes Jugend forscht – auf regionaler und nationaler Ebene.

Engagement zeigen

Unterstützen Sie die junge Bildungs-elite aus dem MINT-Bereich durch Ihr Engagement. Unterstreichen Sie Ihr Engagement mit dem Logo Ihrer Firma oder Ihrem Namen auf der Titelseite.

Ich möchte Pate werden und die jungen Forscher unterstützen:

- Ja, mit ___ (Anzahl) Patenschaftsabonnement(s) inkl. Logoaufdruck auf dem Titel zum Preis von 30,00 EUR (inkl. USt., zzgl. Versandkosten) pro Abonnement (vier Ausgaben).
- Ja, ich stelle Ihnen Adressaten per gesonderter Auflistung schriftlich zu diesem Auftrag zur Verfügung (persönliche Adressauswahl mit 15 % Aufschlag pro Abonnement).

.....
Unternehmen/Hochschule

.....
Ansprechpartner/Position

.....
Straße, Hausnummer

.....
PLZ, Ort

.....
Telefon

.....
E-Mail

.....
Ort, Datum

.....
Stempel/Unterschrift

Die Mindestdauer für ein Abonnement beträgt ein Jahr. Sollte das Patenschaftsabonnement nicht acht Wochen vor Ablauf der Mindestdauer schriftlich gekündigt werden, verlängert sich das Abonnement automatisch um ein Jahr. Das Abonnement ist nach Erhalt der Rechnung fällig und sofort zahlbar. Individuell gewünschte Schulsprachen sowie damit zusammenhängende Beratungsleistungen des Verlages Junge Wissenschaft Athanasios Roussidis werden gegen Aufpreis vorgenommen. Gerichtsstand ist Düsseldorf. Es ist ausschließlich deutsches Recht anwendbar.

Bitte senden Sie den Abschnitt oder schicken eine E-Mail an:

✉ Verlag Junge Wissenschaft Athanasios Roussidis,
Neuer Zollhof 3, 40221 Düsseldorf

📞 (02 11) 74 95 64-29

@ pate@verlag-jungewissenschaft.de



Das „Zotino Tall Tower Observatory“ in der sibirischen Taiga mit seinem 304 Meter hohen Stahlurm misst die örtlichen Konzentrationen an Treibhausgasen. (Quelle: Michael Hielscher, Max-Planck-Institut für Biogeochemie)

Titelthema

Der Kohlenstoffkreislauf im Erdsystem

Es gilt, den Kohlenstoffkreislauf so zu steuern, dass die Erde in einem stabilen Klimazustand bleibt.

Als Kohlenstoffkreislauf bezeichnen Forscher den Weg, den der Kohlenstoff durch das Erdsystem nimmt. Dabei durchläuft er diverse Stationen zu Land, zu Wasser, in der Luft und in der Biosphäre. Einige Komponenten des Erdsystems, wie das Land oder der Ozean, fungieren als Kohlenstoffspeicher, welche das Element eine gewisse Zeit speichern und dann wieder in die Atmosphäre abgeben. Vom Menschen verursachte Emissionen von Treibhausgasen wie Kohlendioxid und Methan verändern diesen natürlichen Kreislauf tiefgreifend (siehe Abb. 1). Genauer zu verstehen, wie der Kohlenstoffzyklus in all seiner Komplexität funktioniert, ist deshalb heute dringlicher denn je.

Wichtige grüne Lungen

Seit dem Beginn der industriellen Revolution gelangten durch die Aktivitäten des Menschen große Mengen Treibhausgase in die Atmosphäre. Durch das Verbrennen fossiler Treibstoffe sowie die großflächige Abholzung von Wäldern stieg die Konzentration kohlenstoffhaltiger Verbindungen wie Kohlendioxid und Methan in

der Luft so weit an wie nie zuvor in den letzten Jahrtausenden. Jedoch bleiben nur etwa 40 Prozent des Kohlenstoffs, der in Form von Kohlendioxid freigesetzt wird, in der Atmosphäre. Den Rest nehmen die Ozeane und die Landbiosphäre auf.

Atmosphäre, Ozeane, Vegetation und Böden tauschen auf Zeitskalen von Minuten bis zu Tausenden von Jahren über eine Vielzahl physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse riesige Mengen an Kohlenstoff aus. Erwärmt sich das Klima, führen viele dieser Prozesse entweder zu verlangsamer oder zu beschleunigter Anreicherung von Treibhausgasen in der Luft. Damit bewirken sie negative oder positive Rückkopplungen zwischen dem globalen Kohlenstoffkreislauf und dem Klima. So können höhere Temperaturen an Land zum Beispiel die Atmung des Bodens intensivieren, wodurch mehr Kohlendioxid in die Atmosphäre gelangt. Umgekehrt verlängert eine Erwärmung in nördlichen Breiten die Wachstumsperiode und sorgt so dafür, dass Pflanzen vermehrt Kohlendioxid in Sauerstoff umwandeln.

Einige Zonen unseres Planeten beeinflussen den Kohlenstoffkreislauf besonders stark. Ihr Zustand liefert somit Hinweise darauf, wie gut es um das Erdsystem insgesamt bestellt ist. An Land zählen dazu besonders die tropischen Regenwälder Amazoniens, im Kongobecken und in Südostasien sowie die borealen Wälder und die arktische Tundra. Sie entziehen der Atmosphäre nicht nur überaus große Mengen Kohlenstoff. Als grüne Lunge der Erde enthalten diese Regionen auch ein riesiges Reservoir an Kohlenstoff, der in ihrer Vegetation und ihrem Boden gespeichert ist.

In einem beträchtlichen Teil der borealen Wälder und Tundren ist Kohlenstoff zusätzlich in Permafrostböden gebunden. Diese könnten infolge der Klimaerwärmung tauen und große Mengen Kohlendioxid freisetzen – im Fall von Sümpfen und Mooren Methan, das ein noch stärkeres Treibhausgas ist. In den Weltmeeren wiederum liegen zwei Schwerpunktzonen des Kohlenstoffumsatzes: eine im Nordatlantik und eine im Südpolarmeer rund

um die Antarktis. Hier gelangt überschüssiger Kohlenstoff mit absinkenden Wassermassen von oberflächennahen Schichten in die Tiefe, wo er für Hunderte bis Tausende von Jahren eingelagert bleibt. Verändert sich die Ozeanzirkulation in diesen Regionen auf Grund steigender Temperaturen, so könnte das die Speicherkapazität des Meeres für Kohlenstoff verringern. Nach vorläufigen Untersuchungen scheint genau das im Südpolarmeer bereits der Fall zu sein. Das birgt die Gefahr, dass bisherige Kohlenstoffsinken verschwinden oder sich sogar in Quellen weiterer Kohlenstoffemission verwandeln könnten.

Die Hauptaufgabe der Forschung liegt auf der Hand: Zunächst gilt es, den Kohlenstoffkreislauf als integralen Bestandteil des globalen Klimasystems besser zu verstehen. Dazu bedarf es weiterer Untersuchungen der beteiligten Umwandlungsprozesse in den Ökosystemen an Land und im Meer. Außerdem müssen wir ergründen, auf welche Weise der Kohlenstoffzyklus mit der Verbreitung von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor sowie mit dem Wasserkreislauf verzahnt ist.

Vom Wetter zum Klima

Dabei gilt es auch die vielfältigen Rückkopplungen zwischen Klimasystem und Kohlenstoffzyklus zu berücksichtigen, die sich in unterschiedlichen Zeiträumen vollziehen – von einige Tage währenden Wetterphänomenen über Zehntausende von Jahren dauernde Klimaperioden bis zu geologischen Epochen, die sich über Jahrtausende hinziehen. Um allein diese Vielzahl der zeitlichen Betrachtungsebenen berücksichtigen zu können, ist die Verbesserung unserer Analyseinstrumente und Simulationsverfahren unverzichtbar. Für die internationale Forschergemein-

- Kohlenstoff ist der grundlegende Baustein des Lebens und durchläuft einen globalen Kreislauf.
- Der Mensch verändert den Kohlenstoffkreislauf tief greifend, wenn er etwa fossile Treibstoffe verbrennt und Wälder rodet. Das hat gravierende Folgen für die Bewohnbarkeit unseres Planeten.
- Die dabei ablaufenden Prozesse und Wechselwirkungen zu verstehen, ist entscheidend dafür, den Klimawandel in akzeptablen Grenzen zu halten.

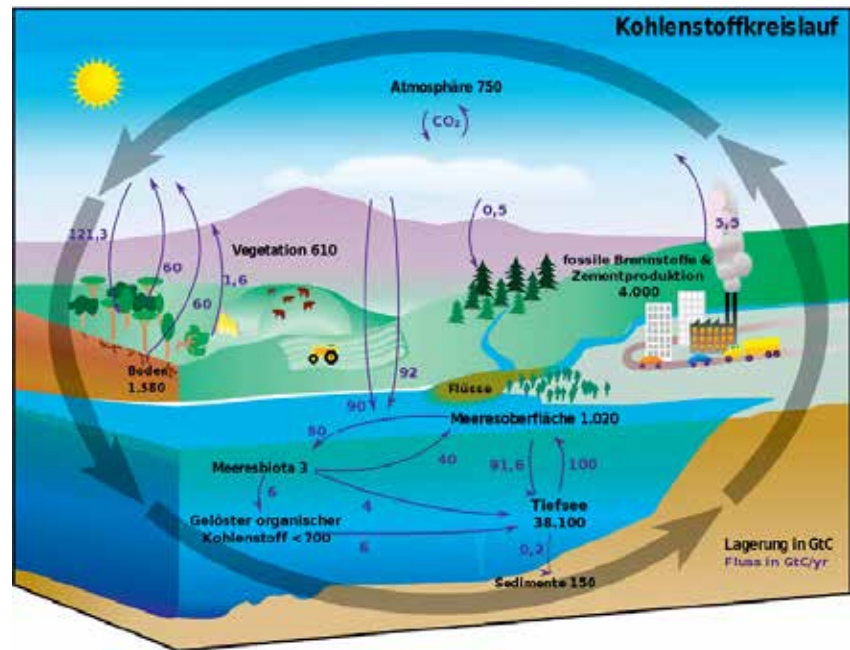


Abb. 1: Der irdische Kohlenstoffkreislauf (Quelle: Wikipedia).

schaft bedeutet das, die existierenden Erdsystemmodelle immer weiter zu verfeinern. Beobachtungen in der realen Welt – besonders an Schwerpunkten des Kohlenstoffumsatzes – liefern die nötigen empirischen Grundlagen für diese Modelle. Beispielsweise misst das »Zotino Tall Tower Observatory« in der sibirischen Taiga mit seinem 304 Meter hohen Stahlurm die örtlichen Konzentrationen an Treibhausgasen, reaktiven chemischen Verbindungen und Aerosolpartikeln sowie eine Fülle von meteorologischen Parametern.

