



**Hochschule
Augsburg** University of
Applied Sciences

Fakultät für
Maschinenbau

Projekt im Schwerpunkt

Maschinenbau / Umwelttechnik

Semester 7

Kleinwindkraftwerke

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Marcus Reppich

Dipl.-Ing.(FH) Sebastian Brenner

Teilnehmer:

Hughes Philip

Leovac Danijel

Mayr Georg

Reznicek Daniel

Tetzlaff Bernhard

Yang Qing

Hochschule für
angewandte Wissenschaften –
Fachhochschule Augsburg
University of Applied Sciences

An der Fachhochschule 1
D-86161 Augsburg

Telefon +49 821 55 86-0
Fax +49 821 55 86-3222
www.hs-augsburg.de
info@hs-augsburg.de

Inhaltsverzeichnis:

Inhaltsverzeichnis:.....	2
<u>1 Geschichte der Windkraftnutzung.....</u>	<u>6</u>
<u>1.1 Beginn der Windenergienutzung.....</u>	<u>6</u>
<u>1.2 Beginn der Windenergienutzung in Europa.....</u>	<u>7</u>
<u>1.2.1 Bockwindmühle.....</u>	<u>8</u>
<u>1.2.2 Wippmühle.....</u>	<u>9</u>
<u>1.2.3 Turmwindmühle.....</u>	<u>9</u>
<u>1.2.4 Holländerwindmühle.....</u>	<u>10</u>
<u>1.2.5 Paltrock-Mühle.....</u>	<u>11</u>
<u>1.2.6 Amerikanische Windturbine.....</u>	<u>11</u>
<u>1.3 Stromerzeugung aus Windkraft.....</u>	<u>12</u>
<u>1.3.1 Großwindanlagen.....</u>	<u>13</u>
<u>2 Technische Grundlagen der Windkraftnutzung.....</u>	<u>16</u>
<u>2.1 Physikalische Grundlagen.....</u>	<u>16</u>
<u>2.1.1 Im Wind enthaltene Leistung.....</u>	<u>16</u>
<u>2.1.2 Widerstandsläufer.....</u>	<u>17</u>
<u>2.1.3 Auftriebsläufer.....</u>	<u>19</u>
<u>2.1.4 Verluste.....</u>	<u>22</u>
<u>2.1.4.1 Profilverluste.....</u>	<u>22</u>
<u>2.1.4.2 Tip – Verluste.....</u>	<u>22</u>
<u>2.1.4.3 Drallverluste.....</u>	<u>23</u>
<u>2.2 Technische Grundlagen.....</u>	<u>23</u>
<u>2.2.1 Luvläufer und Leeläufer.....</u>	<u>23</u>
<u>2.2.2 Drehzahlregelung.....</u>	<u>24</u>
<u>3 Anwendungen von Kleinwindkraftanlagen.....</u>	<u>26</u>
<u>3.1 Geeignete Orte für Kleinwindkraftanlagen</u>	<u>26</u>

3.1.1 Global.....	26
3.1.2 Europa.....	27
3.1.3 Deutschland.....	28
3.2 Einsatzgebiete.....	29
3.2.1 Haushalte.....	29
3.2.2 Industrie.....	30
3.2.3 Landwirtschaft.....	30
3.3 Gegenüberstellung Anwendungen in Industrie- und Entwicklungsländern.....	31
3.3.1 Industrieländer.....	31
3.3.2 Entwicklungsländer.....	32
3.4 Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten.....	33
3.4.1 Insellösung.....	33
3.4.2 Vernetzung.....	34
3.4.3 Windpark.....	35
4 Stand der Technik.....	37
4.1 Definition Kleinwindenergieanlagen (Klein-WEA).....	37
4.2 Anwendungsbereiche.....	37
4.2.1 Kombianlage aus Wind/Solar	38
4.2.2 Kombianlage aus Windkraft-Anlage und Heizpatrone.....	38
4.3 Läufer Typen.....	38
4.3.1 Savonius-Rotor.....	39
4.3.2 Darrieus-Rotor.....	39
4.3.3 Luv- und Leeläufer.....	40
4.3.4 Vergleich HAWT und VAWT.....	41
4.3.4.1 Vor- und Nachteile von HAWT.....	41
4.3.4.2 Vor- und Nachteile von VAWT.....	41
4.4 Marktanalyse.....	42
4.5 Energiespeicher im Überblick.....	42
4.5.1 Chemische Energiespeicher.....	42
4.5.1.1 Konventionelle chem. Energiespeicher: fossile Energieträger.....	42

4.5.1.2 Thermochemische Wärmespeicher.....	43
4.5.2 Elektrochemische Energiespeicher.....	43
4.5.2.1 Akkumulatoren.....	43
4.5.2.2 Doppelschichtkondensatoren.....	43
4.5.2.3 reversible Brennstoffzellen.....	43
4.5.3 Elektromagnetische Energiespeicher.....	43
4.5.4 Mechanische Energiespeicher.....	44
4.5.4.1 Pumpspeicherkraftwerke.....	44
4.5.4.2 Mechanische Schwungmassenspeicher.....	44
4.5.4.3 Druckluftspeicher.....	44
4.5.5 Thermische Energiespeicher.....	44
4.5.5.1 Sensible Wärmespeicher.....	44
4.5.5.2 Latentwärmespeicher.....	44
5 Anwendungsbeispiel: hybride Meerwasserentsalzung.....	45
5.1 Meerwasserentsalzungsanlagen.....	45
5.1.1 Meerwasserentsalzung durch mehrstufige Verdunstung.....	46
5.1.2 Technische Daten der Referenzanlage.....	48
5.2 Standortwahl/Gegebenheiten.....	49
5.3 Wahl des Windrads.....	49
5.4 Speicherung der überschüssig erzeugten Energie.....	53
5.4.1 Vergleich der Speicher.....	53
5.4.2 Druckluftspeicher.....	54
5.4.3 Akkumulatoren.....	55
5.4.3.1 Typen.....	55
5.4.3.2 Vergleich.....	56
5.4.3.3 Auswahlkriterien	57
5.4.4 Blei-Säure-Akkumulatoren.....	57
5.4.5 Folgerung.....	59
5.5 Gesamtsystem.....	59
5.6 Kosteneinschätzung.....	60

5.6.1 Entsalzungsanlage: Meerwasserentsalzungsanlage mit mehrstufiger Verdunstung.....	60
5.6.2 Kleinwindenergieanlage: Leichtwindanlage AV-7.....	61
5.6.3 Energiespeicher: Blei-Akku.....	61
5.6.4 Gesamtanlage.....	62
6 Ausblick.....	64
7 Projektmanagement.....	65
7.1 Allgemein.....	65
7.2 Gruppenorganisation.....	65
7.3 Kommunikation.....	65
8 Danksagung.....	66
9 Abbildungsverzeichnis.....	67
10 Quellen.....	69
Anhang:.....	72

1 Geschichte der Windkraftnutzung

Der Gedanke aus Wind Energie zu erzeugen ist kein Kind der Neuzeit, sondern die Wiederentdeckung einer traditionsreichen Technik. Die Nutzbarmachung des Windes, z.B. zum Mahlen von Getreide oder zur Entwässerung von Reisfeldern und Poldern, war in der Vergangenheit von großer Bedeutung. Die Entwicklung von Kraftmaschinen und die Verfügbarkeit billiger Energieträger drängten die Windkraft seit dem Einsetzen der industriellen Revolution immer weiter in den Hintergrund.

Das folgende Kapitel stützt sich auf das Buch Windkraftanlagen von Erich Hau [13].

1.1 Beginn der Windenergienutzung

Die erste, mit zuverlässigen historischen Quellen belegte, Windmühle stammt aus dem Jahr 644 nach Christus. Es wird von einer Windmühle aus dem persisch-afghanischen Grenzgebiet berichtet. Im Gegensatz zu den heute üblichen Windrädern hatte die persische Windmühle eine vertikale Drehachse. Vermutlich wurde diese Mühle zum Mahlen von Getreide verwendet. Ähnliche, außerordentlich primitive Windmühlen sind bis in unsere Tage in Afghanistan erhalten geblieben.



Abbildung 1-1: Windmühle mit vertikaler Drehachse in Afghanistan [16]

Ab ca. 1000 n. Chr. wurden in China Windräder zur Entwässerung von Reisfeldern genutzt. Diese chinesischen Windräder hatten wie die persische Windmühle eine vertikale Drehachse und wurden mit Hilfe von sich wegklappenden Stoffflügeln angetrieben.



Abbildung 1-2: Chinesisches Windrad mit umklappbaren Flügeln [16]

Sowohl das persische Windrad wie auch das chinesische Windrad basieren auf dem Prinzip der Widerstandsläufer.

1.2 Beginn der Windenergienutzung in Europa

In Europa wurde im 12. Jahrhundert eine Windmühle mit horizontaler Drehachse erfunden. Dies geschah wahrscheinlich unabhängig von den Vertikalachsen-Windrädern des Orients. Der erste belegbare Hinweis stammt aus dem Jahre 1180 aus dem damaligen Herzogtum Normandie. Dort soll eine sogenannte Bockwindmühle gestanden haben. Im Gegensatz zu dem persischen oder chinesischen Windrad, arbeiten alle europäischen Windmühlentypen mit dem Auftriebsprinzip.

Eine genaue Beschreibung der Wirkungsweisen der Auftriebs- bzw. Widerstandsläufer folgt im Abschnitt 2.1.

1.2.1 Bockwindmühle

Die Bockwindmühle ist der älteste (ab ca. 1180 n.Chr.) auf dem Auftriebsprinzip basierende Mühlentyp. Das wichtigste Merkmal der Bockwindmühle ist der Bock auf dem das ganze Mühlenhaus drehbar gelagert ist. Der Bock besteht aus einem zentralen Hausbaum, der mit vier diagonalen Kreuzstreben versteift ist. Er ragt bis etwa zur halben Höhe in das Mühlenhaus. Das in der Regel vierflügelige Windrad ist im oberen Mühlenhaus gelagert. Die Drehung des Mühlenhauses erfolgt durch den sogenannten Sterz oder Steert, einem an der Rückwand befestigtem Kragarm, mit dessen Hilfe man das ganze Mühlenhaus um den Hausbaum drehen konnte. Bockwindmühlen wurden vorwiegend zum Mahlen von Mehl eingesetzt.

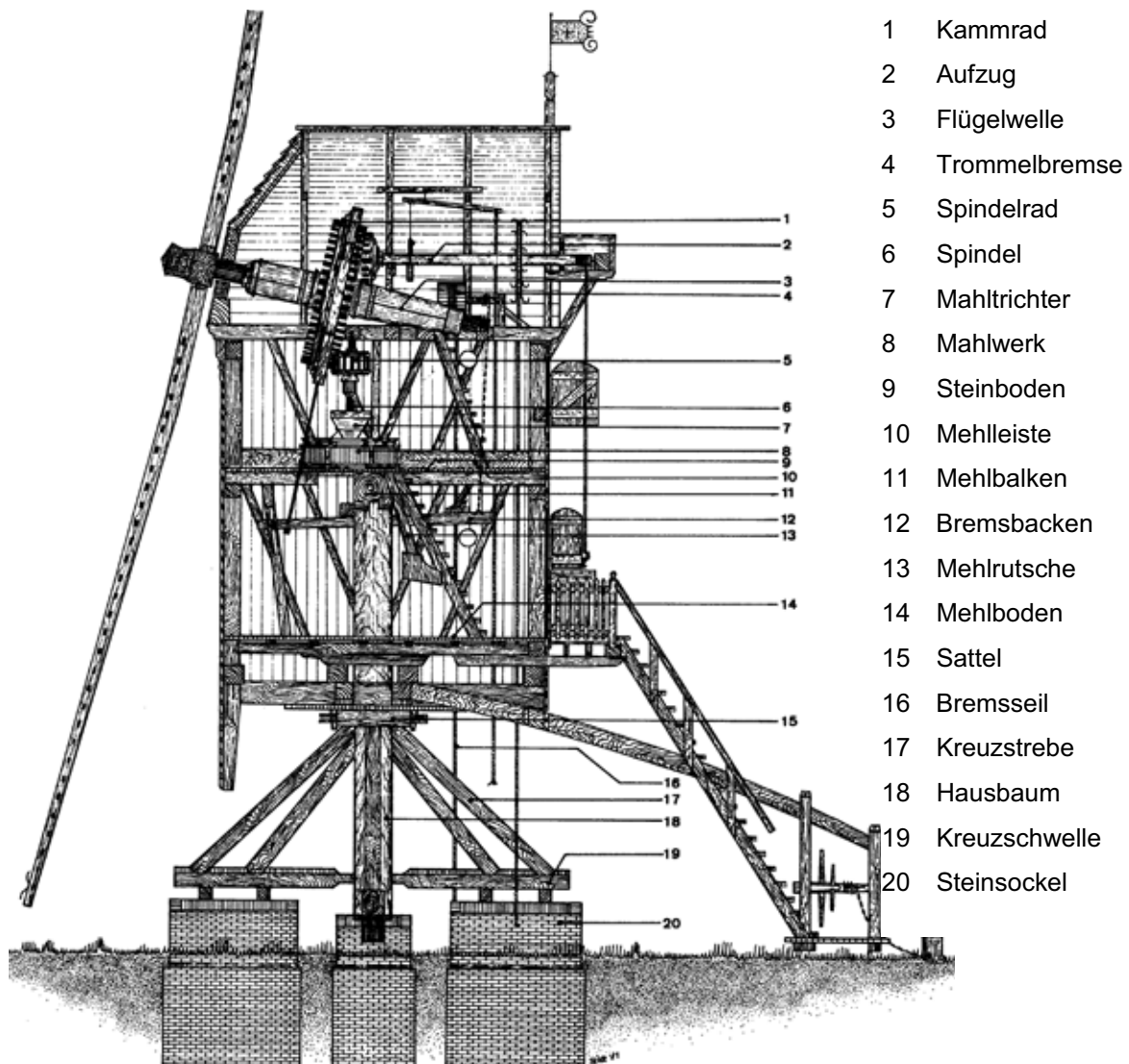


Abbildung 1-3: Aufbau einer Blockwindmühle [16]

1.2.2 Wippmühle

Zu Beginn des 15. Jahrhunderts versuchte man in Holland mit Hilfe von Windmühlen Wasserschöpfwerke anzutreiben. Die Windmühlen mussten ein feststehendes Schöpfrad antreiben, was mit den vorhandenen Bockwindmühlen nicht möglich war. Dies führte zur Weiterentwicklung der Bockwindmühle zur Wippmühle. Die größte Neuerung der Wippmühle war, dass die Antriebswelle des drehbar gelagerten Mühlenhauses durch den feststehenden Bock geführt wurde und dort das Schöpfrad antrieb. Später wurden auch Kornmühlen nach diesem Prinzip gebaut.

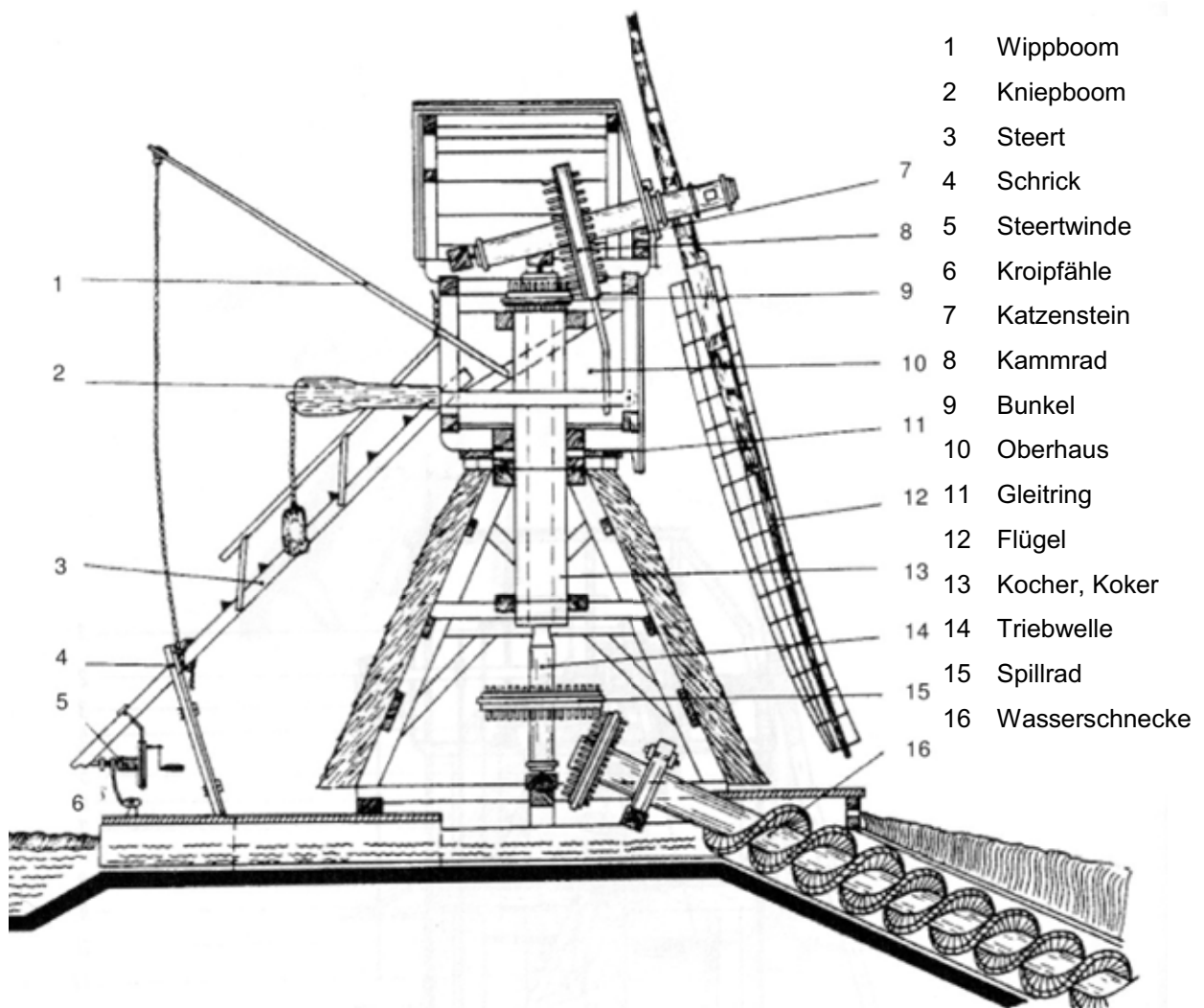


Abbildung 1-4: Aufbau einer Wippwindmühle [13]

1.2.3 Turmwindmühle

Im Mittelmeerraum konnte sich die im restlichen Europa sehr weit verbreitete Bockwindmühle nicht durchsetzen. In dieser Region kamen vorwiegend Turmwindmühlen zum Einsatz. Charakteristisch für diesen Mühlentyp ist das zylindrisch gemauerte Mühlenhaus (Turm) mit einem meist achtflügeligen Segelrotor. Die ersten Mühlen dieser Art hatten eine starre, meist mit Stroh gedeckte Dachhaube, die nicht nach der Projektgruppe Kleinwindkraftwerk

gerade vorherrschenden Windrichtung ausgerichtet werden konnte. Später lagerte man die Flügelradwelle so, dass sie in mehrere Lagerpositionen umgesteckt werden konnte und somit zumindest eine grobe Ausrichtung nach dem Wind möglich wurde.