Eine ähnliche Messstation (»ATTO-Turm«) mit einer Höhe von 325 Metern wurde im Amazonasbecken errichtet und 2015 eröffnet. Ergänzend werden in regelmäßigen Abständen Messkampagnen mit Flugzeugen durchgeführt und Fernerkundungssysteme auf Satelliten installiert. Technologische Fortschritte wie die Nutzung von Biomasse aus der Landwirtschaft bieten gleich mehrere Vorteile: Biomasse könnte als kohlenstoffarmer Treibstoff oder auch als Kohlenstoffspeicher dienen. Denn als Rohstoff für langlebige Produkte aus Carbonmaterialien kann Biomasse dazu beitragen, der Atmosphäre – zumindest während der Lebensdauer des jeweiligen Produkts – Kohlendioxid zu entziehen, und wäre dadurch auch auf dem internationalen Markt für Emissionszertifikate handelbar. Eine naturwissenschaftliche Betrachtung des globalen Kohlenstoffkreislaufs allein genügt freilich nicht. Die Störung dieses Zyklus hängt

Um bestimmen zu können, welche anthropogenen CO₂-Emissionen mit dem Ziel der Begrenzung der Erderwärmung um zwei Grad Celsius kompatibel sind, müssen wir Veränderungen im Kohlenstoffzyklus in unsere Klimasimulationen aufnehmen. Das Max-Planck-Institut für Meteorologie zeigte, dass zum Ende des 21. Jahrhunderts die Rückkopplung zwischen Kohlenstoffzyklus und Erderwärmung die »zulässigen« jährlichen CO₂-Emissionen um die Hälfte reduziert.

(Roekner, E. et al., *Clim. Change*, DOI 10.1007/s10584-010-9886-6, 2010).

eng mit der globalen wirtschaftlichen Entwicklung, dem Energiebedarf und der Nutzung von Nahrungsquellen zusammen. Um den Klimawandel in möglichst verträgliche Bahnen zu lenken, müssen wir deshalb auch eine Vielfalt sozioökonomischer Faktoren einbeziehen. Sie in rationaler, wissenschaftlich fundierter Weise zu berücksichtigen, ist eine große Herausforderung. Doch sie muss gemeistert werden, wenn das Erdsystem auch in den nächsten 100 Jahren und darüber hinaus stabil bleiben soll – im Interesse der nachfolgenden Generationen.

*Forschungsperspektiven der
Max-Planck-Gesellschaft*



Dominik Blaser, *1997

Schule:
Gymnasium Neufeld, Bern

Eingang der Arbeit:
Oktober 2015

Zur Veröffentlichung angenommen:
Februar 2016

Windenergie aus dem Garten

Detailkonstruktion einer Windturbine für den städtischen Garten

Es wurde eine Windturbine entwickelt, die für einen urbanen Standort mit schwachen und turbulenten Windverhältnissen optimiert ist. Die Anlage ist mit einer mechanischen Sturmsicherung ausgestattet. Für die Rotoren wurden in einem bionischen Ansatz, die Buckel (Tuberkel) der Brustflossen der Buckelwale übernommen, sodass ein nahezu geräuschloser Betrieb der Anlage möglich ist.

1 Einleitung

Wir leben heute in einer Gesellschaft, die sehr stark von Energie abhängig ist. Unser pro Kopf Energiekonsum ist mit 30.000 kWh/Jahr (Schweiz) enorm [1]. Jedoch ist vielen Leuten aus eigener Erfahrung nicht bewusst, wie viel Aufwand betrieben werden muss, um unseren immensen Verbrauch decken zu können. Energie ist für uns eine Selbstverständlichkeit geworden, sie hat unseren Lebensstandard angehoben und wir denken im Alltag fast nur noch daran, wenn einmal die benötigte Energie nicht zur Verfügung steht.

Aus diesen Feststellungen und aus Beobachtungen an großen Windturbinen ist die Motivation entstanden, ein Windturbinenprojekt von Grund auf selbst zu realisieren. Damit soll möglichst vielen Menschen veranschaulicht werden, wie aufwendig die Gewinnung der Energie in eine für uns nutzbare Form ist und welche Schäden dadurch

verursacht werden können. Nach Möglichkeit soll versucht werden, mit einer eigenen Projekt-Website die gemachten Erfahrungen breit zu kommunizieren und damit einen praxisnahen Beitrag zur Energiediskussion zu leisten. Im Einzelnen wurden folgende technische Anforderungen definiert:

- Die Windturbine soll im eigenen Garten errichtet werden, sodass die gewonnene Energie einen Teil des eigenen Stromverbrauchs zu decken vermag. Somit wird die Turbine im Blick der Nachbarn sein und soll diese täglich an die Aufwendigkeit der Energieproduktion erinnern. Weiter können mit diesem Standort das Windrad immer beobachtet und Schlussfolgerungen für allfällige Weiterentwicklungen gezogen werden.
- Sie soll bei den Nachbarn auf eine gute Akzeptanz stoßen und muss daher geräuscharm sein.
- Sie soll optimiert werden auf die im

Quartier vorherrschenden schwachen und turbulenten Windverhältnisse.

- Es soll auf einen geringen und bewussten Materialeinsatz geachtet werden. Weiter sollen eine hohe Lebensdauer von mindestens 20 Jahren und ein geringer Wartungsaufwand angestrebt werden.
- Im Konstruktionsprozess sollen eigene, möglichst innovative Detaillösungen bevorzugt werden.

2 Methodik

Zu Beginn wurden systematisch Ideen gesammelt und diese mittels Modellen auf ihre Eignung geprüft. Brauchbare Lösungen wurden weiterentwickelt und daraus mithilfe eines CAD-Programms insgesamt 19 Baupläne erstellt. Für das geschweißte Windturbinen-Grundgerüst wurde mit Blick auf die Langlebigkeit Edelstahl gewählt.

2.1 Standort

Nach einigen Abklärungen unter ande-

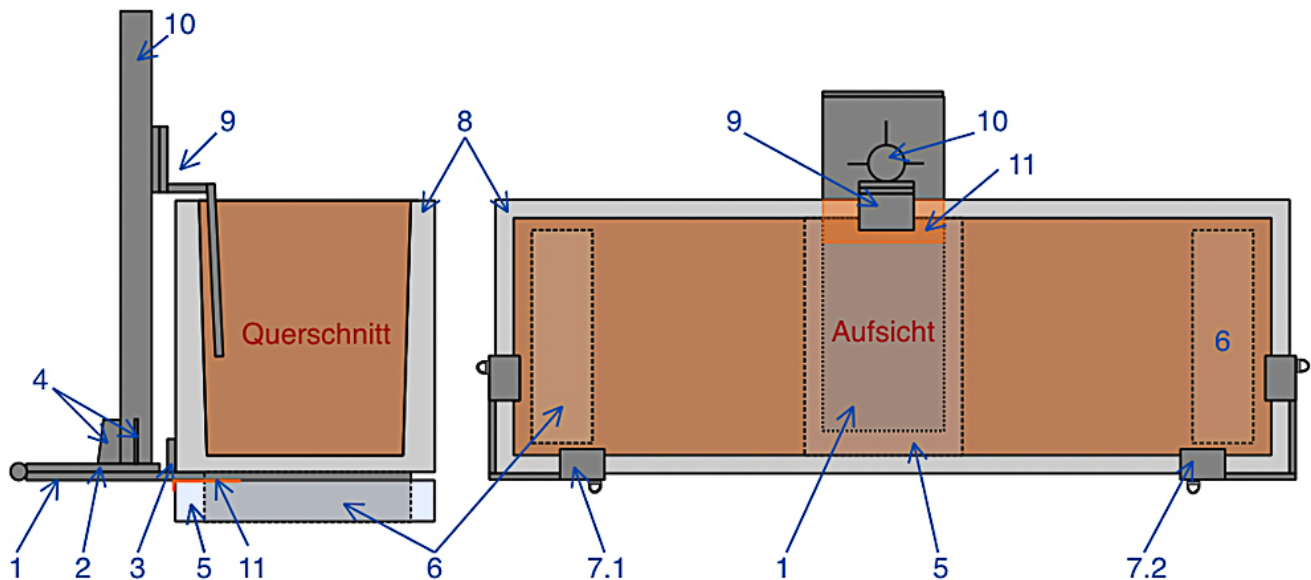


Abb. 1: Schematische Darstellung der Mastbefestigung am Pflanzentrog mit den Winkeln als Vorrichtung für die Abspannseile. Bezeichnungen: 1 untere Grundplatte; 2 obere Grundplatte (am Mast angeschweißt); 3 Anschläge; 4 Seitenstützen - Mast; 5 Betonplatte; 6 Betonklötze; 7.1 und 7.2 Eckwinkel für Abspannseile (links und rechts); 8 Trogwand; 9 Trog-Mast-Winkel; 10 Mast; 11 Aluminiumwinkel (hier orange).

rem mit den Eltern und den Nachbarn erwies sich der eigene Garten als möglicher Standort für die Kleinwindanlage. Da das zur Verfügung stehende Zeitfenster keine ausführlichen Messungen über eine Zeitspanne von einem Jahr bot, musste die Entstehung des Windes in der Umgebung genauer untersucht werden. So konnten die in den vergangenen Jahren beobachteten Regelmäßigkeiten physikalisch erklärt und somit das Windvorkommen genauer abgeschätzt werden.

2.1.1 Mastbefestigung

Aus Kosten- und baurechtlichen Gründen wurde auf eine Verankerung mit einem Betonsockel verzichtet. Mittels einer speziell für dieses Projekt konstruierten Befestigungsvorrichtung an einem Pflanzentrog aus Beton wird die Standsicherheit gewährleistet.

Da bereits vor einigen Jahren die Idee bestanden hatte, ein Windrad (bloß als Dekoration ohne Stromproduktion) zu kaufen und schon zu diesem Zeitpunkt die Funktionalität des Trogs als Sockel geprüft worden war, erwies sich auch für dieses Projekt der Trog als optimale Mastbefestigung. Um Frostschäden im Winter zu verhindern, wurde die Befestigung des Turbinenmastes so geplant, dass möglichst keine Bohrungen in den Beton vorgenommen werden mussten.

Der Mast ist daher über Klemmverbindungen mit dem Trog verbunden. Der

Befestigungsmechanismus ist in Abb. 1 veranschaulicht. Das Gewicht der Turbine steht auf der Grundplatte, die unter dem Trog eingeklemmt wurde. Wie zu entnehmen ist, steht der Trog auf zwei Betonklötzen. In den Hohlraum in der Mitte unterhalb des Troges wurde eine 44 mm dicke Betonplatte eingesetzt. So konnte mithilfe eines kleinen Aluwinkels die Grundplatte eingeklemmt und fixiert werden.

Eine zusätzliche Befestigung der Turbine ist die Verbindung mit einem Winkel zwischen Mast und Trog. Der Winkel wird mit dem Mast über Schraubverbindungen verbunden, sodass dies erst nach dem Aufrichten der Turbine vorgenommen werden konnte. Dieser Winkel gibt dem Mast eine erhöhte Stabilität, dient als Anschlag für die lotrechte Ausrichtung und war bei der Montage die erste Sicherungsmöglichkeit des Mastes, bis die obere und untere Grundplatte verschraubt waren.

Damit die Windturbine auch bei starken Winden ruhig steht, wird der Mast zusätzlich durch sechs Abspannseile stabilisiert.

2.1.2 Windverhältnisse

Der Standort befindet sich zwischen zwei Häuserreihen, welche so ausgerichtet sind, dass die in der Schweiz am häufigsten vorkommenden Ost- und Westwinde mit einer Abweichung von wenigen Grad gut zwischen den Reihen

wehen können. Die Windverhältnisse sind mit einem Jahresdurchschnittswert von ca. $< 2,5$ m/s jedoch nicht hervorragend [2].

An einem Standort mit diesen Windverhältnissen würde keine Windturbine gebaut werden, welche wirtschaftlich betrieben werden soll. Jedoch sind die Angaben aus Windkarten nicht standorts-, sondern nur gebietsbezogen. Die Geschwindigkeiten werden in einer Höhe von 50 m über Boden angegeben und sind größtenteils Angaben aus Modellrechnungen. Somit haben diese Durchschnittswerte eine geringe Aussagekraft für Kleinwindanlagen. Denn ein Durchschnitt kann z. B. aus einer konstanten Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s oder aus kompletten Flauteperioden und höheren (nutzbaren) Windgeschwindigkeiten zustande kommen. Daher wird die Anlage als Inselbetrieb konstruiert. So können anders als bei netzgekoppelten Anlagen Flauteperioden mit einem Zwischenspeicher überbrückt werden [3].

Um das nutzbare Windvorkommen für eine Inselanlage abzuschätzen, wurde festgelegt, welche Windgeschwindigkeit als relativ starker Wind eingestuft werden soll. Diese Geschwindigkeit (8 m/s) wird aus Erfahrung (außer bei Sturm) selten überschritten.

Messungen im Frühling (April und Mai 2014) und die Analysen alter Wetter-

daten im Internet haben gezeigt, dass durchschnittlich mit mindestens neun windreichen Tagen pro Monat gerechnet werden kann. An diesen Tagen weht der Wind nicht den ganzen Tag. Meistens weht er nur am Nachmittag oder z. B. bei einem Gewitter (im Sommer). Daher wird mit 36 Stunden pro Monat, also mit ca. vier nutzbaren Windstunden an diesen Tagen gerechnet. Es wird damit gerechnet, dass der Ertrag im Sommer geringer ausfallen kann. Aus diesem Grund wurden die Komponenten des Elektrokastens so ausgelegt, dass später auch noch ein Solarpanel als Überbrückung hinzugeschaltet werden könnte, falls sich die Erwartung bewahrheiten sollte oder mehr Verbraucher mit dem eigenen Strom versorgt werden möchten.

Da keine genaueren Winddaten zur Verfügung standen, konnte keine präzisere Windhäufigkeitsverteilung für das Abschätzen des Jahresenergieertrags erstellt werden, dennoch wird im folgenden Kapitel beschrieben, wie die Anlage für die vorherrschenden Windverhältnisse dimensioniert wurde und mit den Leistungsangaben des Generators eine Annahme für den Jahresenergieertrag als Referenzwert getroffen wurde.

2.2 Dimensionierung

Die Anlagenspannung wurde auf 12 V gesetzt, da viele Akkumulatoren für diese Spannung ausgelegt sind und eine große Menge an Zubehör im Autofachhandel erhältlich ist. Mit einem mobilen Spannungswandler kann z. B. das Netzgerät eines Ladegeräts für Fotoapparatakkus mit einer benötigten Wechselspannung von 230 V versorgt werden.

Damit für eine Kleinwindanlage nicht unnötig viele Ressourcen aufgewendet werden müssen, ist es ideal, einen gebrauchten Zwischenspeicher zu verwenden. Ein in einem guten Zustand ausgewechselter Lastwagenakkumulator mit 140 Ah Kapazität dient nun als Zwischenspeicher dieser Anlage ($12\text{ V} \times 140\text{ Ah} = 1.680\text{ Wh}$). Da der Akkumulator das erste vorhandene Element war, sind die folgenden Überlegungen und Berechnungen nicht für die Auswahl einer passenden Autobatterie durchgeführt worden, sondern für die Wahl des Generators. Anhand

Verbraucher	Stromabnahme in A	Ladezeit in h	Anzahl Ladungen	Kapazitätsverbrauch in Ah
Fotoapparat	0,7	2	1	1,4
Smartphone	0,4	2	7	5,6
Tablet	0,6	8	4	19,2
Total				26,2

Tab. 1: Vorgesehener Wochenverbrauch; die Angaben beruhen auf eigenen Messungen.

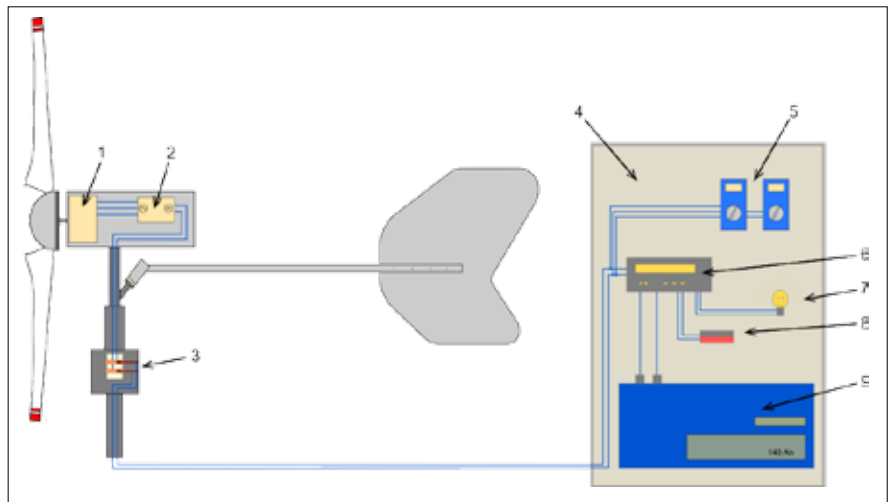


Abb. 2: Übersichtsplan der Schaltungen in den jeweiligen Elementen der Anlagen. Bezeichnungen: 1 Generator; 2 Brückengleichrichter; 3 Gleitstromübertragung; 4 Elektroschrank; 5 Messgeräte: Amper- und Voltmeter; 6 Laderegler; 7 Verbraucher; 8 Heizwiderstand; 9 Akkumulator.

des vorgesehenen Verbrauchs wird der Ladestrombedarf errechnet. Der angestrebte Verbrauch pro Woche beläuft sich rechnerisch auf 26,2 Ah. Wie dieser Wert zustande kommt, ist aus Tab. 1 ersichtlich.

Zum Nachladen kommen noch ca. 4 % der Batteriekapazität als Selbstentladung hinzu. Mit der erhaltenen Selbstentladung von 5,6 Ah ergibt dies für diese Anlage eine Kapazität von 31,8 Ah. Da auch beim Laden Verluste auftreten, muss mit 20 % an Ladeverlust gerechnet werden.

Dies ergibt mit dem errechneten Ladeverlust von 6,4 Ah einen totalen Nachladebedarf von 38,2 Ah. Somit könnte bei einem konstanten Verbrauch von ca. 40 Ah eine Durststrecke des Windes von bis zu drei Wochen überbrückt werden. Es muss aber unbedingt beachtet werden, dass nicht alle Akkumulatoren, insbesondere Bleiakkus, nicht vollständig entladen werden dürfen. Mit diesen Angaben kann nun der benötigte durchschnittliche Lade-

strom berechnet werden. Die benötigte Kapazität pro Monat wird durch die vorhandenen Windstunden dividiert. Dies ergibt einen Ladestrom von ca. 2,6 A. Im Durchschnitt muss bei genügend hoher Spannung dieser Ladestrom vom Generator aufgebracht werden, sodass der Akkumulator bei 36 Stunden Wind vollständig geladen werden kann [4].

Der Generator liefert 3-Phasen-Wechselstrom bei einer Spannung von bis zu 28 V. Diese Spannung kann erst bei Drehzahlen über 400 U/min erreicht werden. Höhere Drehzahlen können aufgrund der Sturmsicherung nicht erreicht werden. Um die Ladespannung des Akkumulators zu erreichen, genügen laut Hersteller Umdrehungszahlen zwischen ca. 210 und 280 Umdrehungen pro Minute.

Somit kann der Akkumulator je nach Ladezustand mit einer Spannung zwischen ca. 11,9 V und 14,2 V geladen werden [5]. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass zwischen dem Generator und der Batterie durch das

8 m lange Kabel zusätzliche Verluste hinzukommen. Um diese Verlustleistung möglichst gering zu halten, wird ein Kupferkabelquerschnitt von 4 mm^2 verwendet [6]. Es wurde ein Generator mit einer Maximalspannung von 28 V gewählt, weil dadurch der Generator schneller die benötigte Ladespannung erreicht als ein 12 V Generator. Aufgrund der Wicklungen führt die höhere Maximalspannung zu einem niedrigeren Stromfluss. Jedoch ist es bei den vorherrschenden Windverhältnissen sinnvoller mit einem kleineren Ladestrom, dafür aber häufiger zu laden. Ein weiterer Vorteil dieser Generatorauslegung ist der geringere Widerstand bei kleineren Strömen [7]. Der 3-Phasen-Wechselstrom wird über einen Brückengleichrichter (vgl. Abb. 2) in den von Akkumulatoren benötigten Gleichstrom umgewandelt.

Wenn die abgeschätzte Windhäufigkeitsverteilung über das Jahr hinweg ziemlich konstant bleibt, also auch im Sommer der Kapazitätsverbrauch nachgeladen werden kann, wird mit den aufgeführten Angaben mit einem Jahresertrag von ca. 15.000 Wh gerechnet. Für die Annahme des Referenzwertes wurde bereits ein verminderter Durchschnittsertrag pro Woche von ca. 290 Wh statt 480 Wh ($40 \text{ Ah} \times 12 \text{ V}$) eingerechnet (geringere Windstunden im Sommer und Winter).