1.2.4 Holländerwindmühle

Die Weiterentwicklung der Bockmühle zur Wippmühle zeigte, dass eine Mühle mit einem festen Stand die besseren Voraussetzungen für den Antrieb der Arbeitsmaschine bot. Aus diesem Gedanken heraus entstand im 16. Jahrhundert die Holländermühle mit ihrem festen Mühlenhaus und der drehbaren Dachhaube. Das feststehende Mühlenhaus ermöglichte es erheblich größere und leistungsfähigere Mühlen zu bauen. Holländermühlen wurden zum Antrieb von Wasserschöpfwerken, Getreidemahlsteinen und Hammerwerken benutzt.

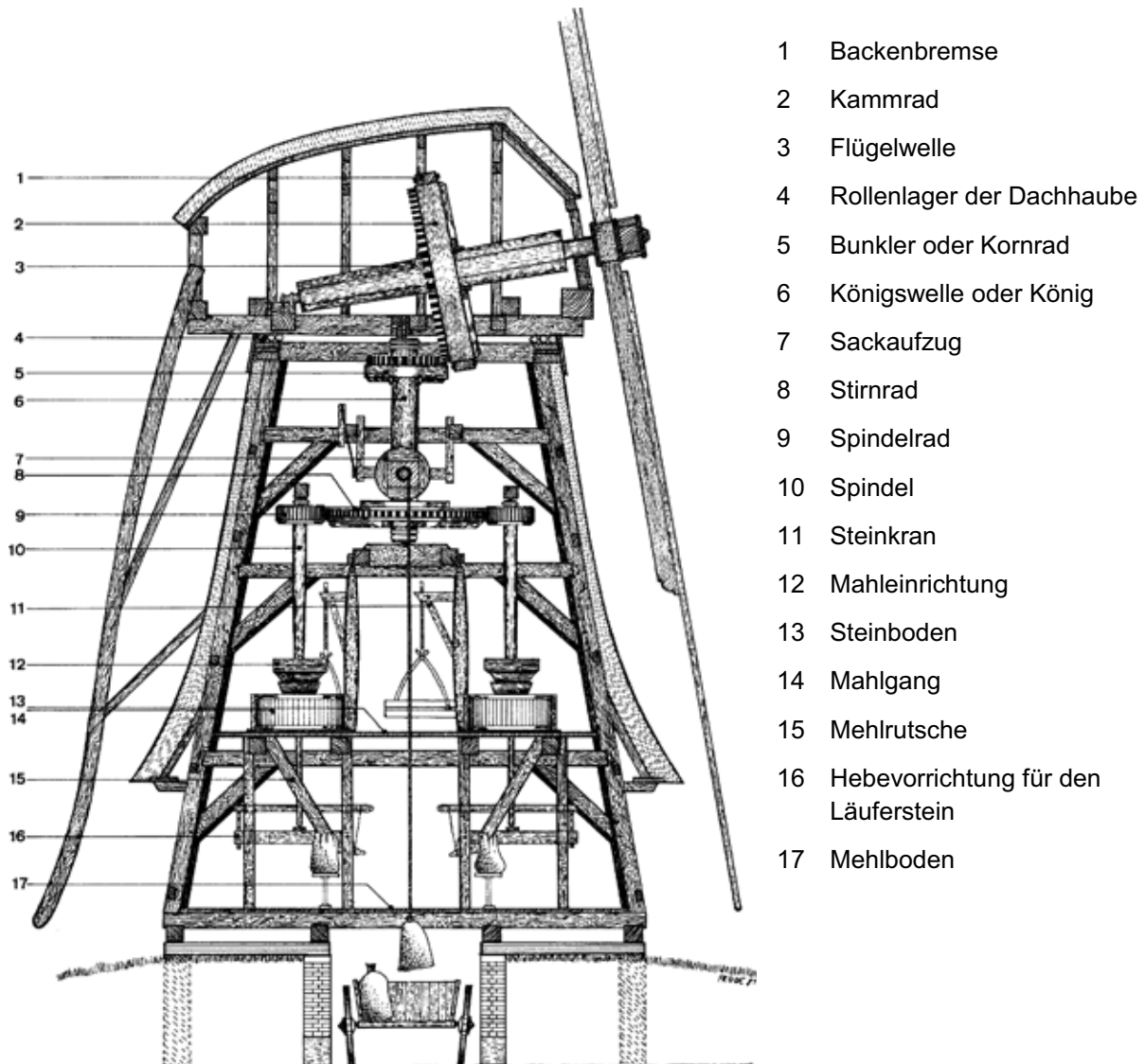


Abbildung 1-5: Aufbau einer Holländer Mühle [16]

Durch technische Neuerungen wie z.B. das Seitenrad (ca. 1750), das eine automatische Windnachführung ermöglichte und den Jalousieflügeln (ca.1792), durch die erstmals eine gewisse Drehzahl- und Leistungsregelung möglich wurde, entwickelte sich die Holländermühle bis ins 19. Jahrhundert zum technisch und wirtschaftlich wichtigsten Mühlentyp.

1.2.5 Paltrock-Mühle

Bei der Paltrock-Mühle ist, ähnlich der Bockwindmühle, das gesamte Mühlenhaus drehbar gelagert. Die im 17. Jahrhundert aufkommende Mühlenform wurde zunächst ausschließlich als Holzsägemühle unmittelbar an Gewässern gebaut. Dies ermöglichte es, schwere Baumstämme direkt von einem Schiff auf eine herausragende Arbeitsplattform zu verladen. Dieser seltene Mühlentyp wurde später auch im geringen Umfang als Getreidemühle eingesetzt.

1.2.6 Amerikanische Windturbine

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts stellte die Wasserversorgung der Siedler in Amerika neue Anforderungen an die Windkraftnutzung. In kargen Regionen ohne natürliche Oberflächengewässer pumpten die immer weiter ins Landesinnere vordringenden Siedler das für ihr Überleben notwendige Wasser aus Brunnen. Große Windmühlen, wie sie von holländischen und englischen Siedlern an der Ostküste Amerikas errichtet wurden, waren hierfür nicht geeignet. Neben der fehlenden Mobilität waren die existierenden Windpumpen den Siedlern zu arbeitsaufwendig. So mussten diese dauernd beaufsichtigt werden und bei einem Sturm mussten die Segel rechtzeitig gerefft werden. Daniel Halladay entwickelte aus diesem Grund im Jahr 1854 eine Windturbine deren Rotorblätter über einen Fliehkraftregler verstellt werden konnten. Halladay belegte die Radfläche mit sehr vielen schmalen Rotorblättern, wodurch seine Windturbine bereits bei einem sehr schwachen Wind anliefe. Die Nachführung erreichte er durch eine Windfahne. Die Anlage entwickelte bei geringer Drehzahl ein hohes Drehmoment und war daher ideal zum Antrieb von Kolbenwasserpumpen geeignet. Wegen ihrer relativ komplizierten Bauweise wurde diese Turbine eher selten eingesetzt.

Eine einfachere Lösung fand einige Jahre später Leonard R. Wheeler. Er verwirklichte eine Sturmregelung, durch die Verwendung einer zusätzlichen, quer zur Windrichtung stehenden Windfahne, mit deren Hilfe das ganze Windrad bei Sturm aus der Windrichtung gedreht wurde. Diese zusätzliche Windfahne war mit einem Gewicht verbunden, dass das Windrad bei nachlassendem Wind wieder in die Ausgangslage zurückschwenkte. Die unter dem Namen „Eclipse“ vertriebene Windturbine wurde zur Standardbauweise der amerikanischen Windturbine. Die

Nachfrage nach diesen einfachen und billigen Windturbinen war weltweit enorm. Bis zum Jahr 1930 wurden ca. 6,5 Millionen Stück dieses Typs produziert.



Abbildung 1-6: Halladaysche Windmühle [16]



Abbildung 1-7: Windturbine "Eclipse" [16]

1.3 Stromerzeugung aus Windkraft

Während bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts die meisten großen Städte der industrialisierten Länder mit elektrischem Strom versorgt wurden, dauerte die Elektrifizierung ländlicher Regionen erheblich länger. Angeregt durch die dänische Regierung, die nach Möglichkeiten suchte ländliche Gebiete mit Elektrizität zu versorgen, beschäftigte sich der dänische Professor Poul La Cour bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit dem Einsatz von Windkraftanlagen zur Erzeugung von elektrischem Strom. La Cour errichtete 1891 in Askov eine Experimental-Windkraftanlage zum Antrieb eines Dynamos (Abbildung 1-8). Um eine möglichst gute Handhabbarkeit der Anlage zu erreichen, entschied er sich gegen die Vorteile von aerodynamisch gestalteten Flügeln und setzte auf traditionelle Mühlenbauweise mit vier Rotorblättern und regelbaren Jalousieflügeln. Die Windrichtungsnachführung erfolgte über zwei Seitenwindräder. Eine Möglichkeit der Energiespeicherung fand La Cour indem er den von seiner Windkraftanlage erzeugten Gleichstrom zur Elektrolyse von Wasser verwendete und das so gewonnene Wasserstoffgas speicherte. Die Windkraftanlagen von La Cour leisteten mit Rotordurchmessern von bis zu 20 m zwischen 10 und 35 kW. Bis zum Jahr 1918 wurden insgesamt 120 der sehr zuverlässig arbeitenden Anlagen zur Erzeugung von Gleichstrom gebaut.

Abbildung 1-8: Windkraftanlage zur Erzeugung von Elektrizität in Askov, Dänemark, 1891 [16]

1.3.1 Großwindanlagen

In den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts wurden in Deutschland einige, für damalige und heutige Verhältnisse gigantische, Windkraftanlagen mit Nennleistungen bis zu 20000 kW¹ geplant. Ziel dieser Anlagen war es nicht ländliche Gebiete mit Strom zu versorgen, sondern die wirtschaftliche Erzeugung von elektrischem Strom durch Windkraft im Verbund mit konventionellen Kraftwerken. Gefördert durch das Streben des Deutschen Reiches nach Unabhängigkeit von Treibstoff- und Energieimporten wurden einzelne Projekte sogar bis zur Baureife geplant. Eine Realisierung dieser Projekte wurde durch den Ausbruch des Zweiten Weltkrieges verhindert.

1941 baute der amerikanische Ingenieur Palmer C. Putnam zusammen mit der S. Morgan Smith Company in amerikanischen Bundesstaat Vermont die erste wirklich große Windkraftanlage der Welt. Die Anlage leistete, bei einer Turmhöhe von

¹ Vgl. [16]: Diese hohe Leistung sollte durch Kombination von 5 Rotoren mit jeweils 160m Durchmesser in einer Anlage erreicht werden.

35,6 m und einem Rotordurchmesser von 53,3 m, 1250 kW elektrischen Strom. 1945 wurde die Smith-Putnam-Anlage nach einem Flügelbruch abgerissen. Bis dahin hatte die Anlage rund 1000 Stunden Strom in das öffentliche Netz eingespeist. Eine von Putnam entwickelte verbesserte Version wurde wegen den fehlenden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen nicht mehr umgesetzt, da nach dem zweiten Weltkrieg die Preise für Kohle und Öl wieder gefallen sind.

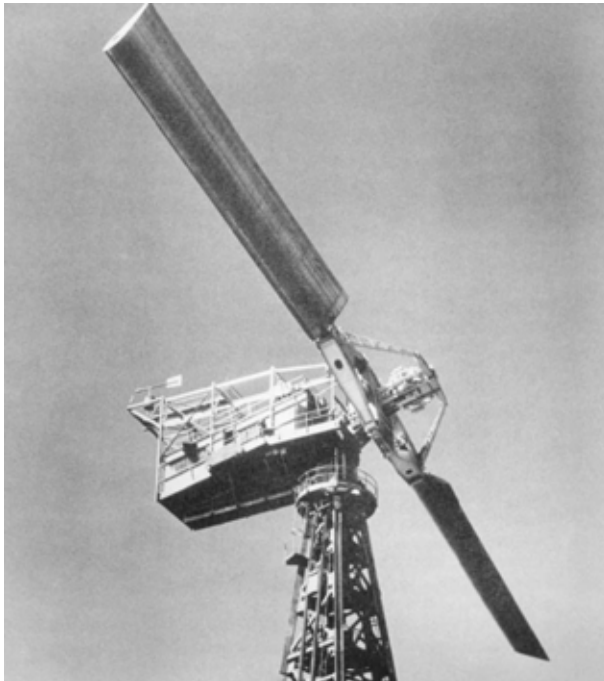


Abbildung 1-9: Smith-Putnam-Anlage, USA, 1941 [16]

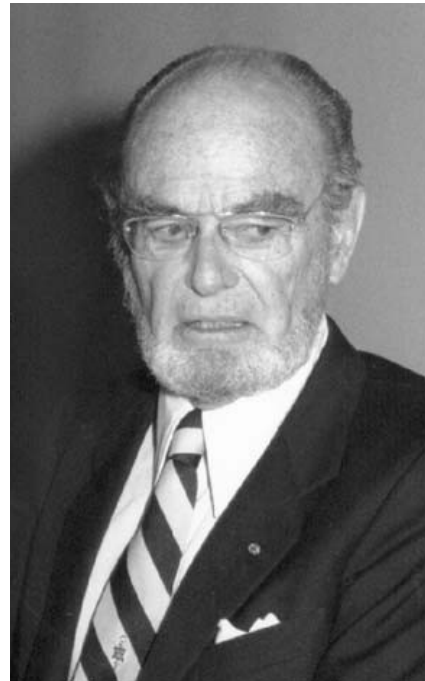


Abbildung 1-10: Palmer C. Putnam [16]

Trotz der gefallen Preise für Primärenergie wurde in Europa an der Entwicklung von Großanlagen zur Erzeugung von elektrischem Strom weitergearbeitet. Besonders hervorzuheben sind hier die Windkraftanlage von Gedser (Dänemark, 1957) mit einem Durchmesser von 24 m und einer Nennleistung von 200 kW, die Windkraftanlage von Best-Romani (Frankreich, 1958) mit einem Rotordurchmesser von 30 m und einer Nennleistung von 800 kW und die Windkraftanlage W34 von Ulrich Hütter (Deutschland, 1958) auf der Schwäbischen Alb mit einem Rotordurchmesser von 34 m und einer Nennleistung von 100 kW. Gemessen am Rotordurchmesser verfügte die W34 über eine relativ kleine Nennleistung. Gründe hierfür sind, dass Hütter seine W34 für eine vergleichsweise geringe durchschnittliche Windgeschwindigkeit konzipierte, wie sie im Binnenland auftreten und außerdem sehr großen Wert auf Leichtbau legte. So wurden z.B. die Rotorblätter

in der damals neuen Glasfaser-Verbundbauweise hergestellt. Die W34 beeinflusste die Auslegung der späteren deutschen Windkraftanlagen erheblich.



Abbildung 1-11: W34-Anlage, BRD, 1958 [16]

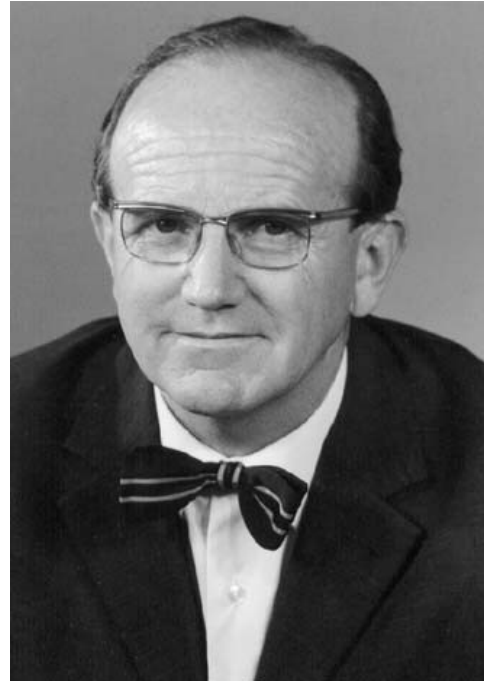


Abbildung 1-12: Ulrich Hütter [16]

2 Technische Grundlagen der Windkraftnutzung

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Im Wind enthaltene Leistung

Die im Wind „gespeicherte“ Energie ist nichts weiter als die Bewegungsenergie der strömenden Luftmasse. Wie aus der Kinetik bekannt, errechnet sich die Energie einer bewegten Masse nach:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

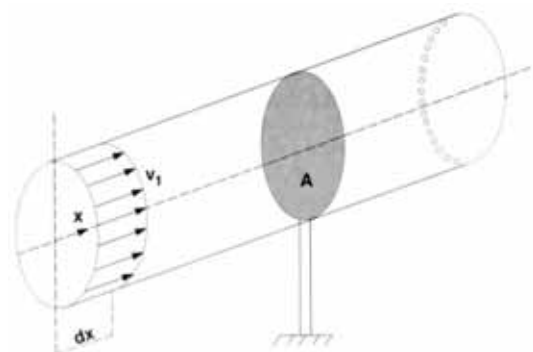
Bei der Berechnung von Windkraftanlagen interessiert aber weniger die Energie des Windes, als vielmehr dessen momentan erreichbare Leistung.

Die Leistung entspricht hierbei einem Massenstrom der mit einer Geschwindigkeit v eine bestimmte Fläche A durchströmt. (Energie pro Zeiteinheit = Leistung)

$$P = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2$$

Der Massenstrom $\dot{m}$ ist die Luftmasse, die sich pro Zeiteinheit durch eine Fläche bewegt.

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v \quad \text{mit} \quad v = \frac{dx}{dt}$$



Damit ergibt sich die Windleistung zu:

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Abbildung 2-13: Massendurchsatz einer durchströmten Fläche [14]

Eine Umsetzung der Windenergie in mechanisch nutzbare Energie erfolgt durch Abbremsung der Luft an den Rotoren. Ohne Verlangsamung der Windgeschwindigkeit am Rotor kann somit auch keine Energie umgesetzt werden.

Die theoretische Windleistung wird bei der praktischen Anwendung allerdings niemals erreicht. Der Grund dafür ist die notwendige Windgeschwindigkeit die nach dem Rotor herrschen muss um die Luftmassen auch „abtransportieren“ zu können. Ein Stillstand der Luftmassen nach dem Rotor (Energie zu 100% abgegeben) hat unweigerlich auch einen Stillstand des Rotors zur Folge, da kein weiterer Massenstrom mehr möglich ist.

Die Lösung dieses Problems findet sich also irgendwo in der Mitte der beiden Extreme. Gedanken hierzu machten sich die Herren Lanchester und Betz, die herausfanden, dass maximal $\frac{16}{27}$, also knapp zwei Drittel, der maximalen Windleistung in mechanische Leistung wandelbar sind. Verwendung findet dieser Wert als Leistungsbeiwert: $c_{p,Betz} = 0,59$

Reale Windkraftanlagen sind alle mehr oder weniger Verlustbehaftet sodass in der Praxis dieser Leistungsbeiwert nicht erreicht wird.

Windgeschwindigkeiten vor, in und hinter der Radebene:

Vor der Radebene: v_1

In der Radebene: $v_2 = \frac{2}{3} \cdot v_1$

Hinter der Radebene: $v_3 = \frac{1}{3} \cdot v_1$

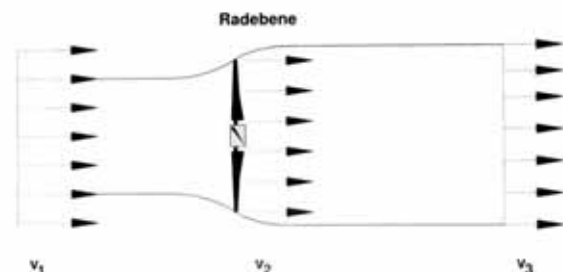


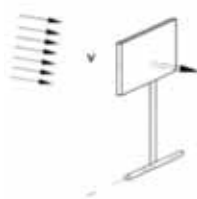
Abbildung 2-14: Windgeschwindigkeiten vor, in und hinter der Radebene [14]

2.1.2 Widerstandsläufer

Der Widerstandsläufer stellt dem Wind eine Fläche entgegen und erzeugt damit einen Staudruck. Dieser Staudruck bezogen auf eine bestimmte Fläche ergibt eine Kraft. Die Kraft wirkt hier, anders als bei Auftriebsläufern, in Richtung der anströmenden Luft.

Bei Widerstandsläufern wird die erzeugte Kraft passenderweise auch Widerstandskraft genannt. Diese errechnet sich bei einer stillstehenden Fläche wie folgt:

$$F_W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot A$$



$$W = c_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \cdot f$$

c_W	Körper
1,11	Kreisplatte
1,10	Quadratplatte
	Halbkugel
	offen
0,34	$\rightarrow \subset$
1,33	$\rightarrow \supset$

Abbildung 2-15: Nutzung des Luftwiderstandes als Antriebskraft [14]

Der c_W – Wert, Widerstandsbeiwert genannt, gibt an, welchen Widerstand eine Fläche dem anströmenden Wind entgegenstellt. Anders ausgedrückt, wie gut oder schlecht umströmt die Luft einem bestimmten Körper. Als Proportionalitätskonstante ist dieser Wert dimensionslos. Hohe c_W -Werte sind hier gleichbedeutend mit einem großen Luftwiderstand, während kleine Werte entsprechend für einen geringeren Luftwiderstand stehen. Die Fläche A (in Abbildung 2-15) bezeichnet die Projektionsfläche eines beliebigen Körpers senkrecht zum anströmenden Wind.

Um die Leistung eines rotierenden Systems zu ermitteln, muss die Widerstandskraft in Bezug mit der Umfangsgeschwindigkeit des Rotors gebracht werden.

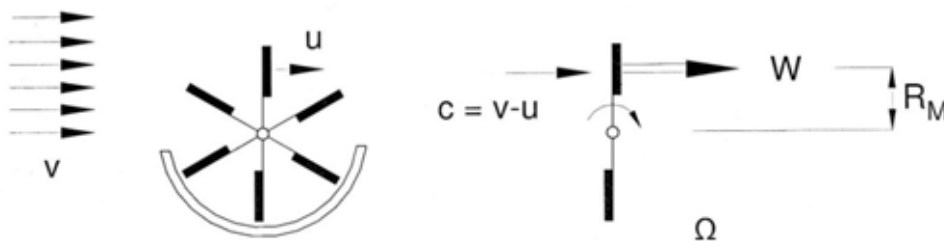


Abbildung 2-16: Prinzip Widerstandsläufer [14]

Die Leistung ist hierbei definiert als

$$P = F_W \cdot u$$

Die Leistung ist hier entweder direkt über die Umfangsgeschwindigkeit darstellbar (siehe oben), oder indirekt durch den Leistungsbeiwert c_P und der Anströmgeschwindigkeit der Luft.

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \cdot c_P$$

Sämtliche Widerstandsläufer haben sehr geringe Leistungsbeiwerte d.h. die Energie des Windes wird nur zu einem geringen Teil in mechanische Leistung umgesetzt. So liegt z.B. der Leistungsbeiwert der Persischen Windmühle lediglich bei 0.17 und die des Schalenkreuzaneometers nur bei 0,08.

2.1.3 Auftriebsläufer

Auftriebsläufer nutzen für ihren Antrieb eine bei angeströmten Flügelprofilen zusätzlich auftretende Kraftkomponente. Diese Kraftkomponente, Auftriebskraft genannt, bildet sich senkrecht zum anströmenden Wind (in Abbildung 2-17) aus. Dieser Auftrieb wird am Rotor in eine Drehbewegung umgesetzt. Zusätzlich zur Auftriebskraft wirkt noch eine geringe Widerstandskraft entgegen der Richtung des Windes. Diese fällt relativ gering aus (20 bis 100 mal geringer als die Auftriebskraft), da aerodynamische Profile in aller Regel einen sehr niedrigen c_W – Wert aufweisen.

Die Auftriebskraft kommt durch den Druckunterschied bei umströmten Flügelprofilen zustande. Wie in Abbildung 2-17 erkennbar, ist der Weg den der Wind auf der Flügeloberseite zurückzulegen hat größer als der auf der Unterseite des Profils. Dadurch ergibt sich auf der Profiloberseite eine höhere Strömungsgeschwindigkeit und somit, nach Bernoulli, auch ein geringerer Druck. Der Druck auf der Unterseite bleibt nahezu konstant, sodass sich zwischen Flügelober- und Unterseite ein Druckunterschied ausbildet.

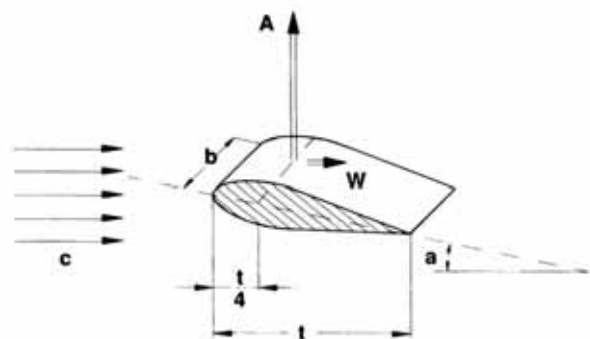


Abbildung 2-17: Auftriebskraft A und Widerstandskraft W am Tragflügel [14]

$$F_A = c_A \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2$$

Wie in Abbildung 2-18 erkennbar ist die Auftriebskraft neben der Flügelfläche auch von dem Anstellwinkel des Flügels abhängig. Dieser Winkel findet sich indirekt im Auftriebsbeiwert wieder. Auftriebsbeiwerte sind im Windkanal experimentell ermittelte, für jede Flügelform individuelle Werte.

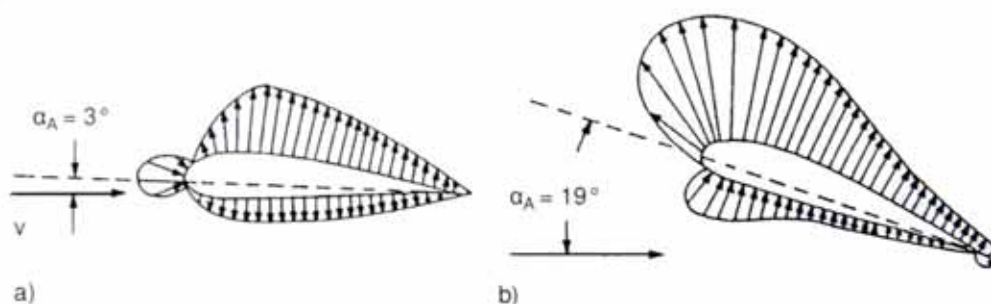


Abbildung 2-18: Druckverteilung auf einem Tragflügelprofil bei kleinerem und größerem Anstellwinkel [14]

Aus den Kraftkomponenten Auftriebskraft und Widerstandskraft ergibt sich eine resultierende Kraft.



Abbildung 2-19: Resultierende K aus Auftriebskraft A und Widerstandskraft W [14]

Ein weiterer Begriff der oft Verwendung findet ist die Gleitzahl. Die Gleitzahl drückt das Verhältnis von Auftriebsbeiwert zu Widerstandsbeiwert aus.

$$\varepsilon = c_A / c_W$$

Abhängigkeiten für die Gleitzahl ergeben sich aus Anstellwinkel und Flügelprofil. Hohe Gleitzahlwerte sind gleichbedeutend mit guten Profilen. Dies bedeutet nichts anderes, als dass bei großen Gleitzahlwerten der Luftwiderstand des Profils klein ist und damit der Wirkungsgrad entsprechend steigt. Gute Profile erreichen Gleitzahlen von 60 und mehr. Bevor man auf die Winddreiecke eingeht, gilt es noch die Schnelllaufzahl als weiteren bestimmenden Parameter zu erläutern. Die Schnelllaufzahl ist definiert als Umfangsgeschwindigkeit an der Flügelspitze zur Windgeschwindigkeit v_1 .

$$\lambda = \Omega \cdot R / v_1$$

Winddreiecke

Die lokale Anströmgeschwindigkeit am Blatt ist von der Windgeschwindigkeit verschieden und darf mit dieser nicht verwechselt werden. Wie in Abbildung 2-20 zu sehen ergibt sich aus der Drehzahl des Flügels eine Umfangsgeschwindigkeit u welche mit der Windgeschwindigkeit v_2 die Anströmgeschwindigkeit c ergibt. Diese Überlagerung wird als Winddreieck bezeichnet. Die Anströmgeschwindigkeit des Profils kann die Windgeschwindigkeit bis auf das 9-fache übersteigen.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors nimmt mit zunehmendem Radius immer weiter zu. Dadurch ergibt sich für jeden Ringschnitt des Rotors ein anderes Geschwindigkeitsdreieck mit entsprechend anderen Anströmverhältnissen. Um den Anströmungswinkel des Flügels konstant zu halten, muss sich dessen Geometrie auf der gesamten Länge den Anströmverhältnissen anpassen. Dabei ändert sich nicht nur die Dicke und Tiefe des Flügels, der Anstellwinkel muss ebenfalls angepasst werden.

Es wird auch ersichtlich, dass eine Änderung der Windgeschwindigkeit zu veränderten Anströmverhältnissen führt. Diesen Effekt macht man sich bei der Stall-Regelung zunutze.

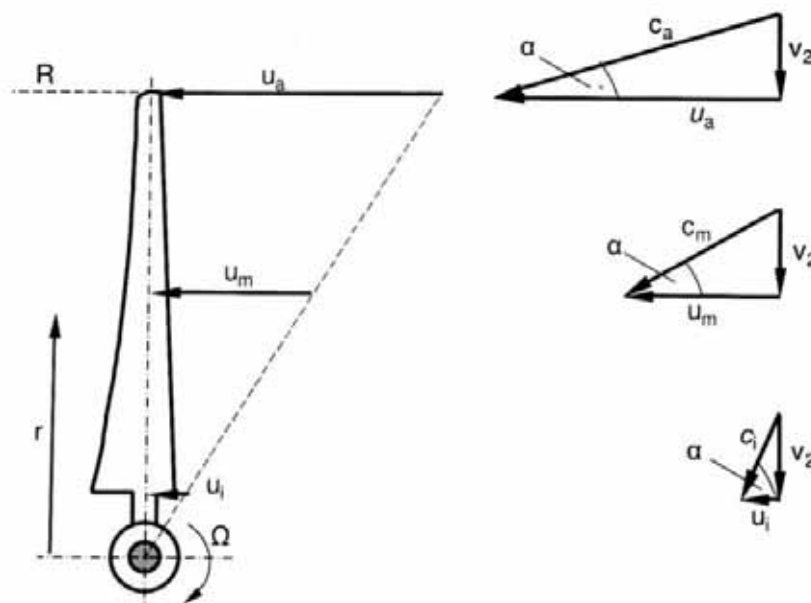


Abbildung 2-20: Winddreiecke in verschiedenen Flügelschnitten [14]

2.1.4 Verluste

2.1.4.1 Profilverluste

Profilverluste werden vom Widerstand des angeströmten Profils verursacht. Ausschlaggebend für diese Verluste ist neben der Gleitzahl auch die Schnelllaufzahl. Durch die höhere Umfangsgeschwindigkeit und damit auch Anströmgeschwindigkeit des Profils im Außenbereich des Rotors nimmt die Widerstandskraft zum äußeren Rand hin zu. Bei Schnellläufern wird die meiste Leistung im Außenbereich umgesetzt, daher sind hier besonders hochwertige Profile einzusetzen.

Für die Annahme, ein Flügeltyp würde über die gesamte Länge des Rotors eingesetzt, ergibt sich ein Verlust von

$$P_{vp} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^3 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \left[1 - \frac{\lambda_A}{z} \right]$$

Es wird ersichtlich, dass das Verhältnis von Schnelllaufzahl zu Gleitzahl ausschlaggebend für die Profilverluste ist.

Reale Flügelprofile ändern jedoch von der Nabe bis hin zur Flügelspitze ihre Geometrie kontinuierlich. Bei diesen Profilen muss der Verlust für jeden Ringschnitt separat bestimmt werden.

2.1.4.2 Tip – Verluste

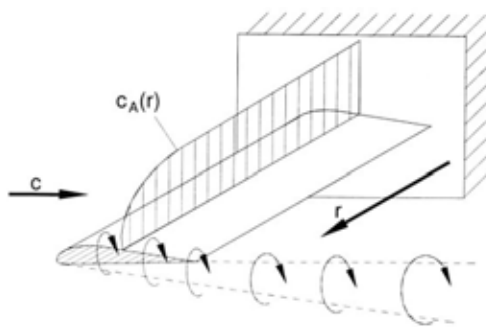


Abbildung 2-21: Spitzenumströmung von der Druckseite zur Saugseite [14]

An der Flügelspitze wird der Druckunterschied abgebaut. Von der Flügelunterseite (Druckseite) zur Flügeloberseite (Saugseite) findet ein Druckausgleich statt. Dies hat einen Verlust an Auftrieb und damit auch einen Leistungsverlust zur Folge. Annähernd lässt sich der Verlust bei

Schnelllaufzahlen $\lambda_A > 2$ wie folgt berechnen:

$$\xi_{tip} = \frac{1,84}{z} \cdot \lambda_A$$

z = Flügelanzahl

2.1.4.3 Drallverluste

Der Wind hinter einer Windkraftanlage ist mit einem Drall behaftet. Dieser kommt durch ein sich einstellendes Kräftegleichgewicht zustande, welches durch eine Drehmomententnahme verursacht wird. Die Drallverluste nehmen mit größerer Drehmomententnahme zu, sodass Langsamläufer wie die Westernmill einen größeren Drall verursachen als Schnellläufer. Je größer der Drall desto höher sind auch die Verluste einer Anlage.

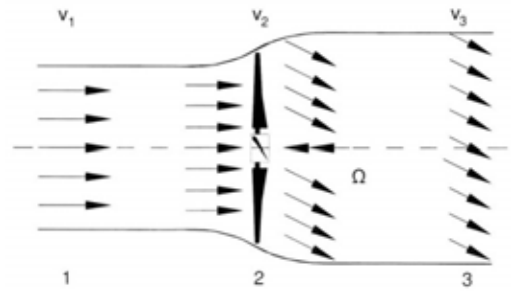


Abbildung 2-22: Drallbehaftete Strömung hinter dem Windrad [14]

2.2 Technische Grundlagen

2.2.1 Luvläufer und Leeläufer

Bei Luvläufern befinden sich die Rotorblätter auf der dem Wind zugewandten Seite des Turmes. Dies macht eine Windnachführung notwendig. Diese Anordnung kommt vor allem bei großen Windkraftanlagen zum Einsatz.

Leeläufer arbeiten mit den Rotorblättern auf der dem Wind abgewandten Seite des Turmes. Vor allem bei kleineren Anlagen bietet diese Anordnung zwei wesentliche Vorteile:

- Es ist keine Windnachführung notwendig (passive Windnachführung)
- Es besteht kaum Gefahr das sich Rotorblatt und Turm berühren

Ein großer Nachteil der Leeläufer ist der Windschatten des Turmes. Durchlaufen die Rotorblätter diesen Windschatten, kommt es zu unerwünschten Schwingungen und Spannungsschwankungen.

2.2.2 Drehzahlregelung

Zur Drehzahlregelung von Windkraftanlagen kommen im Grunde drei verschiedene Methoden zur Anwendung.

- **Stall Regelung**

Ab der Nenngeschwindigkeit kommt es am Rotorblatt zum sogenannten Strömungsabriss (siehe Winddreiecke). Die entstehenden Turbulenzen erhöhen die aerodynamischen Verluste und begrenzen somit Drehzahl und damit auch Leistung der Anlage. Voraussetzung für eine Stallregelung ist eine feste Nenndrehzahl ab der die Regelung greift. Dieses System ist Selbstregulierend, wenn auch etwas träge, sodass bei starken Böen durchaus Drehmomentspitzen auftreten können.

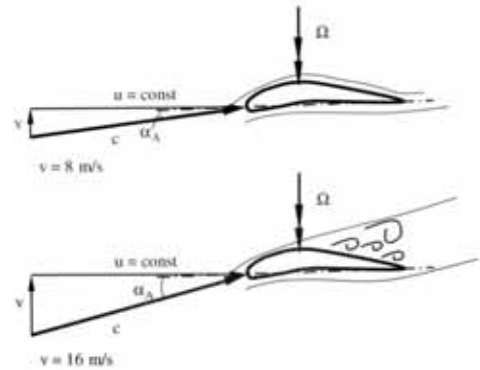


Abbildung 2-23: Strömungsabriss bei zu hoher Windgeschwindigkeit [14]

- **Pitch Regelung**

Die Leistungsregelung erfolgt hier über ein Verdrehen der Rotorblätter. Bei einer Veränderung des Anstellwinkels ändert sich auch der Auftriebsbeiwert des Flügels. Das führt zu einer Beeinflussung der abgegebenen Leistung. Diese Regelung erlaubt eine Nutzung des Windes über ein breites Geschwindigkeitsspektrum hinweg, so kann beispielsweise bei Starkwind über eine Anstellung der Rotorblätter die Auftriebskraft und damit die abgegebene Leistung reduziert werden.