2.3 Geräuscharme Rotoren mit Whale-Power

Da die Kleinwindanlage inmitten eines Wohngebietes errichtet werden sollte, wurde Wert auf eine möglichst geräuscharme Ausführung gelegt. Eine Literaturrecherche führte zu der Idee, die Rotoroberfläche an die Buckel der Brustflosse von Buckelwalen anzulehnen.

Ausgewachsene Buckelwale sind sehr viel größer und schwerer als z. B. Liniensusse. Bei den Tauchgängen und den Richtungswechseln sind die Buckelwale dennoch sehr agil. Die Ursache für ihre Wendigkeit sind die wellenförmigen Ausbuchtungen an der Vorderkante der Brustflosse, die sogenannten Tuberkel (siehe Abb. 3). Schwimmt der Buckelwal, strömt das Wasser über diese Ausbuchtungen und bricht sich in

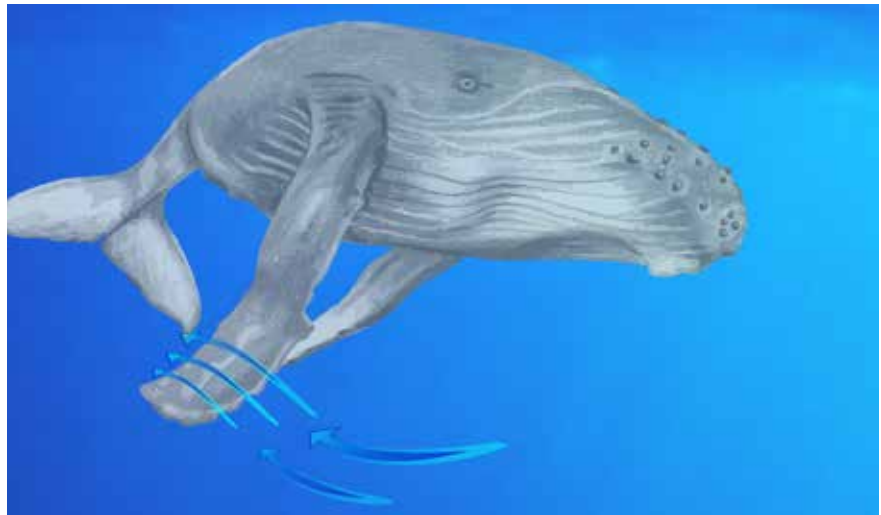


Abb. 3: Die strömungsverändernde Flosse des Buckelwals.

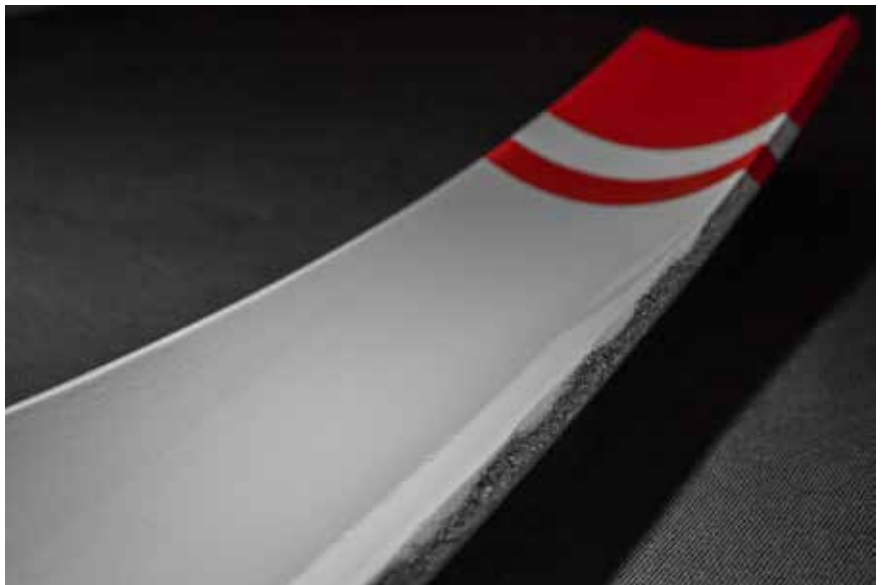


Abb. 4: Raue Kante des Rotors.

unzähligen Wirbeln. Der Wasserstrom wird durch die Tuberkel kanalisiert, es entstehen kleine kontrollierte Turbulenzen und der Auftrieb wird verstärkt. Da turbulente Strömungen weniger zu Strömungsabrissen neigen, kommt es bei einem steilen Anwinkeln der Flosse nicht so rasch zu einem Abriss der Strömung [9] [10].

Untersuchungen an den Brustflossen der Buckelwale haben gezeigt, dass es mit diesen Buckeln erst bei einem fast doppelt so großen Anstellwinkel der Flossen (bzw. Flügel) zum Strömungsabriss kommt als bei Flossen ohne Ausbuchtungen [10]. Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt haben die Buckel mittels kleiner runder Kleber imitiert und auf Helikopterrotoren angebracht, um den gefährlichen Strömungsabriss bei ho-

hen Geschwindigkeiten zu verhindern [11]. Die Buckel der Brustflossen wurden auch schon für Windturbinenflügel nachgebaut und haben gezeigt, dass diese damit leiser und effizienter laufen [12]. Die Buckel verhindern das schnelle Durchströmen von Wasser bzw. der Luft entlang der Kanten. Dadurch wird verhindert, dass das Medium ungebremst entlang der Kanten strömt und es am Ende der Flossen bzw. Flügel zu starken Verwirbelungen und Strömungsabrissen kommt [10].

Die Bauweise der bereits konstruierten Flügel versucht möglichst ein ähnliches (plastisches) Abbild der natürlichen Buckel zu imitieren. Diese Konstruktionsweise ist jedoch mit hohem Aufwand verbunden und die Stabilität kann bei größeren Flügeln noch nicht gewährleistet werden [12]. Berichte von

anderen Kleinwindanlagen haben gezeigt, dass die Rotoren ruhiger laufen, je schmutziger diese sind [13]. Dieses Erkenntnis erschien im Zusammenhang mit dem beschriebenen Prinzip Whale-Power als nachvollziehbar. Da Schmutz jedoch zu einer Änderung des aerodynamischen Profils und aufgrund der daraus folgenden geringeren Auftriebskraft zu einer geringeren Effizienz führt, wurde nach einem Umsetzungsprinzip gesucht, welche die Schmutzbelastung auf ein Minimum reduzieren kann.

Nach diesen Recherchen wurde die Form der Rotoren mit der Software RoWi-Tool berechnet. Das RoWi-Tool ist eine von Windradtüflern entwickelte Exceldatei, die das Errechnen eines Rotorprofils für den eigenen Standort ermöglicht [8]. Anschließend wurden die Rotoren aus PVC-Abwasserrohren von Hand ausgeschnitten. Im Zentrum der Rotoroptimierungen standen akustische Überlegungen: Die Rotoroberfläche wurde bionisch an die Buckel der Brustflosse von Buckelwalen angelehnt, bei denen aufgrund feiner Unebenheiten kaum geräuschproduzierende Strömungsabrisse entstehen. Nachdem verschiedene Bilder von Walfischflossen begutachtet und Merkmale gesammelt wurden, sind bei den Optimierungsarbeiten nur die Kanten der Rotoren rau belassen bzw. zusätzlich kleine Unebenheiten eingearbeitet worden (siehe Abb. 4, Seite 17). Die noch in der Oberfläche der Rotoren vorhandenen Unebenheiten wurden herausgearbeitet, um einen möglichst kleinen Widerstand zu erreichen.

2.4 Sturmsicherung und Leistungsoptimierung

Die Sicherheit und die Leistungsausbeute bei Windenergieanlagen (WEA) sind zwei gegeneinander spielende Aspekte. Die Leistung des Windes steigt mit der dritten Potenz zur Windgeschwindigkeit (vgl. Formel 2, Seite 22). Sobald die Nennleistung des Generators bei einer bestimmten Drehzahl erreicht ist, muss die Generatorleistung bei zunehmenden Windgeschwindigkeiten beschränkt werden. Dies muss so geschehen, dass die Anlage nicht vollständig gebremst werden muss und weiter Spannung generiert werden kann, ohne dass es zu einer Überlastung kommt.

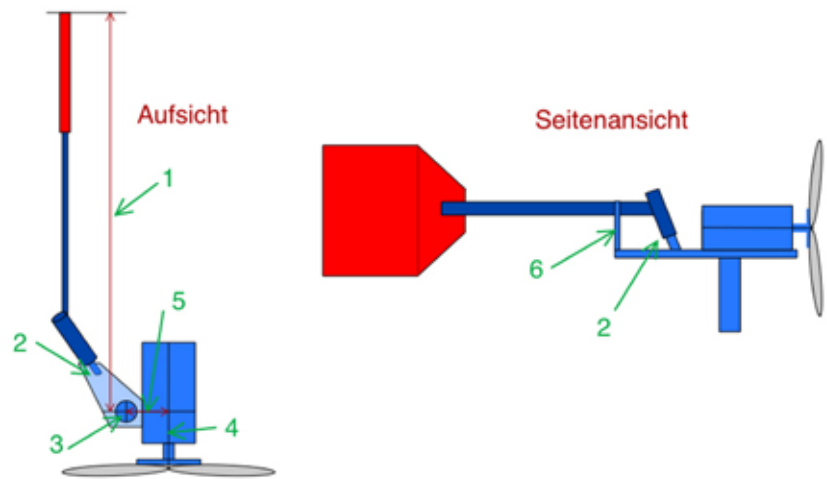


Abb. 5: Aufbau des Furlingsystems: Bezeichnungen: 1 Segelarmlänge; 2 Segeldrehpunkt; 3 Mastachse; 4 Generatorachse; 5 Offset (Abstand zwischen Generator- und Mastachse); 6 Segelanschlag (Segelstopp).

Die am meisten verbreiteten WEA sind horizontal Läufer, deren Rotoren die Auftriebskraft nutzen. Mit einer Veränderung des Anströmungswinkels zwischen 9 und 12 m/s wird die Auftriebskraft und somit die Rotorleistung beschränkt. Dabei handelt es sich um das Pitch-Prinzip. Die Blattwinkelverstellung wird durch das Drehen der Rotoren um die eigene Achse erreicht [15]. Dieses Prinzip ist aufgrund des relativ hohen Konstruktionsaufwands mit gering höherem Ertrag für dieses Kleinwindanlagenprojekt nicht geeignet. Ein weiteres Argument gegen dieses System ist die nötige Steuerungselektronik, welche einen zusätzlichen Leistungsverbraucher darstellt. Zudem könnte eine Störung bei Sturm fatale Folgen haben.