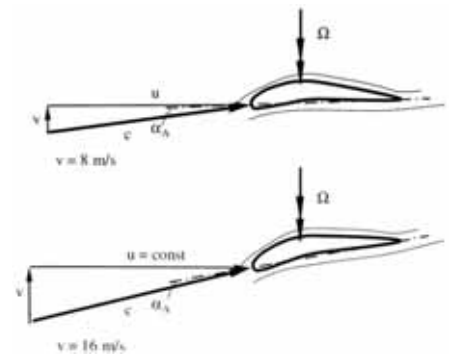


Abbildung 2-24: Pitchen des Rotorblattes in Richtung Fahnenstellung [14]

Ein Abbremsen der Anlage bei Sturm oder Wartungsarbeiten erfolgt ebenfalls durch die Rotorblätter. In diesem Fall erfolgt eine Drehung der Flügel um 90° in die sog. Fahnenposition.

- **Aktive Stall Regelung**



Diese Regelung verbindet den Stall-Effekt mit einer Verdrehung des Rotorblattes (Pitch) um den Zeitpunkt des Strömungsabrisses gezielt kontrollieren zu können. Die Verstellung der Rotorblätter erfolgt hier jedoch, im Vergleich zur Pitch-Regelung, in die entgegengesetzte Richtung. Nachteil dieser Wirkungsweise ist eine erhöhte Belastung der Nabe.[14]

3 Anwendungen von Kleinwindkraftanlagen

3.1 Geeignete Orte für Kleinwindkraftanlagen

Allgemein kann gesagt werden, dass der Einsatz einer Kleinwindkraftanlage erst ab einer Mindestwindgeschwindigkeit von 3,5 m/s sinnvoll ist. Je nach Leistung und Anlaufgeschwindigkeit der Anlage ergeben sich daraus mehr oder weniger geeignete Standorte. In Summe kommen vor allem Küstengebiete in Frage, an denen der Wind fast immer weht. Daher sind Kleinwindkraftanlagen für Haushalte, Industrie und Landwirtschaft vorteilhaft, wenn deren Aufstellungsorte nahe an der Küste, oder etwas höher liegen. Es ist jedoch zu beachten, dass die meisten Anlagen ab einer Windgeschwindigkeit von ca. 16.5 m/s abschalten und sich aus dem Wind drehen, damit keine Schäden an den Rotorblättern und den restlichen Bauteilen entstehen. Des Weiteren ist zu sagen, dass die Windverhältnisse in den Wintermonaten wesentlich besser sind als in den Sommermonaten. Dies spricht sehr stark dafür, Kleinwindkraftanlagen zusammen mit Photovoltaik oder Solarthermie als Hybridanlagen einzusetzen, da hierfür die Verhältnisse im Sommer wesentlich besser sind.

3.1.1 Global

Global gesehen fallen vor allem Gebiete in Nordafrika, Nordamerika, Kanada und Australien auf. Auch in Asien sieht das Dargebot an Wind relativ gut aus. Hier sind die Windgeschwindigkeiten auch im Inland nahezu ausreichend. Vor allem die autarke Energieversorgung in entlegenen Gebieten würde sich in den genannten Ländern anbieten, da die Bevölkerung zum Teil weit weg der Ballungszentren wohnt und deshalb die Netzanbindung nicht rentabel ist. Am meisten Ausbeute liefern jedoch die Küstengebiete.

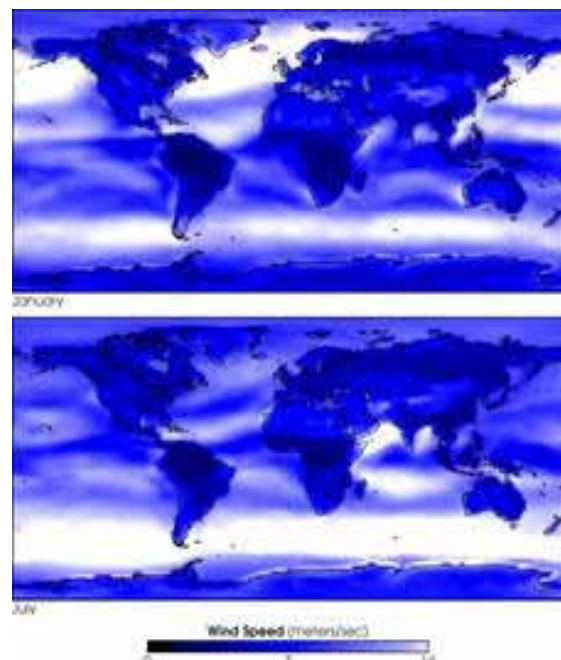


Abbildung 3-25: Windgeschwindigkeiten Global [6]

3.1.2 Europa

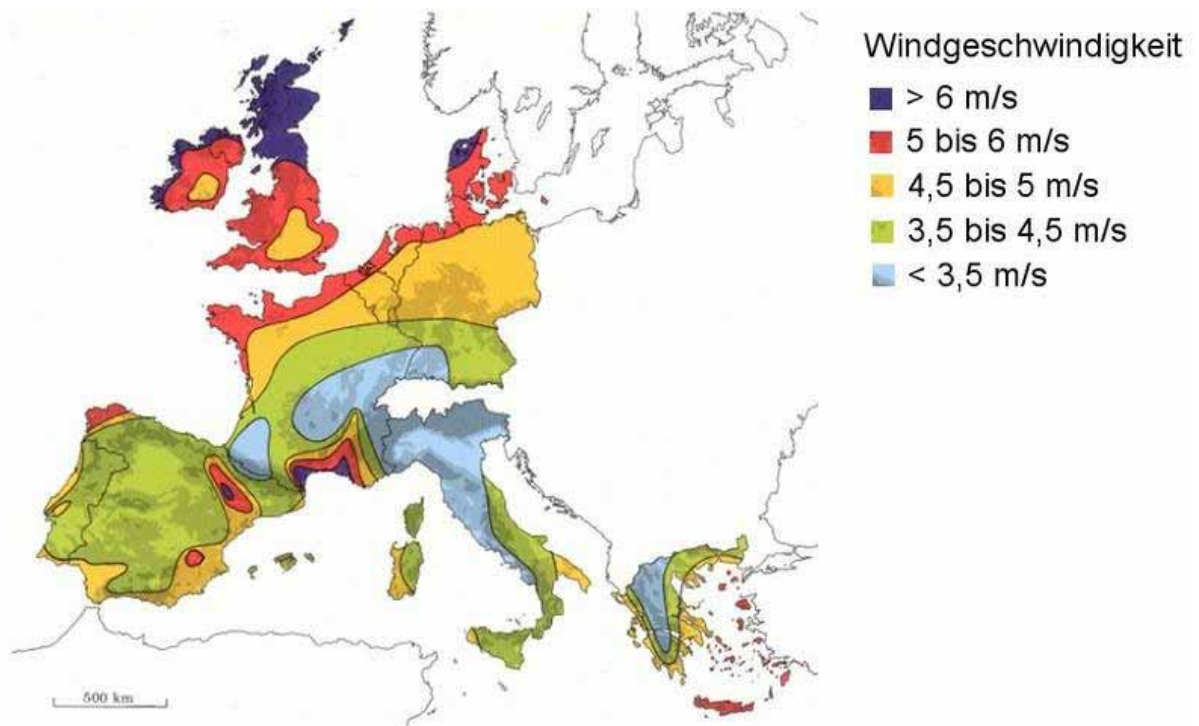


Abbildung 3-26: Windgeschwindigkeiten Europa [6]

In Europa sind vor allem Dänemark, Schottland, England und Irland Zentren höherer Windgeschwindigkeiten. Auch die Atlantikküste von Frankreich, den Beneluxstaaten und Deutschland käme als Einsatzort in Frage. Im Mittelmeerraum dagegen scheint eine Nutzung der Windenergie eher unrentabel, da die Windausbeute zu gering ist. Lediglich an der Mittelmeerküste von Frankreich oder auch auf der Insel Kreta ist ausreichend Wind vorhanden, um eine Kleinwindkraftanlage wirtschaftlich sinnvoll betreiben zu können.

3.1.3 Deutschland

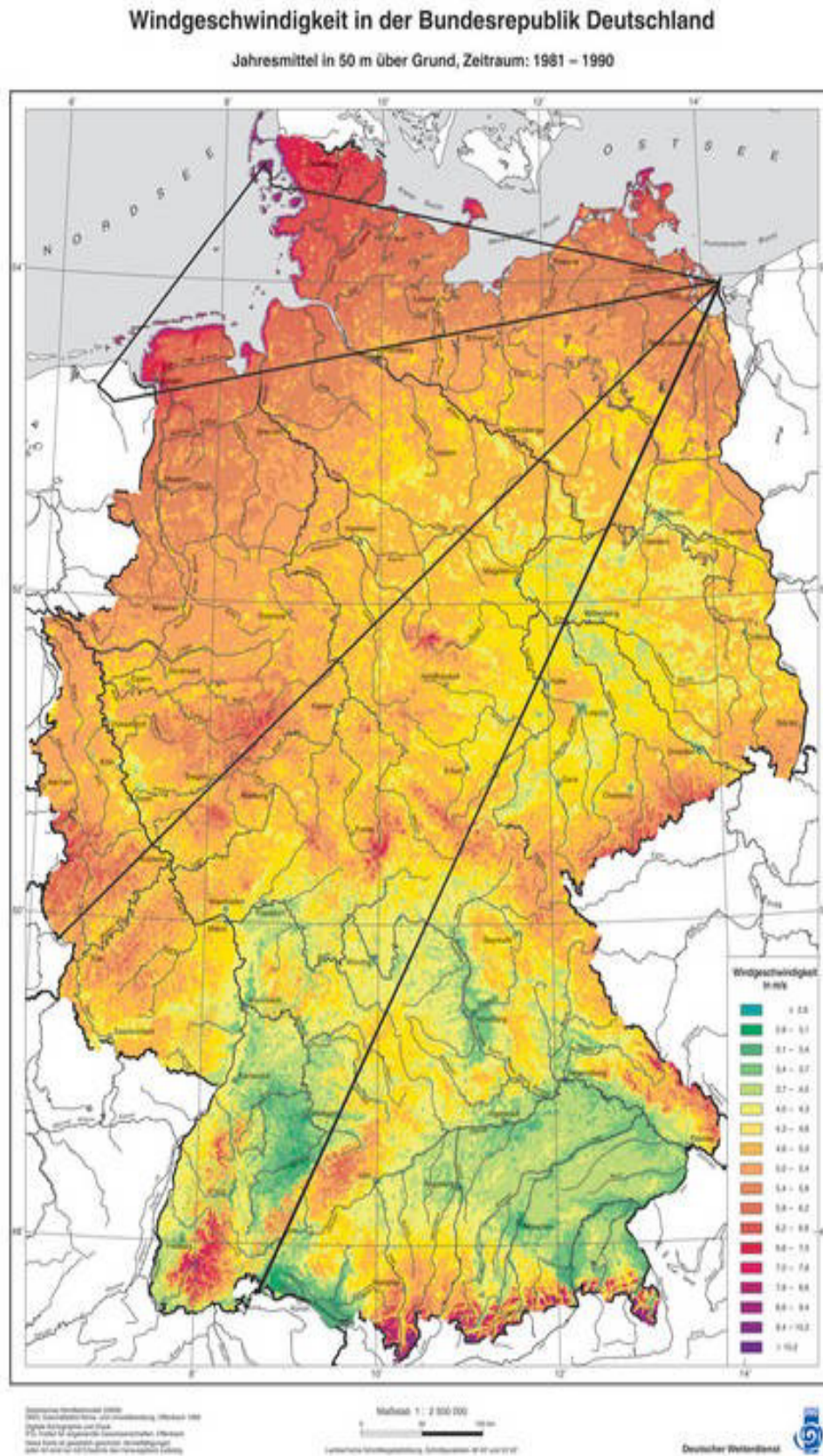


Abbildung 3-27: Windgeschwindigkeiten Deutschland [6]

Für Deutschland sieht die Windprognose allerdings deutlich schlechter aus. Einzig in den höheren Gebirgslagen und an der Nord- und Ostseeküste wäre der Einsatz von Kleinwindkraftanlagen denkbar und rentabel. Aufgrund der Offshore Kapazität in Küstennähe und die dadurch wesentlich höher zu erzielende Ausbeute bei großen Windparks werden Kleinwindkraftanlagen eher nicht zum Einsatz kommen.

3.2 Einsatzgebiete

Die verschiedenen Anwendungen für Klein-WEA unterscheiden sich in den verschiedenen Einsatzgebieten. So werden an Anlagen zur unterstützenden Stromgewinnung für Haushalte ganz andere Voraussetzungen als an Anlagen, die in abgelegenen Gebieten der Landwirtschaft bzw. der Industrie als autarke Energiequelle eingesetzt werden, gestellt.

3.2.1 Haushalte

Im privaten Bereich könnte sich der Einsatz einer Kleinwindkraftanlage in der Hinsicht lohnen, dass vor allem in entlegenen Gebieten die Möglichkeit bestünde, ein Mindestmaß an Stromversorgung zu gewährleisten. Das Problem dabei ist, dass die Windenergie nicht konstant und gleichmäßig verfügbar ist. Daher ist es unerlässlich, dass die Mehrproduktion an Energie in Batterien/Akkus gespeichert wird, um Zeiten von Windstille überbrücken zu können.

In der Vergangenheit wurde immer wieder davon gesprochen, dass diese Art der Nutzung von Wind zu teuer sei. In Zeiten steigender Energiepreise kann es jedoch wesentlich günstiger sein Kleinanlagen einzusetzen, anstatt entlegene Dörfer und Höfe über kostspielige Leitungen an das Versorgungsnetz anzuschließen.

In den Industrieländern gäbe es zudem die Möglichkeit, den produzierten Strom in die öffentlichen Versorgungsnetze einzuspeisen, so wie das auch bei der Photovoltaik Anwendung findet. Hierbei kann entweder nur der Überschussstrom, oder der komplett durch die Kleinwindkraftanlage produzierte Strom eingespeist werden.

Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz von Kleinwindkraftanlagen im privaten Bereich besteht darin, die Windenergie zu nutzen, um Vorrattanks mit Wasser aus Brunnen zu füllen. Diese Methode ist auch heute noch weit verbreitet und kommt vor allem in Nordamerika, Südafrika und Argentinien zum Einsatz.

Außerdem könnte sich gerade im Europäischen Raum eine Unterstützung der Heizungsanlagen mit Klein-WEA anbieten. Denn hier tritt der meiste und energiereichste Wind in den Herbst- und Wintermonaten auf.[15]

3.2.2 Industrie

Eine klassische Anwendung von Kleinwindkraftanlagen (Klein-WEA) in der Industrie liegt bei Niedrigenergieanlagen. So kann mit Hilfe von Klein-WEA ein Korrosionsschutz für Pipelines sicher gestellt werden. Dazu wirkt eine durch Windenergie gewonnene Ladung auf die Oberfläche der Metallröhre. Diese wirkt der Korrosion in hochreaktiven Böden entgegen. Eine Speicherung ist hierbei nicht nötig. Die Korrosion ist ein langsam fortschreitender Prozess, der über einen längeren Zeitraum abläuft. Der nach einer, in Relation zum Korrosionsprozess, kurzen Windflaute zurückkehrende Wind schützt die Pipeline von Neuem².

Eine andere verbreitete Niedrigstromanwendung ist die Aufladung von Segelbootbatterien an Yachthafen. So wird durch Klein-WEA (ca. 100...600W) der nötige Strom zum Laden der Akkumulatoren an Board der Schiffe bereitgestellt. Die Anforderungen an solche Anlagen sind eine besondere Geräuscharmheit und ein Anlaufen auch bei niedrigen Windgeschwindigkeiten.

Ein weiteres Einsatzgebiet stellt die Bereitstellung von Energien für die Beleuchtung von entlegenen Orten dar. In Kombination mit Photovoltaik-Modulen und Akkumulatoren sind eine dauerhafte Versorgung von z.B. Bojen, Gehwegbeleuchtungen, Verkehrsleitsystemen oder Notrufsäulen denkbar.

Außerdem werden Klein-WEA zur Versorgung von Telekommunikationsanlagen eingesetzt. Die Telekom- und Funkstationen befinden sich häufig an abgelegenen Orten wie z.B. Berggipfeln um ein möglichst weites Gebiet zu versorgen. Dabei kommen häufig hybride Wind- und Solarenergieanlagen zum Einsatz. Um aber eine dauerhafte Energieversorgung sicherzustellen ist eine Speicherung unerlässlich.

3.2.3 Landwirtschaft

Die klassischste Anwendung von Windenergieanlagen ist wohl das Mahlen von Getreide mit Hilfe von Windmühlen. Ein Einsatz von Klein-WEA ist auch hier denkbar. So könnte in kleinen Windmühlen das aus der Landwirtschaft anfallende Getreide gemahlen werden. Durch die Speicherbarkeit des Korns kann auf ein mahlen in Wind freien Zeiten verzichtet werden. Eine Wirtschaftlichkeit in Industrieländern ist allerdings fraglich, da die heute durchgeführten Verfahren wahrscheinlich deutlich günstiger durchgeführt werden können.

Gerade in Entwicklungsländern könnte durch den vermehrten Einsatz von Windwasserpumpen eine Bewirtschaftung von Flächen sichergestellt werden. Die Klein-WEA betreibt hierbei mechanisch eine Pumpe zur Wasserförderung.

² Vgl. World Wind Energy Association: „Kleinwindkraftanlagen und ihre Anwendungen: ein Überblick“

Denkbar ist des weiteren die Bereitstellung der notwendigen Energie zur Versorgung eines elektrischen Weidezauns mit Hilfe eines Windrads. Dabei würde mit Hilfe der Klein-WEA nebenbei eine Batterie für windschwachen Zeiten geladen. Gerade für abgelegene Weideflächen könnte dieses System einem Anschluss ans Stromnetz überlegen sein.

Ein Energie autarkes System für Bauernhöfe stellt ein weiteres Gebiet für Klein-WEA dar. So kann in Kombination mit Biomasse, Photovoltaik, Windenergie und einer geeigneten Speichertechnologie eine komplette Versorgung sicher gestellt werden[24][15].

3.3 Gegenüberstellung Anwendungen in Industrie- und Entwicklungsländern

Es gibt verschiedenste Bestrebungen zur Energieversorgung von Industrie- und Entwicklungsländern. Ein großes Potential für Klein-WEA liegt hierbei in der Dezentralisierung der Stromnetze, d.h. einer Erzeugung der Energie näher am Stromabnehmer, also in der Nähe des Menschen bzw. der Industrie. Hierbei ist aber gerade in finanzieller Hinsicht ein erheblicher Unterschied zwischen Entwicklungsländern und Industrieländern fest zu stellen.