Als Lösung bot sich das mechanische Sturmsicherungsprinzip „Furling“ an (to furl aus dem Englischen „einrollen“). Diese Funktionsweise kommt ursprünglich aus der Segelschifffahrt und wurde für Kleinwindanlagen angepasst. Viele Kleinwindanlagen sind mit einer Furling-Sicherung ausgestattet [16]. Jedoch sind so ziemlich alle in ihrer Funktionsweise verschieden, da sie für die jeweilige Anlage optimiert wurden. Auch bei der hier verbauten Sturmsicherung ist „Furling“ das Grundprinzip, welches jedoch auch angepasst und erweitert wurde.

Mit den durchgeführten Modifikationen konnte nebst der Leistungsbegrenzung bei Sturm zudem eine Anpassung an die turbulenten Windverhältnisse im urbanen Garten erreicht werden [17].

2.4.1 Aufgaben des Furlings

Die Sturmsicherung schützt die Windturbine bei hohen Windgeschwindigkeiten vor Beschädigungen. Eine Beschädigung des Generators durch zu hohe Umdrehungszahlen ist beim verbauten Modell erst bei einer Frequenz, die 600 U/min überschreitet, ein Problem. Damit solche Umdrehungszahlen überhaupt erreicht werden können, müssten Windgeschwindigkeiten von über 100 km/h auftreten. Dies ist am ausgewählten Standort der Windturbine zwar äußerst selten, kann jedoch nicht, wie der Orkan Lothar 1999 gezeigt hat, völlig ausgeschlossen werden [18].

Die Hauptaufgabe des Furlings ist es allerdings, die Anlage vor Vibrationen und Schwingungen zu schützen, welche bei relativ häufigen Windgeschwindigkeiten von über 15 m/s auftreten könnten. Mit dem Sicherungsmechanismus schwenken die Rotoren beim Überschreiten der eingestellten maximalen Windgeschwindigkeit aus dem Wind. Damit wird die Entstehung von Vibrationen verhindert, welche Störgeräusche verursachen oder die Verankerung beschädigen könnten. Der Schutz vor Vibrationen und Schwingungen wird mit dem Furlingmechanismus erreicht, ohne dass die Windturbine ganz gebremst werden muss. So kann trotz Beschädigungs- und Lärmschutz bei zunehmendem Wind weiterhin Spannung generiert werden und somit dient dieses System auch als Leistungssteuerung. Durch das automatische in und aus dem Wind Drehen (bei immer noch genügend starkem Wind) kann eine

konstante Spannung aufrechterhalten und ein gleichmäßiges Laden gewährleistet werden.

2.4.2 Aufbau und Funktionsweise

Das Grundprinzip dieser Windradbremse beruht auf einer beweglichen Konstruktion der Segelarmbefestigung (siehe Abb. 5), welche mit der Gravitations- und Windkraft die Steuerung erlaubt. Mittels unterschiedlicher Winkel der Drehpunktausrichtung, Längen und Gewichte des Segels kann mit einfachen Berechnungen ungefähr eingestellt werden, ab welcher Windgeschwindigkeit sich die Windturbine aus dem Wind drehen soll. Im Folgenden werden der Aufbau und das Funktionsprinzip sowie die Berechnungen dazu erläutert [19]. Abb. 5 zeigt das Grundprinzip der Konstruktion. Diese Abbildung dient zur Veranschaulichung der Kernidee der Furling-Konstruktion und entspricht nicht der umgesetzten, kompakten Form (vgl. Abb. 6). Die Furlingfunktion beruht auf zwei Konstruktionselementen. Beim ersten Element handelt es sich um die Offset-Position des Generators zu der Mastachse. Wie in Abb. 9 (Seite 20) ersichtlich ist, wird mit dem Offset eine Drehbewegung der Rotorebene durch die Windkraft ermöglicht. Der Drehpunkt zwischen Segelarm und Mastbefestigung ist das zweite essenzielle Element der Sturmsicherung. Dieses Gelenk ermöglicht, dass sich bei hohen Windgeschwindigkeiten die Rotoren aus dem Wind drehen können und das Segel in Windrichtung bleibt.

2.4.3 Verhalten im Wind

In Abb. 7 ist das Verhalten eines Windrads mit der Sturmsicherung ersichtlich, welches auch bei dieser Windturbine so auftritt. Jedoch beginnt der Ablauf des Furlings erst ab einer Windgeschwindigkeit von ungefähr 4 - 5 m/s, bei welcher sich das Windrad in den Wind gerichtet hat. Ist bei diesem Wind die Turbine ausgerichtet und nimmt der Wind weiter zu, so läuft der in Abb. 7 ersichtliche Vorgang ab. Es ist zu sehen, wie sich bei Zunahme des Windes die Rotorebene aus dem Wind dreht und das Segel die Windrichtung nahezu beibehält. Am Modell in Abb. 8 ist zusehen, wie sich das Segel dabei verhält. Bei zunehmendem Wind hebt sich das Segel immer mehr (bis zum Anschlag) an.



Abb. 6: Kompakte Umsetzung der Sturmsicherung Furling.

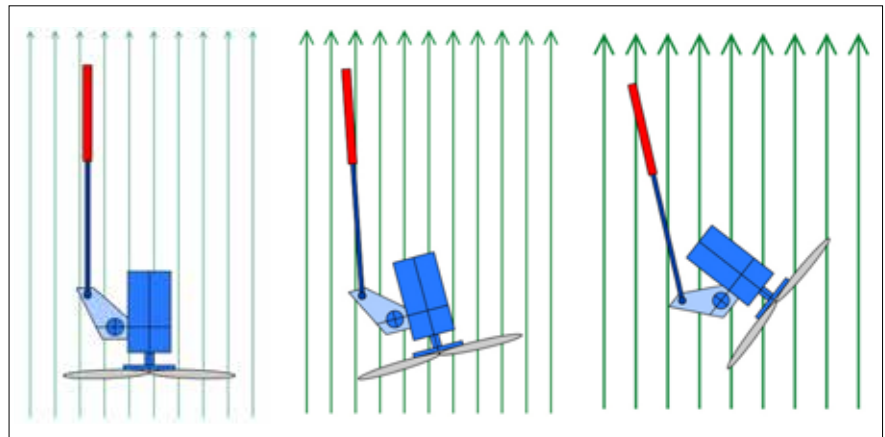


Abb. 7: Aufsicht des Furlingablaufs bei verschiedenen Windstärken (von links nach rechts zunehmender Wind). Die Grundkonstruktion entspricht jener aus Abb. 5.



Abb. 8: Die Segelposition bei niedrigen Windgeschwindigkeiten (links) und bei hohen Geschwindigkeiten (rechts).

2.4.4 Kräfteverteilung

In Abb. 9 (Seite 20) sind die wirkenden Kräfte und Drehmomente eingezeichnet. In (a) ist das Windrad in der Ausgangsposition zu sehen. Diese Situation tritt auf, bis der Wind die eingestellte bzw. so konstruierte Sturmsicherungs-

grenze erreicht. Die Windkraft (Nr. 2) betreibt den Generator. Die Windkraft (Nr. 1), welche auf das Segel drückt, ist groß genug, um die Turbine optimal in den Wind auszurichten, reicht aber nicht aus, um die Gewichtskraft des Segels zu überwinden. Daher wird

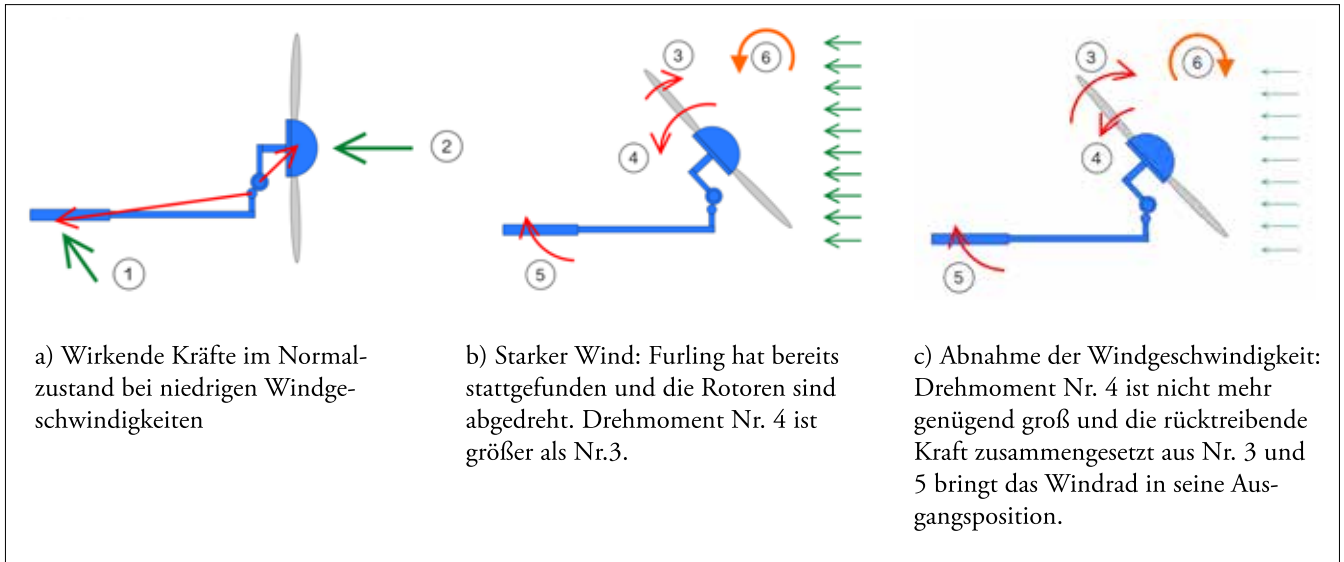


Abb. 9: Furlingaufsicht mit eingezeichneten Windstärken, wirkenden Kräften und effektiven Drehbewegungen.

das Segel nicht angehoben und das Furling findet nicht statt. Wenn nun, wie in Abb. 9b dargestellt, der Wind die Sturmsicherungsgrenze überschreitet, ist die Kraft des Windes (Nr. 5) genügend stark, sodass das Segel angehoben wird. Aufgrund des Offsets kann das Drehmoment (Nr. 4) entstehen. Dieses ist in diesem Moment größer als das rücktreibende Drehmoment (Nr. 3), welches die Turbine zurück in den Wind richten will und die Rotorebene dreht sich aus der Hauptwindrichtung. Das Drehmoment (Nr. 3) kommt wegen der rücktreibenden Kraft (Gravitationskraft) des Segelarms zustande. Diese sorgt bei abnehmendem Wind wieder dafür, dass sich die Windturbine in ihre ursprüngliche Position (a) ausrichtet. In Abb. 9c nimmt nach einem Sturm die Windgeschwindigkeit wieder ab und das rücktreibende Drehmoment (Nr. 3) ist nun wieder größer als Nr. 4. Daraus folgt die Drehrichtung Nr. 6.

2.4.5 Anpassungen an sich oft ändernde Windrichtungen

Die Windverhältnisse im Garten sind sehr oft turbulent und von Windrichtungsschwankungen in einem Maß von 30° Abweichung von der Hauptwindrichtung geprägt. Damit diese Richtungsänderungen abgefangen werden können, wurde das Furling-Prinzip angepasst. Dabei beschränken sich die Änderungen auf zwei Elemente. Die Anschläge, welche den Segelarm führen und dafür sorgen, dass dieser nicht in die Rotoren gerät, wurden nicht direkt mit dem Drehpunkt, sondern etwas seitlich davon angeschweißt. Weiter

wurde ein Winkel des Segelarms anders angepasst, als vom Grundprinzip vorgehen. Die Ideen für diese Änderungen stammen aus eigenen Versuchen mit einem einfachen Strohhalmmodell. Es wurden verschiedene Modelle angefertigt und mit einem Ventilator wurden Versuche durchgeführt. Dabei wurden die turbulenten und sich stark ändernden Windrichtungen nachgeahmt und die Beobachtungen festgehalten.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Windturbine bei einer Befestigung des Segels mit einer gewissen Abweichung zur Rotorachse sich bei schnellen Richtungsänderungen ruhiger verhält. Wie beschrieben ist das Besondere an diesem Aufbau, dass sich das Windrad erst mit Zunahme der Windgeschwindigkeit voll in den Wind dreht. Dies stellt kein Problem bezüglich des Leistungsverlusts dar, denn bei Windgeschwindigkeiten von unter 3 - 4 m/s hat der Wind zu wenig Kraft, um das Anlaufmoment der Rotoren und des Generators zu überwinden. Beobachtungen zeigten, dass sich die Rotorebene zwischen 80° und 100° zur Windrichtung ausrichtet. Der Verlust der Aufnahme- fläche durch die Schrägstellung zum Wind wird von den häufigeren Ladezeiten ausgeglichen.

2.4.6 Berechnungen

Damit die nötigen Größen für die vorherrschenden Windverhältnisse gefunden werden konnten, wurde eine Exceldatei erstellt, mit welcher es möglich war, die benötigten Baugrößen für das Windrad ausfindig zu machen. Dabei

wurden möglichst viele bekannte Größen eingegeben, um die benötigten Werte zu erhalten. Zu Beginn wurden feste Größen wie der Turbinendurchmesser und der Furlingbeginn festgelegt. Anschließend wurden weitere Werte wie Segelgewicht und Winkel so gewählt, dass ein optimales Ergebnis für die Segelarmlänge und das Segelgewicht zustande kommt. Es konnte auf unterschiedliche Weisen ein gleicher Furlingbeginn erzielt werden.

Bei diesen Berechnungen waren das Segelgewicht und dessen Länge maßgebend. Die Segellänge wurde durch standortbezogene Gegebenheiten, das Gewicht durch die Segelform und deren Umsetzung beschränkt. Die Datei wurde daher auch für diese Ausgabegrößen erstellt. Das Furling, wie es hier umgesetzt wird, ist eine Annäherung. Es wird nicht der exakte Wert des Furlingbeginns erreicht. Es müssten weitere Faktoren wie das Gewicht des Segelarmes (nicht nur der "Flosse") miteinbezogen werden. Dies würde allerdings einen größeren Berechnungsaufwand bedingen. Es ist nicht elementar, dass das Furling wie hier in diesem Beispiel genau bei 14 m/s oder bei 14,5 m/s beginnt. Daher reicht eine Annäherung.

3 Messungen

Die Konstruktion einer Windturbine im Wohnquartier ist gelungen. Auch bei hohen Windgeschwindigkeiten (über 15 m/s) sind keine Windturbinengeräusche, die lauter als die Hintergrundgeräusche sind, zu hören. Bei der häufig auftretenden Windgeschwindigkeit von

5 m/s konnte eine mittlere Leistung von 35 Watt und ein Wirkungsgrad von 18 % gemessen werden. Mit der in einer 12 V Lastwagenbatterie gespeicherten Energie können Akkus von Mobiltelefonen über einen USB-Anschluss geladen werden. Ladegeräte von Fotoapparaten werden über einen Wechselrichter mit 230 V versorgt. Beim vorgesehenen Verbrauch ermöglicht die Batteriekapazität von 1.680 Wh das Überbrücken von Flauteperioden von bis zu drei Wochen. Seit dem 16. August 2014 ist das Windrad in Betrieb. Seither wurden immer wieder Messungen durchgeführt und die Werte mit dem Vernier LabQuest aufgezeichnet. Dazu wurden folgende Sensoren von Vernier verwendet: Anemometer, 30-Volt Voltage Probe und High Current Sensor.

3.1 Leistung

Für die Messung der Leistung werden Messdaten von zwei Messtagen genauer angesehen (siehe Abb. 10 und 11). Die erste Messreihe enthält Messdaten aus den Messungen vom 23. September 2014 (Zeitraum zwischen 17 und 18 Uhr). Die Messungen der zweiten Messreihe wurden am 4. Oktober 2014 (Zeitraum zwischen 14 und 15 Uhr) aufgezeichnet. Die Windgeschwindigkeit wurde auf der Höhe der Windradnabe, die Spannung und der Strom im Elektroschrank gemessen. Eine Vergleichsmessung direkt hinter dem Generator (ohne Verlust durch das 8 m lange Stromkabel) war aus technischen Gründen nicht möglich.

Es wurden diese Messresultate dargestellt, da diese zwei Situationen die häufigsten Windverhältnisse veranschaulichen. Die bei der ersten Messreihe aufgetretenen Winde waren ein typisches Erscheinungsbild einer Wetterumstellung. Am 23. September hat die Sonne den ganzen Tag bei starkem Wind geschienen. Am Folgetag regnete es fast die ganze Zeit. Die turbulenten Windgeschwindigkeiten sind im Quartier sehr oft vorhanden und somit spiegeln diese Messungen die Leistung der Windturbine wider. Die besten Ergebnisse konnten erzielt werden, als der Wind stärker und vor allem die Windrichtung konstant waren. Die Messungen der zweiten Messreihe zeigen diese Werte auf.

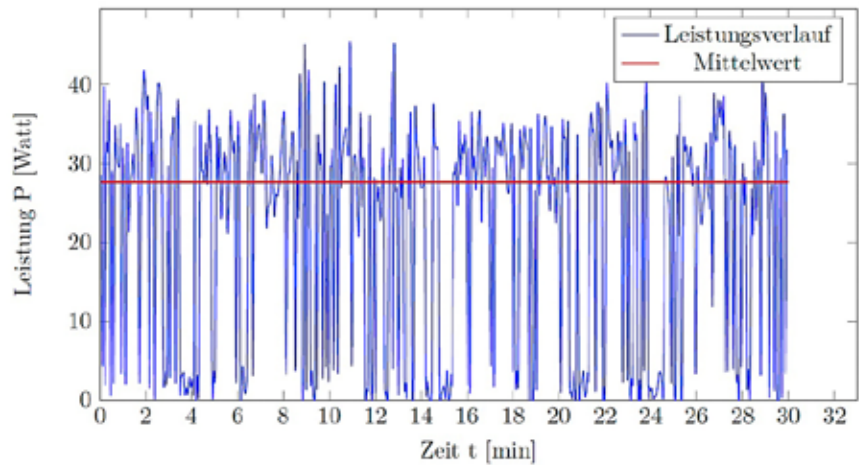


Abb. 10: Gemessene Leistung während der ersten Messreihe. Der Mittelwert beträgt 27 W.

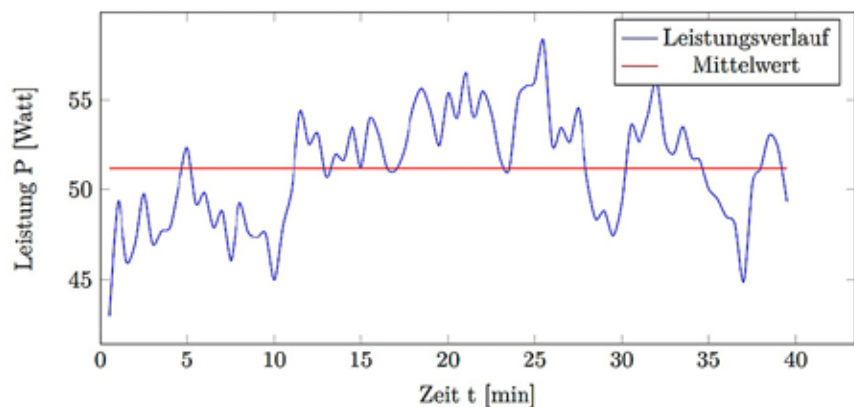


Abb. 11: Gemessene Leistung während der zweiten Messreihe. Der Mittelwert beträgt 51 W.

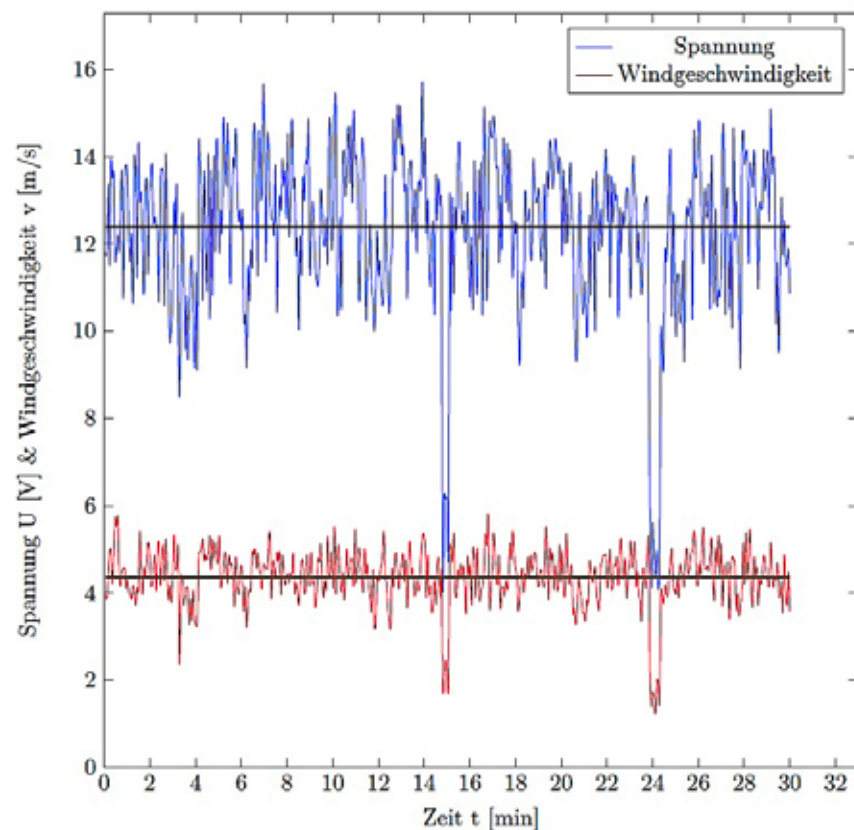


Abb. 12: Typischer Spannungs- und Windgeschwindigkeitsverlauf während der ersten Messreihe. Der Spannungsmittelwert beträgt 12,5 V, der Mittelwert der Windgeschwindigkeit 4,2 m/s.