3.3.1 Industrieländer

Im Bereich der Energieversorgung durch Windenergie in den Industrieländern geht der Trend zu immer größeren Anlagen. Der Einsatz von Klein-WEA ist weitestgehend nicht wirtschaftlich da das Stromnetz hier flächendeckend vorhanden ist. Somit kommen diese Anlagen nur in Ausnahmen wie z.B. einer Wetterstation auf einem Berggipfel oder einer Telekommunikationseinrichtungen an abgelegenen Orten zum Einsatz.

Dennoch gibt es auch hier in Anbetracht der doch erheblichen Leitungsverluste in den Stromnetzen Bemühungen zu einer dezentralen Stromversorgung. So ist ein Einsatz von Klein-WEA in abgelegenen Gebieten aus energetischer Sicht häufig als sinnvoll zu betrachten. Da hier in Industrieländern aber meist ein Anschluss an das Stromnetz besteht steht der durch eine Klein-WEA gewonnene Strom in Konkurrenz mit dem aus Großwindkraftanlagen oder Großkraftwerken. Hierbei ist für den Verbraucher eindeutig die durch den Stromversorger bereitgestellte Energie die kostengünstigere Alternative.

Ein anderes Konzept für den Einsatz von Klein-WEA könnte im Zusammenhang von Druckluftspeicherung bestehen. So könnte eine Klein-WEA direkt mechanisch einen Kompressor betreiben. Hierbei würden die sonst anfallenden Wandlungsverluste

beim Erzeugen des elektrischen Stroms eingespart. Die vom Kompressor erzeugte Druckluft kann in einem zentralen Luftspeicher gesammelt werden und weiter verarbeitet werden. So wäre eine Bedarfsgerechte Einspeisung von Strom möglich. Genauso könnten einzelne Lufttanks als mobile Energieversorgung zum Beispiel zur Versorgung von Druckluftgetriebenem Werkzeug oder auch in Verbindung mit einem Druckluftmotor und einem Generator als kleines Stromaggregat eingesetzt werden. Selbst eine Versorgung von Autos mit Druckluft erscheint hier als ein in ferner Zukunft evtl. realisierbares Konzept.

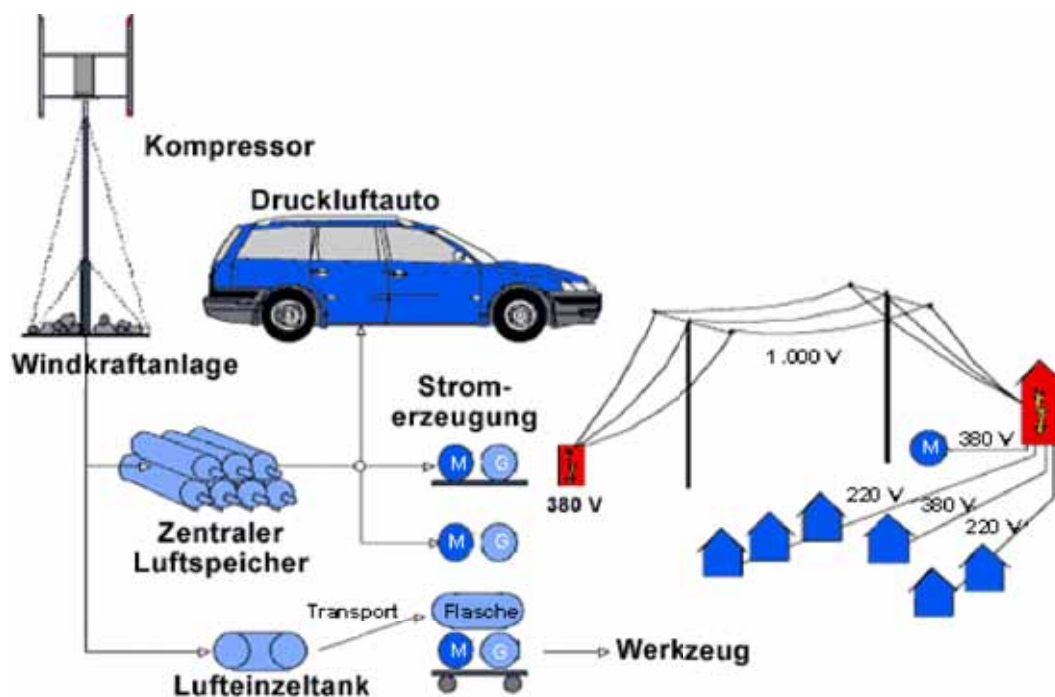


Abbildung 3-28: Konzept Luftdruckspeicherung [18]

3.3.2 Entwicklungsländer

In Entwicklungsländern stellt sich die Situation meist anders dar. Stromnetze sind zum Teil schlecht ausgebaut bzw. nicht existent. Dadurch ergibt sich ein großes Potential gerade in der dezentralen Stromversorgung mittels Klein-WEA. Auch die Anwendung zur Bereitstellung der notwendigen Pumparbeit zur Bewässerung von Feldern stellt in Entwicklungsländern eine große Herausforderung da.

Möglich scheint auch die Energiegewinnung für eine solare Meerwasserentsalzungsanlage. Dabei würden sämtliche Pumparbeiten durch die Klein-WEA bereitgestellt. Bei der zur Entsalzung notwendigen thermischen Energie scheint es hingegen sinnvoller, solare Komponenten zu verwenden.

Auch in Krisensituationen, von denen häufig insbesondere Entwicklungsländer betroffen sind, können Klein-WEA zum Einsatz kommen. Ein mögliches Konzept wäre die Stromversorgung in Kombination mit einem Dieselaggregat (siehe

Abbildung 3-29). Dieses System wäre durch die Bauweise in Containerform schnell an nahezu allen Standorten, an denen die Gegebenheiten für eine Stromversorgung mit Hilfe von Windenergie gegeben sind, einsetzbar. Zusätzlich sorgen Solarzellen auch in windschwachen Zeiten für eine regenerative Energieversorgung. Eine Speicherung der so erzeugten Energie erfolgt hier in Batterien als preiswerte und Platz sparende Energiespeicher. Denkbar wäre hier in Zukunft auch der Einsatz von Brennstoffzellen oder Druckluftspeichern zur Energiespeicherung[29][15].

- 1 Turm
- 2 Generator
- 3 Rotor
- 4 Blatt
- 5 Steuerung
- 6 Batterie
- 7 Wechselrichter
- 8 Transformator
- 9 Container 20"
- 10 Fundament
- 11 Notstromaggregat
- 12 Solarpaneel/Solar
- 13 Solarsteuerung
- 14 Lüftung
- 15 Licht
- 16 Leitung

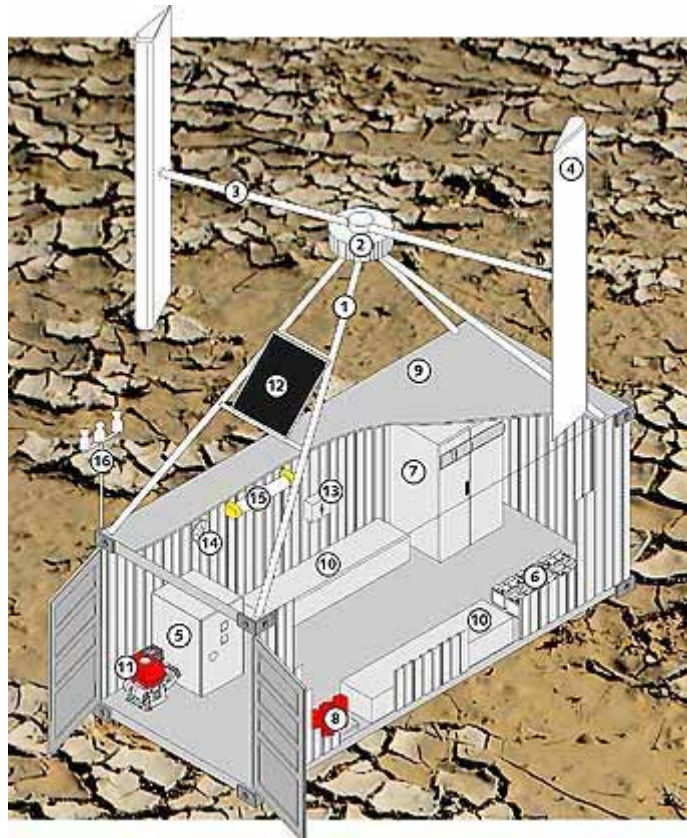


Abbildung 3-29: Containerlösung [18]

3.4 Bewertung der Anwendungsmöglichkeiten

Nun soll eine Eignung der Anwendung von Klein-WEA als Inselösung, zur Vernetzung und als Windpark diskutiert werden.

3.4.1 Inselösung

Unter einer Inselösung versteht man die autarke, also vom Stromnetz unabhängige, Stromversorgung. Der alleinige Einsatz von Klein-WEA ist für eine dauerhafte und kontinuierliche Stromversorgung nur in sehr windreichen Gegenden und auch hier nur in Verbindung mit einem dem Verbrauch entsprechenden Energiespeicher zu realisieren. Dabei muss für den Fall einer windarmen Zeit eine weitere Energieversorgung gewährleistet sein.

Ein größeres Potential für Klein-WEA ist hingegen in der Kombination mit anderen Energiequellen, also in hybriden Systemen, zu sehen. Durch eine Kombination z.B. mit Solarzellen (vgl. Abbildung 3-30) kann auf kleinere Energiespeicher zurückgegriffen werden, da in windschwachen Zeiten meist von einer erhöhten Sonneneinstrahlung und an bewölkten Tagen von besseren Bedingungen für die Nutzung der Windenergie auszugehen ist.

- A) Spannungsregelung
- B) Heizwiderstand
- C) Wechselrichter
- D) Batterie
- E) Beleuchtung
- F) Wasserpumpe
- G) Elektrische Geräte
220V
- H) Windenergie
- I) Solarenergie
- K) Laderegler

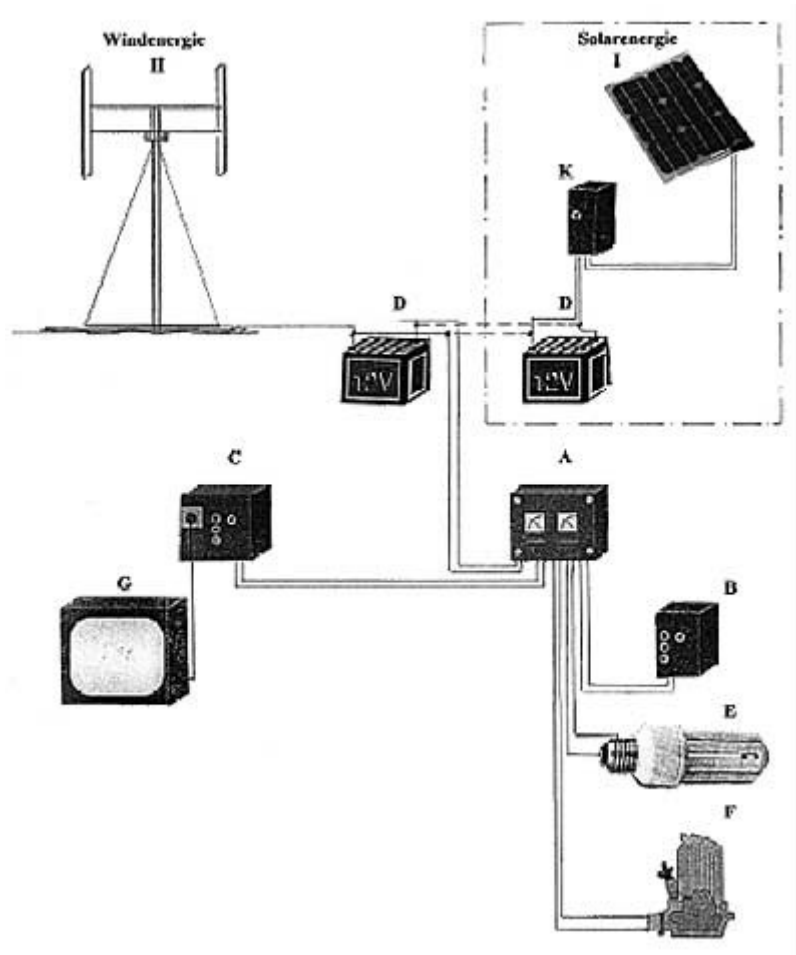


Abbildung 3-30: Insellösung [18]

3.4.2 Vernetzung

Die Netzeinspeisung mit kleinen Anlagen hat sich erst in den letzten Jahren entwickelt. Bisher scheiterte diese Variante an der notwendigen Technik. Die eingesetzten Solarwechselrichter haben sich durch die ständigen und schnellen Lastwechsel der Windanlage als wenig sinnvoll erwiesen. Eine PV-Anlage hat ein genau definiertes Kennfeld mit nach oben begrenzten Strömen. Bei einer Kleinwindkraftanlage ist es bislang kaum gelungen, sie in diesem Kennfeld arbeiten zu lassen, viele der Wechselrichter brannten bei plötzlich aufgetretenen starken Böen durch.

Erst in den letzten Jahren haben sich speziell auf die Leistungscharakteristik einer Kleinwindkraftanlage abgestimmte Netzwechselrichter etabliert, die technisch ausgereift sind und sehr zuverlässig den Strom einspeisen. Durch eine Vergütung in Deutschland von derzeit zirka 8 Cent/kWh, den hohen technischen Anforderungen zur Netzeinspeisung und den resultierenden Nachteilen für die Stabilität des Stromnetzes ist der Einsatz von Klein-WEA zur Einspeisung als negativ anzusehen. Aus ideologischen Gesichtspunkten und Gründen der Dezentralisierung des Netzes ist hingegen der Anschluss zu befürworten [28].

3.4.3 Windpark



Abbildung 3-31: Vergleich Windpark [20]

Auf den ersten Blick erscheint der Einsatz von Klein-WEA in Windparks als nicht sinnvoll. Denn besonders hier stehen die Anlagen in Konkurrenz mit den Großanlagen der Megawattklasse. Wie in Abbildung 3-31 zu sehen ist können viele kleine WEA durch wenige große ersetzt werden. Dabei wird neben dem Flächengewinn zudem mehr Energie von den größeren Anlagen produziert. Beim ersetzen von Klein-WEA durch Großanlagen gilt grob 50% weniger Anlagen entsprechen 50% mehr Ertrag [20]. Auch in finanzieller Hinsicht sind die größeren



Anlagen durch die wesentlich geringere Anzahl der Anlagen den kleineren eindeutig überlegen.

Eine Nische für Klein-WEA könnte im Bereich der Leichtwindanlagen bestehen. Der Aufbau eines Windparks mit Anlagen, die bereits bei leichten Winden viel Energie erzeugen, könnte in relativ windschwachen Regionen durchaus sinnvoll sein. Des Weiteren könnte auch ein Windpark mit Klein-WEA an schwer zugänglichen Orten, wie zum Beispiel Berggipfeln, in Betracht gezogen werden. Die kleineren Bauteile der Anlagen könnten so auch an abgelegenen Hängen ohne schweres Gerät bzw. mit Hilfe eines Hubschraubers errichtet werden.

4 Stand der Technik

4.1 Definition Kleinwindenergieanlagen (Klein-WEA)

In der IEC-Norm 61400-2:2006 ist die Grenze zwischen kleinen und großen Windturbinen definiert. Laut dieser Norm ist eine Anlage mit weniger als 200 m² Rotorfläche und einer spezifischen Leistung von 350 W/m² als Klein-WEA eingestuft. Die maximale Leistung einer Klein-WEA beträgt laut dieser Norm somit 70 kW (200m² * 350 W/m²).

4.2 Anwendungsbereiche

Die meisten Klein-WEA sind auf autarken Betrieb ausgerichtet, z.B. in abgelegenen Siedlungen und Bauernhöfen. Dabei werden die Klein-WEA meist im Inselbetrieb genutzt und nur vereinzelt (meist ab 10 kW) für die Netzeinspeisung ausgelegt. Über kleine Windturbinen („Microwindturbinen“) können z.B. Wohnmobile oder Segelyachten mit Leistungen von 100 bis 500 W versorgt werden. Der Generator wird getriebeelos direkt angetrieben. Bei den meisten Anwendungen dieser Art ist ein Getriebe eine Seltenheit (siehe Tabelle). Ein noch weitaus gebräuchlicheres Klein-WEA-Konzept ist der Direktantrieb eines permanenterregten Synchrongenerators bei einer variablen Drehzahl. Die Leistung solcher Klein-WEA liegt im Bereich von 1 bis 20 kW. Der daraus gewonnene Dreiphasenstrom wird entweder gleichgerichtet (z.B. für Batterieeinspeisung) oder über einen Wechselrichter direkt in das Netz eingespeist.

Klein-WEA werden auch öfter in Kombination mit anderen Energieerzeugungsanlagen ausgelegt und betrieben.



Abbildung 4-32: Microwindturbine [33]

4.2.1 Kombianlage aus Wind/Solar

Dabei handelt es sich meist um eine Kombination aus einer Klein-WEA und einem PV-Modul. Dadurch wird die Versorgungssicherheit erhöht und eventuelle Windflauten oder Bewölkungen können ausgeglichen werden.

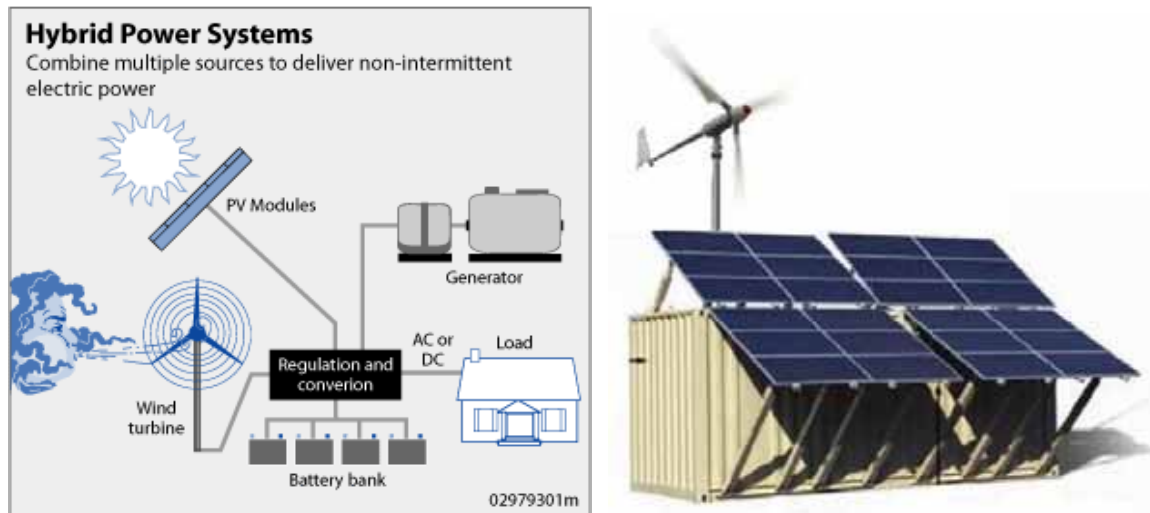


Abbildung 4-33: Solar-Wind-Hybrid System (links: Arbeitsprinzip, rechts: Beispiel) [23]

4.2.2 Kombianlage aus Windkraft-Anlage und Heizpatrone

Hierbei handelt es sich um die Kombination einer Windkraft-Anlage und einer Heizpatrone. Mit dieser Methode der regenerativen Energieerzeugung kann die eigene Heizungsanlage unterstützt werden oder auch das benötigte Warmwasser erwärmt werden. Dadurch ist eine erhebliche Einsparung an Brennstoffkosten (z.B. Heizöl) möglich. Außerdem werden klimaschädliche Treibhausgase eingespart.