Für die Berechnungen wurden die folgenden Formeln verwendet [20] [21] [22].

$$P_{Generator} = U \cdot I \quad (1)$$

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \delta \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{P_{Generator}}{P_{Wind}} \quad (3)$$

Die Leistungskurven sind in Abb. 10 und 11 zusehen. Die dazugehörigen Spannungs- und Windgeschwindigkeitsverläufe sind in den Abb. 12 und 13 zusehen.

Es gilt zu beachten, dass sich das für die Windmessung eingesetzte Anemometer nicht selbstständig ausrichtete und somit die auf die Rotorebene auftreffende Windgeschwindigkeit nicht immer exakt der gemessenen Geschwindigkeit entsprach. Messungen bei relativ stabilen Strömungsverhältnissen konnten aber immerhin den gemessenen Wirkungsgrad-Mittelwert bestätigen. Die verbaute Sturmsicherung führt zu einer um ungefähr 3 - 5 % kleineren angeströmten Fläche und somit zu einer geringeren Leistung. Andererseits kann mit dem angepassten Furling-System die Turbine ruhiger im Wind gehalten werden, was zu einer konstanteren Batterie-Ladespannung führt. Im Endeffekt führt diese Anpassung zu längeren Ladezeiten und somit zu einer größeren Energieausbeute.

Wie in Abb. 12 ersichtlich ist, hängt die generierte Spannung von der Windgeschwindigkeit ab. Die größten Schwankungen des Windes sind auch bei der Spannungskurve ersichtlich. Zum Teil ist bei der Windgeschwindigkeitskurve bereits ein Anstieg zu sehen, bei der Spannung jedoch noch nicht. Die Ursache davon ist das aus dem Wind Drehen der Rotoren bei starken Windböen, die nicht vom speziellen Furling-Mechanismus abgefangen werden können.

Der Stromverlauf zeigt das erwartete Bild. Es fließt nur Strom, wenn die Ladespannung der Batterie erreicht wurde. Die Schwankung der Stromstärke hat nach Formel (1) auch eine Schwankung der Leistung der Wind-

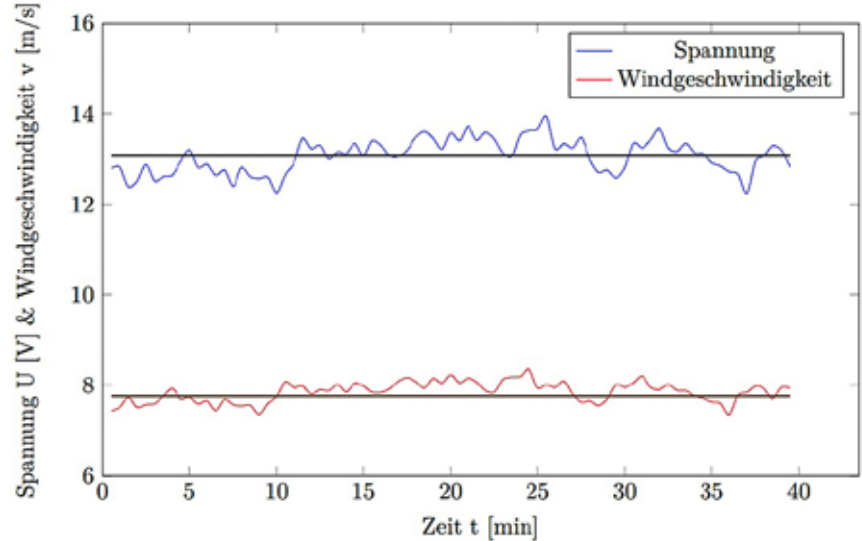


Abb. 13: Typischer Spannungs- und Windgeschwindigkeitsverlauf während der zweiten Messreihe. Der Spannungsmittelwert beträgt 12,5 V, der Mittelwert der Windgeschwindigkeit 4,2 m/s.

turbine zur Folge. Die Messungen der ersten Messreihe haben gezeigt, dass diese Windturbine einen Wirkungsgrad η von 18 % hat. Dieser Wert wurde bei Windgeschwindigkeiten, die für das Windrad optimiert sind und häufig vorkommen, gemessen. Deshalb wird dieses Resultat zur Klassifizierung der Windturbine verwendet. Wie die zweite Messreihe aufzeigt, können diese Werte natürlich abweichen. Diese Messreihe zeigt die Messresultate bei besonders guten Windverhältnissen. Die Windrichtung schwankte fast nicht, sodass die Rotorebene durchgehend ganz im Wind gehalten werden konnte. Wie der zweiten Messreihe entnommen werden kann, hat die Windgeschwindigkeit wie erwartet einen großen Einfluss auf die Leistung. Allerdings konnte mit anderen Messungen auch gezeigt werden, dass eine konstante Windrichtung ebenso einen großen Einfluss hat.

Dies ist so, weil die Schwankungen der Windrichtung zu ungleichmäßigeren Windgeschwindigkeiten an den Rotoren führen. Daraus lässt sich schließen, dass die in der zweiten Messreihe höher ausgefallenen Werte nicht nur von der höheren Windgeschwindigkeit, sondern auch von einer konstanten Windrichtung abhängen. Die Überlegungen aus der ersten Messreihe können auch hier übernommen werden. Wie in Abb. 12 ist auch in Abb. 13 die Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit deutlich zusehen. Allerdings schwankt der Spannungswert nicht so stark und

liegt immer über der aktuellen Ladespannung. Dadurch bleibt auch der Stromfluss erhalten und bricht nicht ab. Wichtig zu bemerken ist, dass auch die zweite Messreihe nicht aufzeigen kann, welcher Wirkungsgrad wirklich möglich wäre. Aufgrund der urbanen Lage und die Furling-Anpassung werden die Rotoren oft schräg angeströmt. Dies hat zur Folge, dass nicht die ganze Rotorebene ausgenutzt werden kann.

3.2 Lärm

Die Messung der Schallemissionen müsste streng genommen nach der IEC-Norm 61400-11 durchgeführt werden [23]. Allerdings sind diese Methoden sehr aufwendig und teuer. Somit war diese Methode für dieses Kleinwindanlagenprojekt ungeeignet. Die Lärmemission stellte für die Nachbarn kein Problem dar: Sie bestätigten, dass von der Drehbewegung nichts zu hören sei.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass Kleinwindanlagen auch in städtischem Gebiet ohne Konflikte betrieben werden können. Die angestrebte Produktion einer Batterieladungsmenge von wöchentlich rund 30 Ah konnte übertroffen werden. Das angepasst umgesetzte „Walfischflossen-Prinzip“ hat sich bewährt und kann somit für Kleinwindanlagen weiterempfohlen werden. Die angenommenen 36 Windstunden pro Monat treten relativ oft auf, was dazu führt, dass die eingebaute Speicherkapazität

pazität zu klein ist. Mit einem größeren Speicher könnte ein größerer Ertrag erzielt und somit der Jahresertrag (16.08.14-15.08.2015) von ca. 11.923 Wh (Aufzeichnung durch Laderegler) gesteigert werden. Der erzielte Ertrag ist jedoch um etwa 3000 Wh niedriger ausgefallen als erwartet. Das zeigt, dass der Referenzwert für dieses Jahr zu hoch angesetzt wurde.

Neben den Phasen, in welchen die Energie nicht gespeichert werden konnte, kommt hinzu, dass der Wind seltener und/oder schwächer geweht hat, sodass der Ladestrom geringer ausfiel. Insbesondere im Sommer 2015 wehte der Wind, anders als in anderen Jahren, sehr selten. Daher kann es durchaus sein, dass der Referenzwert für das folgende Jahr stimmen wird. Diese Ergebnisse zeigen auf, dass der Ertrag sehr stark von den Windverhältnissen abhängig ist und für wirtschaftlich betriebene Windturbinen ein konstantes Windvorkommen essenziell ist.

5.1 Ausblick

Mit einfachen Mitteln wie einem PVC-Rohr und künstlichem „Schmutz“ konnte ein sehr gutes Resultat erzielt werden. In Zukunft wird weiter versucht, das Walflossenprinzip und die Sturmsicherung anhand laufend gemachter Beobachtungen zu optimieren.

Die Anpassung der Sturmsicherung ist ein Kompromiss zwischen möglichst großer angeströmter Fläche und dem Abfangen von Turbulenzen. Messungen in einem Windkanal ergäben die genauesten Werte für den Wirkungsgrad. Bei genaueren Messungen könnte auch untersucht werden, welchen Wirkungsgrad die Rotoren selbst haben. Erst damit könnten fundierte Schlüsse über die Wirkungsgradänderung durch «Whale-Power» gezogen werden. Dazu müssten aber genauere Angaben zum Wirkungsgrad vom Generatorproduzenten zur Verfügung stehen. Da der Transport mit hohem Aufwand und Kosten verbunden ist und die Messergebnisse nicht maßgeblich sind (wie bei Großen (wirtschaftlichen) Turbinen), wurde auf Messungen in einem Windkanal verzichtet. Welchen Einfluss das abgeänderte Furlingprinzip hat, konnte nicht in Zahlen gefasst werden, da kein Vergleichsmodell zur Verfügung stand.

Jedoch kann aus Beobachtungen an einer Windfahne im Nachbargarten, die sich auf derselben Höhe wie die Turbine befindet, geschlossen werden, dass das Furling bis zu einem gewissen Maß die Turbulenzen abfangen kann. Bei schnell ändernden Windrichtungen flackerte die Fahne stark und flachte zum Teil ab, während sich die Rotoren konstant weiterdrehten und die Turbine fast gleich ausgerichtet blieb und nur das Segel schwankte.

Eine Möglichkeit einen höheren Ertrag zu erzielen, wäre ein höherer Mast oder die Montage auf dem Dach. Allerdings wäre dies bewilligungspflichtig. Zudem müsste vorab ausführlich abgeklärt werden, ob sich eine der genannten Anpassung im Vergleich zum Aufwand überhaupt lohnen würde. Seit der Inbetriebnahme wurde der gewonnene Strom verwendet. Wie vorgesehen wurden verschiedene Akkus geladen. Der voraussichtliche Wochenverbrauch von 480 Wh (40 Ah à 12 V) konnte im Frühling und Herbst um ca. 40 % überschritten werden. Je nach Windvorkommen ist der Wert höher ausgefallen, allerdings bei längeren Flauteperioden im Sommer und Winter auch deutlich tiefer.