Abbildung 4-34: Savonius-Rotor 3.000 kWh Strom zur Heizungsunterstützung [3]

4.3 Läuferarten

Es gibt Windturbinen mit horizontaler Achse (horizontal-axis wind turbines, HAWT) und vertikaler Achse (vertical-axis wind turbines, VAWT). Die konventionellen

Windturbinen sind die Luv- und Leeläufer (HAWT). Die VAWT sind unterteilt in Auftriebsläufer (Darrieus- und H-Rotoren) und Widerstandsläufer (Savonius - Rotoren).

4.3.1 Savonius-Rotor

Der Leistungsbeiwert eines Savonius-Rotors liegt bei 23%.

Einsatzgebiet sind spezielle Anwendungen, die eine geringe Leistung und ein hohes Drehmoment erfordern. Das Anlaufen der Anlage findet bei niedrigen Windgeschwindigkeiten statt.

Anwendung / Verbreitung:

Wird heute vorwiegend zur Messung von Windstärken eingesetzt und als Anlaufhilfe in Kombination mit Darrieus-Rotoren verwendet.

Vorteile:

Kostengünstig in der Fertigung



Abbildung 4-35: Savonius [44]

4.3.2 Darrieus-Rotor

Der Darrieus-Rotor (Vertikaler Auftriebsläufer) besitzt zwei bis drei senkrecht gekrümmte Rotorblätter und hat einen max. Leistungsbeiwert von 37%.

Anwendung / Verbreitung:

Wird meist in Kombination mit Savonius-Rotoren als Anlaufhilfe verwendet, da die Darrieus-Rotoren erst bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s selbstständig anlaufen können. In Kalifornien stehen zahlreiche Windparks mit Darrieus-Rotoren.

Vorteile:

Windrichtungsnachführung ist nicht erforderlich

Relativ einfache Montage, da sich der Generator bodennah befindet

Nachteile:

Fehlende Möglichkeit die Leistung bzw. die Drehzahl zu regulieren

Schwingungsprobleme aufgrund der Rotorspannung und hohen Drehmomentschwankungen



Abbildung 4-36: H-Darrieus-Rotor [35]



Abbildung 4-37: Darrieus-Rotor [32]

4.3.3 Luv- und Leeläufer

Der max. Leistungsbeiwert eines Luv- und Leeläufers liegt bei 59%.

Anwendung / Verbreitung:

Wird vorwiegend zur Stromerzeugung und zur Bereitstellung von Pumpleistung verwendet. Luv- und Leeläufer sind relativ weit verbreitet und haben sich gegenüber den Darrieus-Rotoren durchgesetzt.

Vorteile:

Möglichkeit eine passive Windrichtungsnachführung einzurichten (bis ca. 15 Meter Durchmesser / 30 KW Nennleistung)

Nachteile:

Große Lärmemissionen und Leistungsschwankungen



Abbildung 4-38: Lee-Läufer [25]



Abbildung 4-39: Luv-Läufer [25]

4.3.4 Vergleich HAWT und VAWT

4.3.4.1 Vor- und Nachteile von HAWT

Vorteile:

Das geringe Gewicht ermöglicht eine leichte Bauweise, außerdem bietet sich die Möglichkeit einer passiven Windrichtungsnachführung an. Da HAWT als Massenprodukt hergestellt werden sind sie zum einen kostengünstig und in verschiedenen Variationen erhältlich (siehe Anhang I: Tabelle Kleinwindanlagen Übersicht).

Nachteile:

Ein nennenswerter Nachteil sind die großen Lärmemissionen, die den Einsatz in bebauten Wohngebieten erschweren. Außerdem sind Leistungsschwankungen je nach Windstärke und Bautyp zu erwarten, da bei hohen Windgeschwindigkeiten (ab 25 m/s) die Rotorblätter auf Leerlauf geschaltet werden. Dies ist ein Schutzmechanismus um der mechanischen Überlastung der Rotoren vorzubeugen.

4.3.4.2 Vor- und Nachteile von VAWT

Vorteile:

Die Möglichkeit den Generator bodennah zu installieren erleichtert den Aufbau von VAWT, außerdem ist eine Windrichtungsnachführung nicht erforderlich. Weitere positive Aspekte sind eine einfache Konstruktion und eine leise Betriebslautstärke. Daher sind diese Windkraftanlagen auch für den Einsatz in bebauten Gebieten geeignet.

Nachteile:

Ein relativ hohes Gewicht erschwert den Transport und die Montage. Außerdem ist der Wirkungsgrad im Durchschnitt der verschiedenen Anlagentypen geringer und da es sich zumeist nicht um Serienprodukte handelt ist der Preis wesentlich höher.

4.4 Marktanalyse

Die Technologie von modernen Kleinwindkraftwerken entwickelte sich größtenteils in Europa, dabei sind Deutschland, Großbritannien, Spanien, Holland und die Schweiz Marktführer.

z.B. in Deutschland : Conergy AG, Landmark Alternative Energien & Consulting, MARC Power Systems GmbH, superwind GmbH und Aircon GmbH & CO.KG.

In den USA ist ebenfalls ein wachsendes Interesse an Windkraftwerken zu registrieren. Firmen wie z. B. Abundant RE, Bergey Windpower, Southwest Windpower, Wind Turbine Industries spielen eine große Rolle in diesem Gebiet[30].

4.5 Energiespeicher im Überblick

Wenn Erzeugung und Verbrauch von elektrischem Strom zeitlich bzw. örtlich nicht zusammenfallen, wird ein Speicher benötigt. Einer der ersten Energiespeicher war die „Volta'sche Säule“, die um 1800 vom italienischen Physiker Alessandro Volta erfunden wurde.

Von chemisch, elektrochemisch, elektromagnetisch, mechanisch bis zu thermisch betriebenen stehen heutzutage eine Reihe von Energiespeichern zur Verfügung. Je nach Eigenschaft kommen sie in unterschiedlichen Bereichen zum Einsatz.

4.5.1 Chemische Energiespeicher

4.5.1.1 Konventionelle chem. Energiespeicher: fossile Energieträger

Fossile Energieträger besitzen eine unbegrenzte Speicherdauer und verfügen über eine hohe Energiedichte. Der Nachteil dieser Energieträger ist das entstehende CO₂ bei der Verbrennung und das es sich hierbei um einen endlichen Energieträger handelt.

4.5.1.2 Thermochemische Wärmespeicher

Stoffe, die in der Lage sind, ein Arbeitsmittel reversibel zu adsorbieren. Die Wärmespeicherung erfolgt bei hohen Energiedichten und die Anzahl der Zyklen ist im Prinzip unbegrenzt. (z.B. Zeolithspeicher).

4.5.2 Elektrochemische Energiespeicher

4.5.2.1 Akkumulatoren

Akkumulatoren liefern eine hohe Leistung und sind mobil einsetzbar. Die Investitionskosten sind bei dieser Art von Energiespeicher sehr hoch. Außerdem besitzen Sie eine geringe Energiedichte und benötigen mehrere Stunden um sich aufzuladen.

4.5.2.2 Doppelschichtkondensatoren

Doppelschichtkondensatoren werden in der Robotik, Flugzeugtechnik und Fahrzeugtechnik (Hybridfahrzeug) verwendet. Vorteile von Doppelschichtkondensatoren sind eine lange Lebensdauer, schnelle Aufladung und Einsatzfähigkeit (überall einsatzfähig, wo kurzzeitig viel Energie gespeichert und wieder abgegeben werden muss).

4.5.2.3 reversible Brennstoffzellen

Vorteile solcher Energiespeicher sind die hohe Stromdichte, hohe Leistungsdichte und das flexible Verhalten bei Wechsellast. Reversible Brennstoffzellen sind sehr teuer (Edelmetallkatalysator, meist Platin) und stellen hohe Anforderungen an die Materialien (hohe Temperaturen).

4.5.3 Elektromagnetische Energiespeicher

Hier wird die Technologie des Supraleiters als magnetische Energiespeicher erforscht.

Durch den Einsatz von Supraleitern fließt dabei der gespeicherte Strom ohne Verluste. Kommerziell verfügbare Speichersysteme basieren auf Niedertemperatur-Supraleitern, welche eine Heliumkühlung benötigen, welche die hohen Kosten verursachen. Aufgrund kurzer Ansprech- und Entladezeiten werden sie hauptsächlich zur Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung und zur Kompensation fluktuierender Lasten eingesetzt.

4.5.4 Mechanische Energiespeicher

4.5.4.1 Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke zeichnen sich durch eine lange Lebensdauer aus und verfügen über einen hohen Nutzungsgrad (über 85%). Die Investitionskosten solcher Kraftwerke sind hoch, außerdem ist die Verfügbarkeit eingeschränkt (geeignete Geländeformationen).

4.5.4.2 Mechanische Schwungmassenspeicher

Nennenswerte Vorteile wären die hohe Entladeleistung, sowie kurze Zugriffs- und Entladezeiten. Die Speicherverluste bei solchen Systemen und die daraus resultierenden Kosten sind sehr hoch.

4.5.4.3 Druckluftspeicher

Zunächst wird mit Hilfe eines Kompressors Umgebungsluft in einen Druckluftspeicher gepumpt. Diese Speicher können, je nach zu speichernder Energiemenge, als kleiner Stahl Speicher im m³-Bereich oder in Form von großen unterirdischen Kavernen ausgeführt sein. Die Größe des Speichers bestimmt auch die Energierückgewinnung. Bei Kleinanlagen werden meist direkt Druckluftmotoren angetrieben, welche wiederum falls notwendig einen Generator zur elektrischen Stromgewinnung antreiben. In Großanlagen wird hingegen die gespeicherte Energie zur Unterstützung in Gasturbinen verwendet. Dies ist notwendig, da eine Expansion der Luft ohne Wärmezufuhr zu Vereisungen an der Turbine führen würde.

4.5.5 Thermische Energiespeicher

4.5.5.1 Sensible Wärmespeicher

Sensible Wärmespeicher, z.B. Warmwasserspeicher und Pufferspeicher, verändern beim Lade- und Entladevorgang ihre Temperatur. Der Energieinhalt wird durch das Füllmedium, die Größe des Speichers und durch die mögliche Temperaturdifferenz bestimmt.

4.5.5.2 Latentwärmespeicher

Hierbei handelt es sich um Wärmeträger aus Phasenwechselmaterialien. Beispiele für diese Materialien sind Paraffine und Salzhydrate. Vorteile des Akkus, wie die hohe Speicherkapazität und der geringe Raumbedarf, stehen den hohen Investitionskosten im Niedertemperaturbereich gegenüber.

5 Anwendungsbeispiel: hybride Meerwasserentsalzung

Die zweite Aufgabe nach der Recherche zu den Grundlagen von Kleinwindkraftanlagen bestand darin, eine konkrete Anwendung für eine Kleinwindkraftanlage zu finden. Die Überlegungen dazu waren erst einmal, die verschiedenen Einsatzgebiete der Kleinwindkraftanlagen zu charakterisieren. Aus ideologischen Gründen haben wir uns deshalb darauf geeinigt, dass wir eine gewisse Grundversorgung und einen bestimmten Lebensstandard durch den Einsatz des Windrades erreichen oder auch verbessern möchten. Hierfür kommen demnach ausschließlich Entwicklungs- und Schwellenländer in Betracht, da den Menschen in diesen Ländern oftmals der Zugang zu einer lebensnotwendigen Grundversorgung verwehrt bleibt. Nach weiterer Recherchearbeit fanden wir zum Thema „Grundversorgung durch Windkraft“ sehr viele Projekte, bei denen die Windkraft zur Elektrifizierung von Dörfern verwendet wurde. Da es auf diesem Gebiet schon zahlreiche Studien gab, überlegten wir weiter, was denn zum Thema Trinkwasser in Entwicklungs- und Schwellenländer zu finden ist. Auf diesem Gebiet fanden wir lediglich den Einsatz von „Windmills“ als reine Pumpenanlage um Trinkwasser aus Brunnen zu fördern und zu verteilen. Somit kam uns die Idee, ob es möglich wäre, eine Windkraftanlage zur Entsalzung von Meer- oder Brackwasser zu verwenden und parallel dazu elektrischen Strom zu erzeugen, der eine gewisse Elektrifizierung möglich macht. Dadurch würden die wichtigsten Kriterien einer Grundversorgung erfüllt und den Menschen würde eine unbeschwertere Lebensweise ermöglicht.

Aufgrund der aktuellen Wasserknappheit in Afrika erschien es uns als beste und notwendigste Anwendung, ein Beispiel zu finden, wie der Bevölkerung dort aus dieser misslichen Situation geholfen werden kann.

5.1 Meerwasserentsalzungsanlagen

Grundsätzlich können sämtliche Verfahren zur Meerwasserentsalzung in Systeme mit und ohne Phasenwechsel eingeteilt werden. Ihr momentaner Verbreitungsgrad ist relativ ausgeglichen. Die Qualität des produzierten Trinkwassers ist jedoch bei den Verfahren mit Phasenwechsel besser. Verfahren ohne Phasenwechsel sind die Nanofiltration, die Umkehrosmose und die Elektrodialyse. Bei der Nanofiltration und der Umkehrosmose wird die Sole und das entsalzte Produktwasser durch eine semipermeable Membran getrennt. Dadurch erhöht sich der Druck auf der Soleseite über den osmotischen Druck. Der Prozess der Osmose kehrt sich um und die Wassermoleküle wandern auf die Produktseite. Bei der Nanofiltration können allerdings nur Salz-moleküle oberhalb einer Molmasse von 100 kg/kmol abgetrennt werden. Bei der Elektrodialyse werden mehrere, nebeneinander angeordnete

Kammern von Membranen getrennt, die jeweils nur Kationen oder Anionen durchlässig sind. An den beiden außen liegenden Kammern sind Elektroden angebracht, wodurch sich ein elektrisches Feld aufbaut. Durch das elektrische Feld wandern negativ geladene Salzionen durch die Anionenaustauschermembran Richtung Katode, und die positiv geladenen folglich in die entgegengesetzte Richtung. Somit kann in jeder zweiten Kammer Produktwasser mit erniedrigtem Salzgehalt entnommen werden. Die Sole in den anderen Kammern kann als Abwasser ins Meer zurückgeführt werden.

Entsalzungsverfahren mit Phasenwechsel beruhen alle auf einem ähnlichen Prinzip, nur das die jeweilige Umsetzung verfahrenstechnisch etwas unterschiedlich ist. Das System besteht aus mehreren Stufen, wobei die salzhaltige Sole immer von der ersten bis zur letzten Stufe durch das System geführt wird. Dabei wird ein Teil durch Zufuhr von Wärme verdampft. Der Dampf wird dann kondensiert und als Süßwasser gewonnen, die Sole in der nächsten Stufe erneut verdampft. Dabei steigt der Salzgehalt der Sole von Stufe zu Stufe an. Die abgegebene Wärme des Dampfes wird zur erneuten Vorwärmung der salzhaltigen Sole verwendet. Am Ende des Vorgangs wird die Sole ins Meer zurückgeführt und das gewonnene Süßwasser in einem Vorratstank gespeichert.

5.1.1 Meerwasserentsalzung durch mehrstufige Verdunstung

Der Unterschied zwischen den herkömmlichen Verfahren und der von uns bevorzugten mehrstufigen Verdunstung liegt darin, dass bei allen anderen Verdunstungsverfahren die Sole von solarthermischen Kollektoren erwärmt wird. Bei der mehrstufigen Verdunstung wird im Gegensatz dazu die Luft erwärmt. Außerdem wird jeder Verdunstungsstufe Sole mit der gleichen Salzkonzentration zugeführt. Diese ist in einem Solebehälter vorgelagert, um zu garantieren, dass der Salzgehalt relativ konstant bleibt. Zudem wird die Sole vor Erreichen der Befeuchter durch die Restwärme des Kondensators vorgewärmt und erst danach auf die einzelnen Verdunstungsbefeuchter verteilt. Durch die stufenweise Erhitzung und Befeuchtung der Luft steigt ihr Wassergehalt zunehmend an. Nachdem die Luft die letzte Stufe durchlaufen hat wird sie durch zwei Kondensatoren soweit entlang der Sättigungslinie abgekühlt, bis Kondensat ausfällt, welches als Produktwasser in einen Destillattank geleitet werden kann. Die dabei abgegebene Wärme wird erneut zur Vorwärmung der Sole verwendet und der Kreislauf beginnt somit von Neuem.

Die mehrstufige Meerwasserverdunstung bietet abgesehen vom modularen Aufbau weitere Vorteile, die uns bestärkt haben, dieses System für unsere Anwendung heranzuziehen. Durch die stufenweise Erhitzung und Befeuchtung der Luft ist eine große Feuchtedifferenz Δx möglich, die den Vorteil hat, dass der Luftmassenstrom

relativ gering gehalten werden kann. Dadurch wird weniger Energie gebraucht und die Rohrquerschnitte können kleiner gehalten werden. Außerdem sind die Prozesstemperaturen insgesamt nicht so hoch wie bei anderen Verdunstungsverfahren (max. 60°C). Ein weiterer wesentlicher Vorteil ist die geringere Korrosion. Dadurch das Luft anstatt der Sole durch den Sonnenkollektor erwärmt wird beschränken sich Korrosion- und Verkrustungsprobleme auf die Befeuchter, die Flüssigkeitsseite des Kondensators und den Solebehälter. Dies vermindert Reparaturen und auch Wartungskosten der Anlage.