5.2 Auswirkungen auf das Energiebewusstsein

Wie Preis, Einkommen und technischer Fortschritt hat auch das Energiebewusstsein einen Einfluss auf die Stromnachfrage. Eine Studie, bei der sieben typische Haushalte von Wissenschaftlern des Fraunhofer-Instituts beobachtet wurden, hat gezeigt, dass das Energiebewusstsein bei den Bewohnern zu niedrigerem Stromverbrauch geführt hat. Spezielle Anzeigen auf Fenstern, Computern oder Smartphones zeigten den Bewohnern immer genau auf, welches Gerät wie viel Strom braucht. Dieses Vorhandensein von Informationen führte dazu, dass die Bewohner nach wenigen Monaten den Verbrauch ihrer verschiedensten Geräte benennen konnten. Durch das so erworbene Energiewissen veränderte sich ihr Verhalten und zum Teil auch ihre Gewohnheiten. So spielte beim Kauf eines Gerätes der Energieverbrauch eine größere Rolle als zuvor. Effektiv führte das Umdenken über die sieben Haushalte gesehen zu einer Stromersparnis von

7,8 Prozent [24]. Ähnliche Beobachtungen konnten während des Baus der Windturbine gemacht werden. Das eigene Bewusstsein bezüglich Energie hat sich verstärkt und zeigt, dass praktisches Arbeiten einen großen Einfluss auf das Bewusstsein hat. Das Aufladen von Elektrogeräten geschieht nun viel bewusster. Mit „bewusster“ ist gemeint, dass man bei dem, was man tut, sich mehr Gedanken über die damit verbundenen Auswirkungen macht.

In diesem Fall z. B. über die nötige Infrastruktur, die für das Laden eines Elektronikgeräts benötigt wird und welchen Einfluss „bloß“ ein Verbraucher mehr, wenn alle so denken, haben kann. Der Gang zum Elektrokasten weckt Erinnerungen an die über 600 investierten Arbeitsstunden. Jedes Mal erhält man den Eindruck, welcher Aufwand betrieben werden muss, um bloß eine geringe Menge an Energie für uns Menschen nutzbar machen zu können. Ebenso hat sich in Gesprächen mit den Nachbarn gezeigt, dass sie mit der Kleinwindanlage für Energiefragen sensibilisiert wurden. Jedoch konnte die effektive Energieersparnis nicht aussagekräftig quantifiziert werden. Es kann aber gesagt werden, dass die Einstellung zum Stromverbrauch entscheidend ist, ob z. B. Elektrogeräte andauernd im Stand-by-Modus laufen oder ganz abgeschaltet werden. Schließlich wurde auch eine projekteigene Website (www.domiswindrad.ch) eingerichtet, damit die gesammelten Erfahrungen geteilt werden können.

Allerdings gilt es zu beachten, dass Energiebewusstsein nicht gleich Umweltbewusstsein ist. Wird z. B. mit energieeffizienten Geräten Strom und somit Geld gespart, kann dies zum Reboundeffekt führen. Die Ersparnisse entlasten das „mentale Umweltbelastungskonto“ und zusammen mit den Geldersparnissen kann es z. B. nach einem Kauf eines Fahrzeuges mit Effizienzklasse A dazu führen, dass das beim Treibstoff eingesparte Geld in ein zusätzliches Gerät oder einen Tagesausflug investiert wird und so die Energieersparnisse zu Nichte gemacht werden. Daher ist es umso wichtiger Verbraucher über Zusammenhänge und Möglichkeiten einer effizienten Stromnutzung zu informieren [25].

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Bernhard Christian und Hanspeter Kobel, welche mich bei den Schweiß- und feinmechanischen Arbeiten unterstützt haben und mir so ermöglichten, die Turbine nach meinen Bauplänen umzusetzen. Zudem bedanke ich mich bei meiner Projektbetreuungsperson Dr. Florian

Zäh. Bei Fragen stand er mir immer zur Verfügung und stellte mir die nötigen Messgeräte zur Verfügung. Bei Dr. Jakob Vollenweider möchte ich mich für die sehr hilfreichen Anregungen bei der Erweiterung des theoretischen Teils dieser Arbeit herzlich bedanken. Zudem möchte ich mich bei den folgenden Sponsoren bedanken, ohne die

dieses Projekt nicht möglich gewesen wäre: M&S Software Engineering, Carrosserie Steck AG, BEKB|BCBE, Jumbo-Markt und Jimdo. Darüber hinaus danke ich meinen Eltern, welche mir überhaupt ermöglicht haben, die Windturbine im eigenen Garten zu errichten.

Quellenverzeichnis

- [1] „Nachhaltige Entwicklung - MONETEntkoppelung - Energieverbrauch,“ [Online]. Available: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/themen/21/02/ind9.indicator.73016.906.html>. [Zugriff am 07.10.2015].
- [2] „Die Website für Windenergie-Daten der Schweiz,“ Windenergie-Daten der Schweiz, [Online]. Available: <http://wind-data.ch/windkarte/>. [Zugriff am 27.03.2014].
- [3] H. Siegfried, Nutzung der Windenergie 6. erweiterte und vollständig überarbeitete Auflage, Karlsruhe: Fraunhofer IRB Verlag, 2012.
- [4] B. Hanus, Wie nutze ich Windenergie in Haus und Garten. 2. Auflage, Pöng, Deutschland: Franzis Verlag GmbH, 2001.
- [5] „Link Media Agency,“ [Online]. Available: <http://www.lmagency.biz/contents/de/p56.html>. [Zugriff am 15.03.2014].
- [6] C. Kutzt, „Einfälle statt Abfälle - Solarstrom in 12-Volt-Anlagen,“ Kiel, Hansadruk, 2014, pp. 56-68.
- [7] C. Kutzt, „Einfälle statt Abfälle,“ in Windkraft? Ja Bitte! Heft 2, Kiel, Hansadruk, Hansastrasse 48, Kiel, 2011, pp. 20 - 23, 43 -56.
- [8] „Technik,“ RoWi-Tool, [Online]. Available: <http://www.tito.bplaced.net/rowi-tool/>. [Zugriff am 03.05.2014].
- [9] „Die Flosse des Buckelwals,“ jw.org, [Online]. Available: <http://www.jw.org/de/publikationen/zeitschriften/g201306/buckelwal-flosse/>. [Zugriff am 18.02.2015].
- [10] „Bumpy Whale Fins Set to Spark a Revolution in Aerodynamics,“ gizmag.com, [Online]. Available: <http://www.gizmag.com/bumpy-whale-fins-set-to-spark-a-revolution-in-aerodynamics/>. [Zugriff am 27.04.2014].
- [11] „Whale-inspired Bumps Improve Efficiency of Ocean Turbine Blades,“ gizmag.com, [Online]. Available: <http://www.gizmag.com/humpback-whales-rotor-blades/21332/>. [Zugriff am 27.04.2014].
- [12] „WHALEPOWER,“ WHALEPOWER CORPORATION, [Online]. Available: <http://www.whalepowercorporation.com/>. [Zugriff am 26.04.2014].
- [13] „Kleinwindanlagen machen auch Strom,“ Energieeffizienz Beratung Landwirtschaft, [Online]. Available: http://www.energieeffizienz-landwirtschaft.de/pb/site/pbs-bw/get/documents/MLR.Energieberatung/Unterlagen/03_Wissensbasis/Archiv%20Fachartikel/Erneuerbare%20Energien/Kleinwindanlagen%20machen%20auch%20Strom_bbz_49_2012.pdf. [Zugriff am 15.05.2014].
- [14] „What is Wind Turbine Furling,“ REUK.co.uk - The Renewable Energy Website, [Online]. Available: <http://www.reuk.co.uk/What-is-Wind-Turbine-Furling.htm>. [Zugriff am 28.03.2014].
- [15] „Leistungsbegrenzung und -regelung,“ Bundesverband für Windenergie e.V., [Online]. Available: <https://www.wind-energie.de/info-center/technik/funktionsweise/leistungsbegrenzung-und-regelung#Pitch>. [Zugriff am 10.03.2014].
- [16] „What is Wind Turbine Furling,“ REUK.co.uk - The Renewable Energy Website, [Online]. Available: <http://www.reuk.co.uk/What-is-Wind-Turbine-Furling.htm>. [Zugriff am 03.04.2014].
- [17] „Metal Work part 2,“ Otherpower, [Online]. Available: <http://www.otherpower.com/metalwork2.html>. [Zugriff am 22.04.2014].
- [18] „Orkan Lothar,“ Wikipedia, [Online]. Available: http://de.wikipedia.org/wiki/Orkan_Lothar. [Zugriff am 12.02.2014].
- [19] „Furling,“ TheBackShed.com, [Online]. Available: <http://www.thebackshed.com/windmill/Docs/Furling.asp>. [Zugriff am 03.04.2014].
- [20] „Leistung (Physik),“ Wikipedia, [Online]. Available: [http://de.wikipedia.org/wiki/Leistung_\(Physik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Leistung_(Physik)). [Zugriff am 19.10.2014].
- [21] „Leistung Einer Windkraftanlage Berechnen,“ Windkraft-Tutorial, [Online]. Available: <http://kurztutorial.info/windkraft/windleistung/energie.htm>. [Zugriff am 19.10.2014].
- [22] „Wirkungsgrad,“ Wikipedia, [Online]. Available: <http://de.wikipedia.org/wiki/Wirkungsgrad>. [Zugriff am 19.10.2014].
- [23] „DIN EN 61400-11,“ Schallmessverfahren, [Online]. Available: <https://www.vde-verlag.de/normen/0100180/din-en-61400-11-vde-0127-11-2013->. [Zugriff am 16.02.2015].
- [24] „Cultivating Energy Literacy — Results from a Longitudinal Living Lab Study of a Home Energy Management System,“ Fraunhofer-Institut, [Online]. Available: http://www.fit.fraunhofer.de/content/dam/fit/de/documents/Cultivating_Energy_Literacy.pdf. [Zugriff am 18.02.2015].
- [25] „Zukunft Stromversorgung Schweiz,“ Akademien der Wissenschaften Schweiz, Bern, 2012.

IDEEN- TANKER

Meere und Ozeane haben eine große Bedeutung für das Leben auf der Erde. Forschung geht auf Entdeckungsreise und zeigt Wege, die zum Einklang von Nutzung und Schutz der Meere führen. Deshalb ist jedes Forschungsschiff ein echter Ideentanker.

Kommen Sie mit an Bord!

www.wissenschaftsjahr.de



Eine Initiative des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung

Wissenschaftsjahr 2016 ★ 17

**MEERE
UND OZEANE**