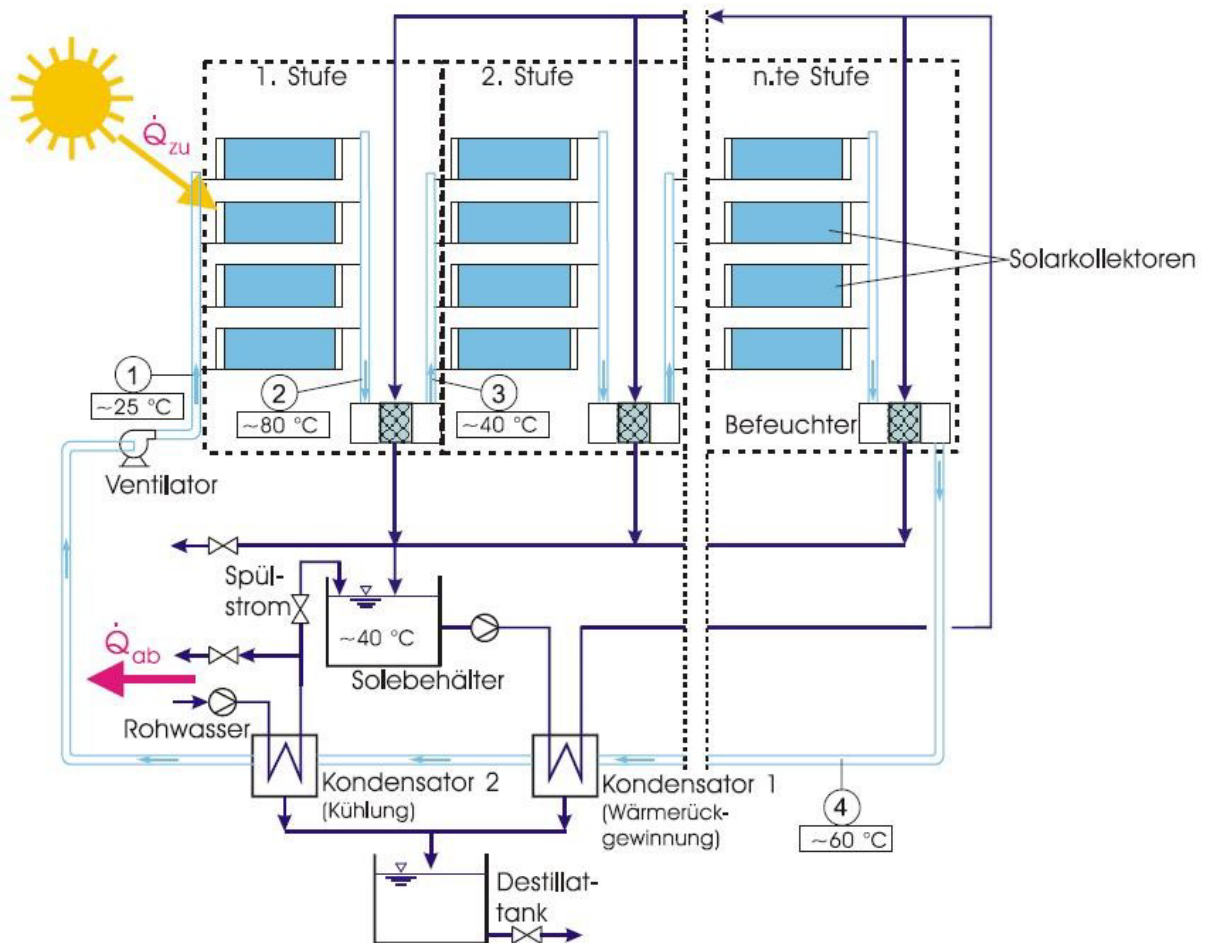


Abbildung 5-40: Aufbau der solaren Meerwasserentsalzungsanlage [4]

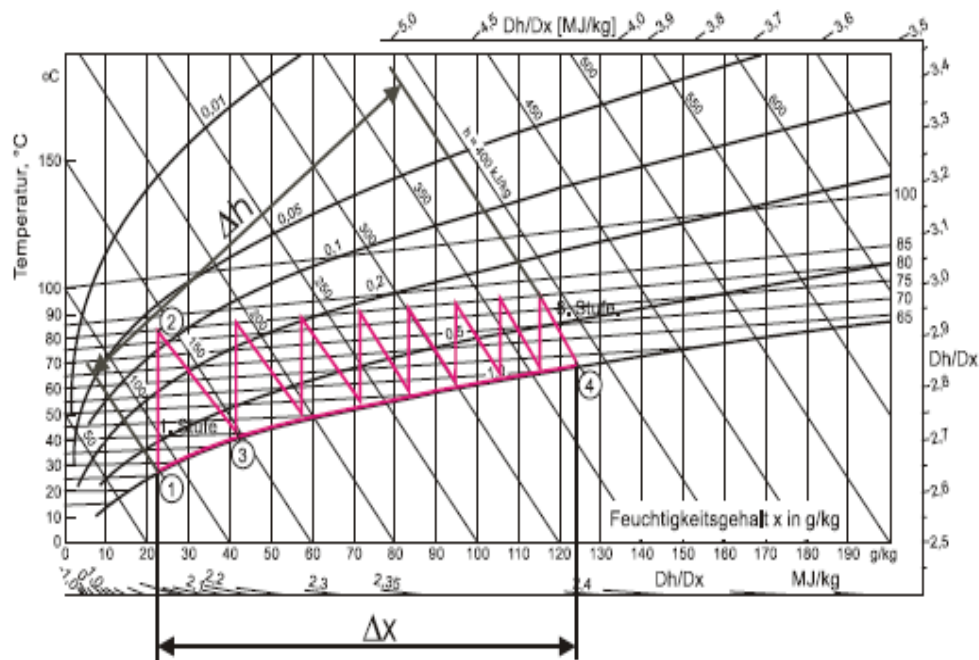


Abbildung 5-41: Mollier h-x-Diagramm [4]

5.1.2 Technische Daten der Referenzanlage

Stufenzahl, N	4
Gesamtkollektorfläche, $A_{K_{\text{ges}}}$	180 m ² (72 Einzelkollektoren)
Kollektorlänge, L_K	2,5 m
Kollektor-Typ	SOLDES-PC
Normluftmassenstrom, $\dot{m}_{LN}$	1000 kg/h
Luftseitige Wärmeübertragungsfläche im Kondensator 1 (Wärmerückgewinnung), A_{KN1}	125 m ²
Luftseitige Wärmeübertragungsfläche im Kondensator 2 (Kühlung), A_{KN2}	125 m ²
Volumen Solebehälter, $V_{T,S}$	0,1 m ³

Abbildung 5-42: Daten der Referenzanlage [4]

Bei einer Anlage dieser Größe ergibt sich eine produzierte Trinkwassermenge von ca. 500 l/d. Dazu ist zu sagen, dass die solare Einstrahlung jedoch mit 600 W/m² angenommen wurde. Dem Standort nach ist jedoch eine Einstrahlung von bis zu 1200 W/m² verfügbar. Daraus ist ersichtlich, dass sich etwas mehr Trinkwasser gewinnen lässt als in der berechneten Anlage angenommen wurde. Auch der Solebehälter sollte etwas größer dimensioniert werden, um mögliche Schwankungen ausgleichen zu können.

Detailliertere Betrachtungen der Verdunstungsanlage sind aus zeitlichen Gründen jedoch nicht mehr möglich gewesen, da die Hauptaufgabe unserer Projektgruppe darin bestand, eine geeignete Anwendung für eine Kleinwindkraftanlage zu finden

und zu erläutern. Die exakte Wahl und Auslegung des Trinkwassergewinnungssystems könnte möglicherweise einer auf uns folgenden Projektgruppe als Aufgabe gestellt werden. Die weitere Herangehensweise war vielmehr die sichere Bereitstellung des benötigten elektrischen Leistungsbedarfs von 2,8 kW für die Referenzanlage durch eine Klein-WEA der Anlage.

5.2 Standortwahl/Gegebenheiten

Zur Wahl des Standorts wurden verschiedenste Gründe diskutiert. Zunächst war die Wahl eines Entwicklungslandes als Standort aus ideologischen Gründen in der Projektgruppe ein wichtiger Faktor. Zudem waren durch die Anwendung der hybriden Meerwasserentsalzung Anforderungen an den Standort gestellt. Als erstes wurde so nach Entwicklungsländern in Küstennähe gesucht. In diesen ist die Nähe zum Ausgangsprodukt, dem Meerwasser, gegeben. Außerdem ist für die Energiebereitstellung mittels Windrad ein Standort in Küstennähe ebenfalls von Vorteil da hier größere Windausbeuten als im Binnenland zu erwarten sind.

Für die solare Meerwasserentsalzung spielt die Sonneneinstrahlung eine ebenfalls wichtige Rolle, so dass ein Band zwischen den Breitengraden von 30°S und 30°N als näher zu betrachtende Fläche gewählt wurde. Durch diese Einschränkungen und dem trivialen Grund, dass eine Trinkwasserversorgung durch Meerwasserentsalzung nur an Standorten mit Wasserknappheit Sinn macht filterte sich schnell der afrikanische Kontinent als möglicher Standort heraus.

Nun ergab sich die Schwierigkeit, dass häufig an vielen Standorten bei Wind Bewölkung und bei Sonnenschein kein Wind herrschen. So zeichnete sich letztendlich der Senegal als ein prädestinierter Standort für eine hybride Meerwasserentsalzung mit Solar- und Windenergie ab. Im Senegal sind während der Trockenzeit (November bis Mai) Windgeschwindigkeiten von durchschnittlich 11,43kts oder ca. 6m/s für den Standort Dakar³ zu erwarten.

5.3 Wahl des Windrads

Zur Bereitstellung der benötigten elektrischen Leistung für den Betrieb der solaren Meerwasserentsalzungsanlage wurden verschiedenste Klein-WEA zwischen 5 kW_p und 20 kW_p⁴ untersucht. Da die überschüssig erzeugte Energie zum Einen gespeichert und zum Anderen auch der Bevölkerung zur Verfügung stehen soll, wurden Pumpwindkraftanlagen (so genannte „Westernmills“) zunächst angedacht.

³Messdaten vom Flughafen Dakar in 18m Höhe [31] (entspricht der späteren Nabenhöhe)

⁴ W_p; Watt peak: Einheit für die maximale Leistung einer Windkraftanlage

Die Idee bestand darin die nötige Pumpenergie direkt und mechanisch der Entsalzungsanlage zuzuführen bzw. bei einem Überschuss an Windenergie Wasser in ein höher gelegenes Reservoir zu pumpen und mittels einer kleinen Peltonturbine elektrische Energie zurück zu gewinnen. Aufgrund der selten gegebenen geographischen Voraussetzungen (einem höheren Hügel oder einer Düne in Nähe der Anlage sowie Platz für das Reservoir) und den zu erwartenden explodierenden Kosten wurde dieses erste Konzept bald verworfen.

Somit wurden zahlreiche elektrische KWKA mit einer Spitzenleistung zwischen 5kW und 20kW untersucht. Hier sollen nun stellvertretend für diese Auswahl drei Anlagen miteinander verglichen werden.

Erste und wichtigste Aufgabe der eingesetzten Windkraftanlage ist es, einen konstanten Betrieb der Meerwasserentsalzungsanlage sicherzustellen. Für den Betrieb der Entsalzungsanlage wird eine elektrische Leistung von ca. 2,8 kW z.B. für die Pumpen benötigt. Um den Energiespeicher so klein wie möglich zu halten, sollte die Windkraftanlage auch bei schlechteren Windverhältnissen mindestens die für den Betrieb der Meerwasserentsalzungsanlage benötigte elektrische Leistung erzeugen. Da die verwendete Entsalzungsanlage Solarenergie zur Erzeugung des Süßwassers nutzt wird diese elektrische Leistung nur solange benötigt wie ausreichend Sonnenlicht zur Verfügung steht.

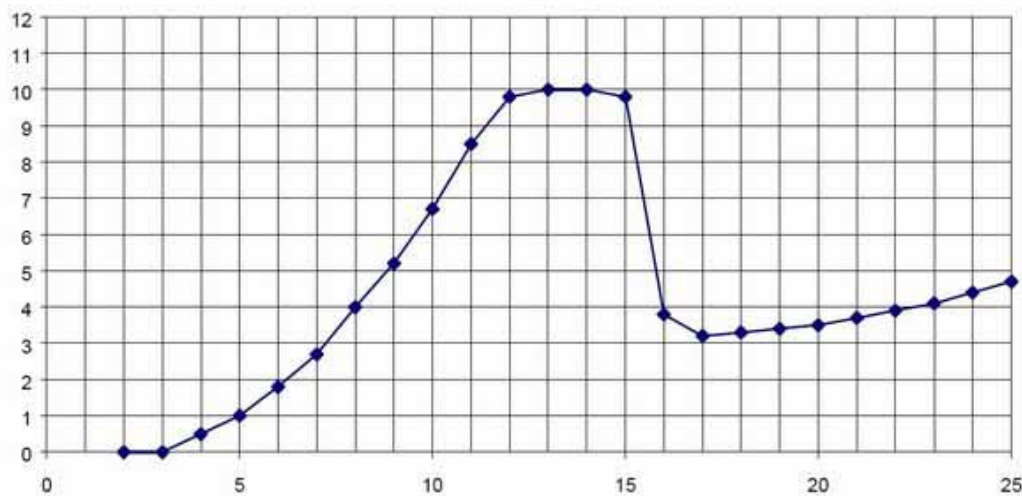
Eine weitere Aufgabe der Windkraftanlage ist es, den dort ansässigen Menschen eine Minimalversorgung mit elektrischem Strom für z.B. Licht, Telekommunikation usw. zu schaffen. Oberste Priorität hat jedoch die Versorgung der Meerwasserentsalzungsanlage. Diese beiden Aufgaben ergänzen sich insofern gut, da nachts, wenn die Entsalzungsanlage nicht arbeitet, mit einem erhöhten Energieverbrauch seitens der Bewohner zu rechnen ist. Da es sich bei der Stromversorgung der Bewohner um eine Minimalversorgung handeln soll, hat die Projektgruppe die hierfür benötigte Leistung mit 5,0 bis 10,0 kW angenommen.

Die von der Windkraftanlage zu erbringende elektrische Leistung sollte somit bei schlechten Windverhältnissen mindestens 2,8 kW betragen und bei normalen Windverhältnissen zwischen 5,0 bis 10,0 kW liegen.

Ein wichtiges Werkzeug zur Auswahl einer Windkraftanlage ist das Leistungsdiagramm. Das Leistungsdiagramm gibt die zu erwartende elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit an. Leider geben viele Hersteller von Kleinwindanlagen nur die Nennleistung bei Nennwindgeschwindigkeit an und verzichten darauf, ein Leistungsdiagramm zu erstellen. Aus diesem Grund verringert sich die Anzahl der projektierbaren Anlagen, da nur mit Hilfe des Leistungsdiagramms die zu erwartende elektrische Leistung bei den am Standort vorherrschenden Windgeschwindigkeiten abgeschätzt werden kann.

Im ersten Schritt wurden Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von ca. 10 kW verglichen. Beispielhaft für diese Anlagen ist die Alize Wind Turbine der Firma Fortis Wind Energy. Es handelt sich hierbei um ein dreiblättriges Windrad mit horizontaler Drehachse und einem Rotordurchmesser von 7,0 m. Nach Betrachtung des Leistungsdiagramms stellt man fest, dass mit der am Standort vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeit von ca. 6 m/s (vgl. Kapitel 5.2) eine elektrische Leistung von ca. 1,8 kW zu erwarten ist.

Rated capacity (kW)

**Abbildung 5-43:** Leistungsdiagramm der Fortis Alize [12]

Nachdem die zu erwartende Leistung der 10 kW-Anlagen noch kleiner als die von uns geforderte Mindestleistung waren, wurden anschließend Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von ca. 15,0 - 20,0 kW betrachtet. Leider konnte nur eine Anlage in dieser Leistungsklasse gefunden werden, bei der auch ein Leistungsdiagramm vorhanden war. Der Big Star Vertical Windrotor der Firma Ropatec GmbH erzielt mit seinem fünfblättrigen H-Darrieus-Rotor eine Nennleistung von 20 kW. Auch bei dieser Anlage ergibt sich aus der am Standort vorherrschenden mittleren Windgeschwindigkeit und der Leistungskurve eine zu geringe Leistung.

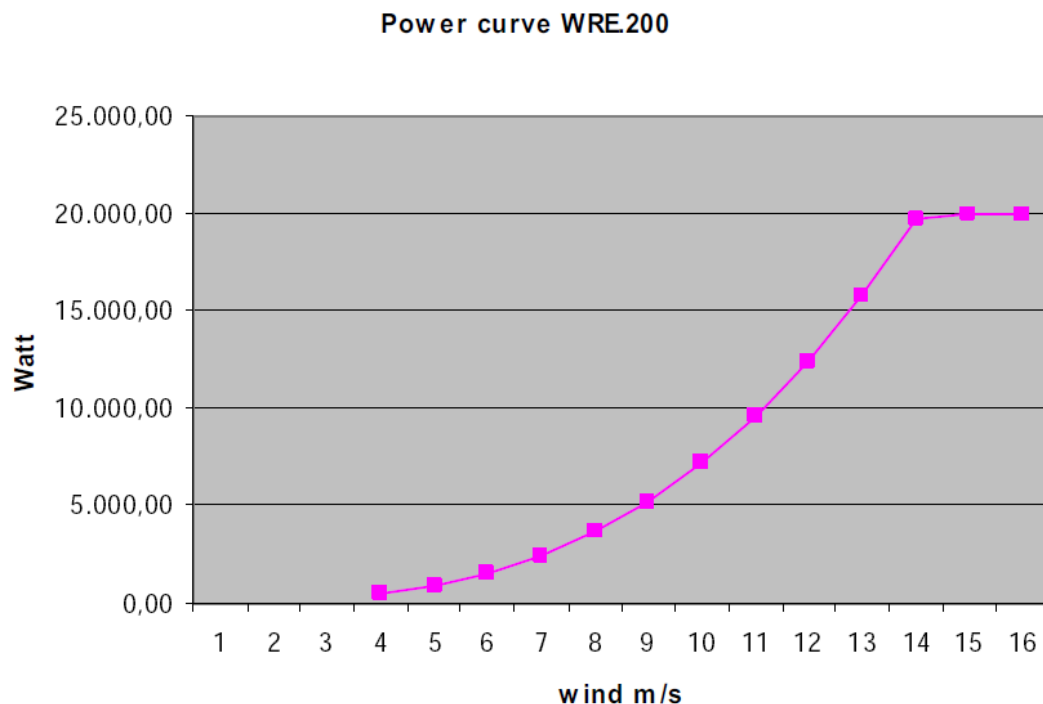


Abbildung 5-44: Leistungsdiagramm des Big Star Vertical der Firma Ropatec GmbH [21]

Der Grund für die geringe abgegebene Leistung beider Anlagen liegt darin, dass die oben genannten Anlagen ihre Nennleistung bei Windgeschwindigkeiten von 12 m/s bzw. 14 m/s erreichen. Eine Lösung des Problems ist also nicht in der Vergrößerung der Nennleistung zu suchen, sondern in einer Verringerung bzw. einem Angleichen der Nennwindgeschwindigkeit mit der mittleren Windgeschwindigkeit des Standortes. Die Berücksichtigung der Nennwindgeschwindigkeit führte uns zu der Leichtwindanlage AV-7 der Aventa AG. Wie die Hütter'sche W34 (vgl. Kapitel 1.3.1) ist die AV-7 für das Binnenland und somit für geringere mittlere Windgeschwindigkeiten optimiert. Wie aus dem Leistungsdiagramm ersichtlich ist, erreicht die AV-7 bereits bei einer Windgeschwindigkeit von 6 m/s ihre Nennleistung von 6,0 kW.

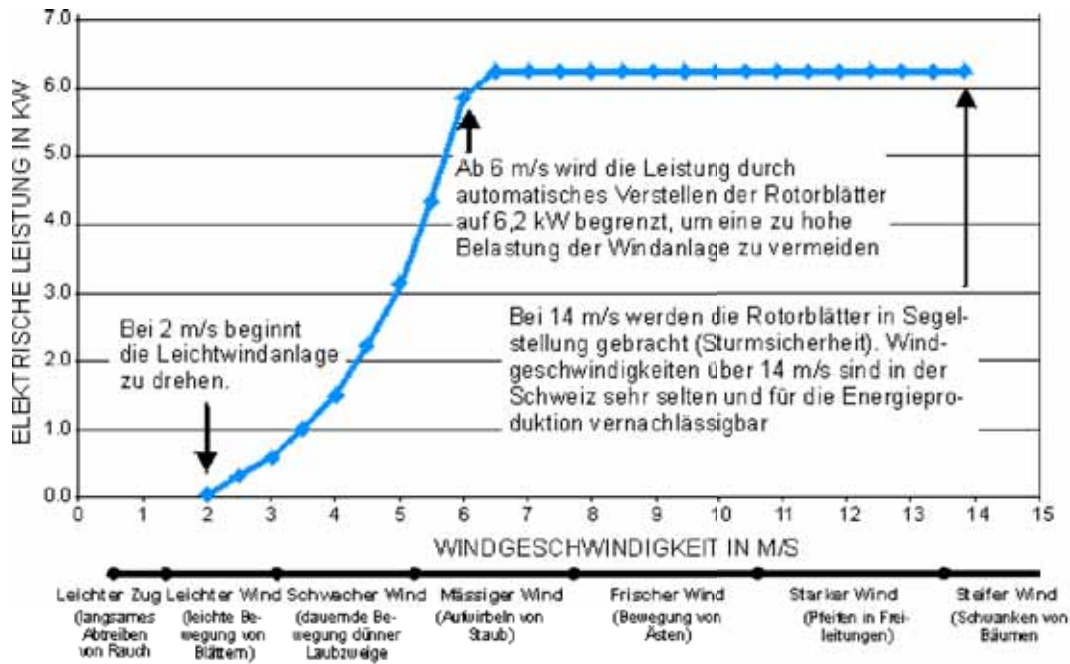


Abbildung 5-45: Leistungsdiagramm der Leichtwindanlage AV-7 der Aventa AG [2]

Die Anlage erfüllt alle oben genannten Anforderungen und ist durch die Gleichheit der zu erwartenden mittleren Windgeschwindigkeit und der Nennwindgeschwindigkeit optimal ausgenutzt.

5.4 Speicherung der überschüssig erzeugten Energie

Wie bereits in Kapitel 5.3 erwähnt, liefert das Windrad auch in der Nacht einen gewissen Strom, welcher selbstverständlich in einem passenden Energiespeicher gespeichert werden sollte, um auftretende Schwankungen in der Verfügbarkeit des Stromes aus Wind zu überbrücken und die Bevölkerung mit einem Mindestmaß an Strom für andere Zwecke zu versorgen.

5.4.1 Vergleich der Speicher

Wie aus dem folgenden Schema zu erkennen ist, eignen sich Akkus für eine Speicherung der Energie über einen Zeitraum von mehreren Wochen besser als ein Druckluftspeicher. Außerdem sind Kosten, Komplexität und Erfahrungswerte im Bereich von Akkus wesentlich überschaubarer als bei einem Druckluftspeicher. Somit fiel die Wahl auf die Verwendung eines passenden Akkus zur Speicherung der überschüssigen Energie.

Chemische Speicher im stationären Einsatz

Batterien haben den größten Einsatzbereich unter den Speichern

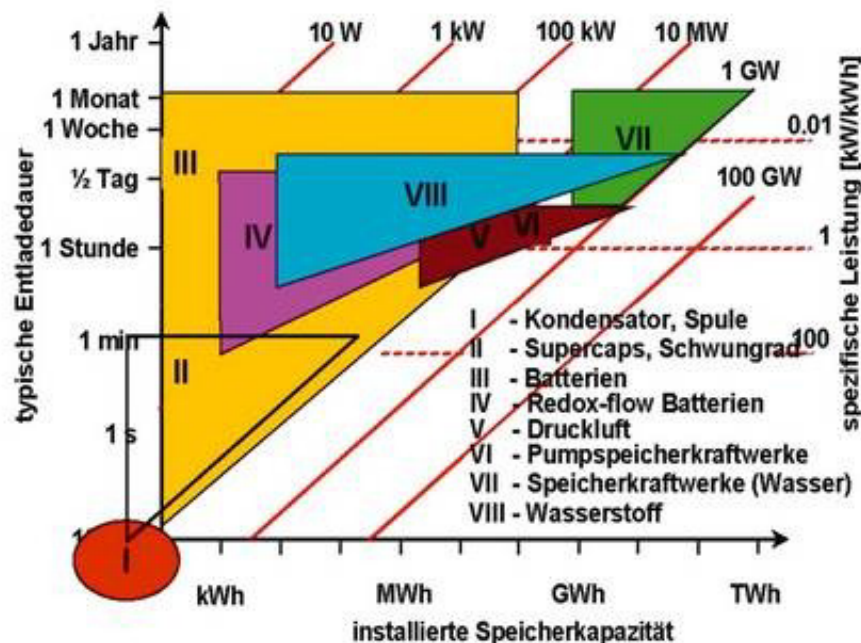


Abbildung 5-46: Einsatzbereiche der verschiedenen Energiespeicher [11]

5.4.2 Druckluftspeicher

Druckluftspeicher sind eine weitere großtechnische Möglichkeit zur mechanischen Speicherung von Energie. In Druckluftspeichern wird bei Energieüberschüssen Luft mit Hilfe von Kompressoren komprimiert und eingelagert. Im Bedarfsfall kann die komprimierte Luft bei der Expansion Arbeit z.B. zum Antrieb einer Turbine verrichten.

Wird ein Speichersystem nach diesem Konzept betrieben, werden nur relativ bescheidene Wirkungsgrade erreicht, da insbesondere bei der Kompression der Luft erhebliche Mengen an Wärmeenergie als Verlust anfallen.

In Spitzenlastzeiten wird die komprimierte Luft aus dem Speicher einer Gasturbine zugeführt, in der sie als Verbrennungsluft dient. Durch diesen zeitlich entkoppelten Verdichtungsprozess kann die Leistung eines Gasturbinen-Kraftwerks wegen des temporären Entfalls der Kompressorleistung für Verbrennungsluft um über 30% erhöht werden. Das adiabate Druckluftspeicherkraftwerk nutzt zusätzlich die bei der Kompression der Luft frei werdende Wärme. Dadurch können theoretisch Nutzungsgrade von bis zu 70% erreicht werden. Da es sich beim Druckluftspeicher um eine relativ neue Technologie handelt, ist diese noch in der Forschungsphase (EU-Projekt).

Bei der Entwicklung adiabater Druckluftspeicher zur Verbesserung des Anlagennutzungsgrades besteht aufgrund der gestiegenen Ansprüche an die für diesen Kraftwerkstyp benötigten Systemkomponenten großer Forschungsbedarf.

Aufgrund kurzer Entladedauer (innerhalb einer Stunde) und hoher Nennleistung (erst ab 100kW) sind Druckluftspeicher für die Anwendung unserer Kleinwindkraftwerke mit maximaler Nennleistung von 50kW nicht optimal.

5.4.3 Akkumulatoren

Das Funktionsprinzip eines Akkumulators basiert auf der Umwandlung der aufgeladenen elektrischen Energie in chemische Energie. Beim Anschluss eines Verbrauchers wird die chemische Energie wiederum in elektrische Energie verwandelt. Dieser Vorgang ist natürlich mit Verlusten behaftet, die im Ladewirkungsgrad formuliert sind. Der Ladewirkungsgrad stellt das Verhältnis der entnehmbaren Energie zu der geladenen Energie dar und beträgt etwa 80 %. Dies bedeutet einen Verlust von 20 % der Energie.

5.4.3.1 Typen

Nickel-Kadmium: Sind ausgereift, haben aber nur eine mäßige Energiedichte. Nickel-Kadmium wird dort verwendet, wo Wert auf lange Lebensdauer, große Entladekoeffizienten und großen Temperaturbereich gelegt wird. Die wichtigsten Anwendungen sind Funkgeräte, medizinische Geräte und Werkzeuge. Nickel-Kadmium enthält giftige metallische Substanzen.

Nickel-Metall-Hydrid: Bietet eine größere Energiedichte als Nickel-Kadmium, hat aber eine kürzere Lebenserwartung. Enthält keine giftige metallische Substanz. Anwendungen sind z.B. Handys und Laptops.

Blei-Säure: Sind die preiswerteste Lösung für größere Anlagen, wo das Gewicht keine Rolle spielt. Blei-Säure-Akkumulatoren werden vorwiegend bei der Notstromversorgung von Krankenhäusern und Beleuchtungsanlagen verwendet.

Lithium-Ion: Batterien mit dem größten Wachstumspotenzial. Bieten hohe Energiedichte bei kleinem Gewicht. Schutzschaltungen werden benötigt, um Spannung und Strom aus Sicherheitsgründen zu begrenzen. Anwendungen sind ebenfalls Laptops und Handys.

Lithium-Polymer: Ähnlich wie Lithium-Ionen gestattet dieses System schlanke Batterien in einfacher Konstruktion zu bauen, allerdings bei höheren Kosten. Hauptanwendungsgebiete sind Handys.

Wiederverwendbare Alkalibatterien: Ihre begrenzte Anzahl Ladezyklen und der tiefe Ladestrom werden kompensiert durch eine lange Lagerfähigkeit, was die

Batterie für tragbare Unterhaltungsgeräte und Blitzlichtgeräte hervorragend geeignet macht.

5.4.3.2 Vergleich

Die Tabelle fasst die Eigenschaften von gewöhnlichen Batterien zusammen. Sie ist begründet auf durchschnittlichen Werten von heute vorhandener Technik. Es ist zu bemerken, dass Nickel-Kadmium die kürzeste Ladezeit aufweist, den höchsten Strom abgeben kann und die tiefsten Betriebskosten aufweist, jedoch eine regelmäßige Wartung benötigt.

	Ni-Cd	Ni-MH	Blei-Säure	Li-Ion	Li-Ion-Polymer	Wieder verwendbare Alkaline
Gravimetrische Energie Dichte (Wh/kg)	45-80	60-120	30-50	110-160	100-130	80 (initial)
Zyklen (für 80% der Nennkapazität)	1500	300 bis 500	200 bis 300	300 bis 500	300 bis 500	50(für 50% Kapazität)
Schnellladezeit	1h	2 bis 4h	8 bis 16h	2 bis 4h	2 bis 4h	2 bis 3h
Überladetoleranz	mäßig	schwach	hoch	sehr schwach	schwach	mäßig
Selbstentladung/Monat (bei Raumtemperatur)	20%	30%	5%	10%	10%	0,3%
Zellenspannung(nominal)	1,25V	1,25V	2,0V	3,6V	3,6V	1,5V
Betriebstemperatur (nur Entladung) (°C)	-40 bis 60	-20 bis 60	-20 bis 60	-20 bis 60	0 bis 60	0 bis 65
Wartungsbedarf	30 bis 60 Tage	60 bis 90 Tage	3 bis 6 Monate	Kein Bedarf	Kein Bedarf	Kein Bedarf
Kommerziell seit Jahr	1950	1990	1970	1991	1999	1992

5.4.3.3 Auswahlkriterien

- Gravimetrische Energiedichte:

Dies ist ein Maß für die Menge der lieferbaren elektrischen Energie auf die Masse des Speichers bezogen (in Wh/kg). Bleiakkus erreichen einen Wert von 30 Wh/kg und Lithium-Ionen-Akkus bis zu 140 Wh/kg

- Volumetrische Energiedichte:

Volumetrische Energiedichte ist ein Maß für die Menge der lieferbaren Energie auf das Volumen des Speichers bezogen (in Wh/l). Bei Bleiakkus entspricht die volumetrische Energiedichte 50 Wh/l und bei Lithium-Ionen-Akkus 500 Wh/l.

- Maximaler Entladestrom:

Der maximale Entladestrom gibt die maximal nutzbare Leistung an. Er ist vor allem bei Anwendungen mit kurzfristig hohem Leistungsbedarf ein wichtiger Aspekt bei der Festlegung des Speichertyps.

- Abmessungen und Gewicht:

Gibt die Dimensionierung des Akkus an und ist vorwiegend bei geringem Platzbedarf ausschlaggebend bei der Auswahl.

- Memory-Effekt:

Der Memory-Effekt ist ein Maß für den Verschleiß eines Akkumulators und wird auch als Batterieträgheitseffekt bezeichnet. Dieser Effekt hat eine Verringerung der Kapazität oder Spannung zur Folge und entsteht bei regelmäßiger unvollständiger Entladung und Aufladung des Akkumulators. Blei-Akkus sind für diesen Effekt nicht anfällig, was unter anderem ein Vorteil der Blei-Akkus darstellt.

5.4.4 Blei-Säure-Akkumulatoren

Die Blei-Säure-Batterie ist die älteste wiederaufladbare Batterie, die existiert. Sie hat noch heute einen Marktanteil behalten, wo neuere Batteriewerkstoffe entweder zu teuer sind oder der Unterhalt zu viel Aufwand benötigt. Es handelt sich vorwiegend um Applikationen, bei denen keine kostengünstigen Alternativen möglich sind. Deswegen ist die Blei-Säure-Batterie in unserer modernen Zeit in noch stärkerem Maße konkurrenzfähig.

Auf Grund von verschiedenen Marktanforderungen entstanden zwei Blei-Säure-Batteriemodelle; die kleine versiegelte Blei-Säure-Batterie (SLA), ebenfalls bekannt unter dem Produktnamen „Gel-Cell“, und die große Ventil-gesteuerte Blei-Säure-Batterie (VRLA). Technisch gesehen sind die beiden Batteriemodelle gleich (Wissenschaftler werden argumentieren, dass die Bezeichnung „versiegelte Blei-Säure-Batterie“ falsch sei, da keine wiederaufladbare Batterie total versiegelt sein kann).

Das Festlegen der Grenze für die ideale Ladespannung ist kritisch. Jede Spannungsschwelle ist an sich ein Kompromiss. Eine hohe Spannungsgrenze (über 2.40V/Zelle) ergibt eine gute Batterieleistung, aber verkürzt die Lebenserwartung wegen der auftretenden Korrosion auf der positiven Platte. Die Korrosion ist permanent. Eine tiefere Spannung (unterhalb 2.40V/Zelle) ist sicher beim Laden bei höheren Temperaturen, ist aber Gegenstand von Sulfatierung der negativen Platte.

Blei-Säure-Akkus haben keinen Memory-Effekt. Das Belassen einer Batterie in Schwebeladung während längerer Zeit führt zu keinen Schäden. Die Selbstentladung beträgt ca. 40% pro Jahr, eine der tiefsten bei wiederaufladbaren Batterien. Im Vergleich dazu werden Nickel-Kadmium-Akkus im gleichen Masse innerhalb 3 Monaten entladen. Blei-Säure-Batterien sind vergleichsmäßig günstig im Einkauf, aber die Betriebskosten sind höher als bei Nickel-Kadmium, wenn volle Zyklen mehrmals hintereinander nötig werden.

Blei-Säure-Batterien sind nicht geeignet für Schnellladung. Eine typische Ladezeit ist 8 bis 16 Stunden. Die Batterie muss immer in geladenem Zustand gelagert werden. Belässt man eine Batterie im entladenen Zustand ergibt dies eine Sulfatierung, die zur Folge hat, dass die Batterie nur schlecht bis gar nicht mehr geladen werden kann.

Im Gegensatz zu Nickel-Kadmium-Akkus, erträgt ein Blei-Säure-Akku keine Tiefentladungen. Eine Vollentladung ergibt eine zusätzliche Beanspruchung und jeder Ladezyklus verringert die Kapazität der Batterie. Ein solcher Verschleiß tritt in unterschiedlicher Stärke auch bei anderen Batteriewerkstoffen auf. Um zu verhindern, dass die Batterie durch wiederholte Tiefentladungen übermäßig beansprucht wird, wird empfohlen, eine größere Batterie einzusetzen.

In Abhängigkeit von Tiefentladungen und Umgebungstemperatur während des Einsatzes beträgt die Lebenserwartung eines versiegelten Blei-Säure-Akkus ca. 200 bis 300 Lade-/Entlade-Zyklen. Der hauptsächliche Grund für diese relativ kurze Lebenserwartung liegt in der Gitterkorrosion der positiven Elektrode, der Verringerung des aktiven Materials und der Ausdehnung der positiven Platten. Diese Veränderungen sind in noch stärkerem Masse bei hohen Funktionstemperaturen

vorhanden. Wartungszyklen können diesen Trend weder aufhalten noch rückgängig machen.

Die optimale Funktionstemperatur für Blei-Säure-Akkus beträgt 25°C. Als Richtwert kann angegeben werden, dass eine Temperaturerhöhung von 8°C die Batterielebenserwartung halbiert. Ein Ventil-gesteuerter Blei-Säure-Akku (VRLA), welcher bei 25°C 10 Jahre lang funktioniert, wird nur noch 5 Jahre einsatzfähig sein, wenn er bei 33°C betrieben wird. Theoretisch wird die selbe Batterie nur etwas mehr als 1 Jahr funktionieren, wenn sie bei eine (Wüsten)-Temperatur von 42°C eingesetzt wird.

Unter allen modernen wiederaufladbaren Batterien hat die Blei-Säure-Batterie die niedrigste Energiedichte und ist deshalb ungeeignet für den Einsatz in tragbaren Geräten, die eine kompakte Bauart erfordern. Dazu kommt, dass die Leistung bei tiefen Temperaturen niedrig ist.

Die Entladerate einer Blei-Säure-Batterie beträgt 5 Stunden. Einige Batterien werden für eine langsame Entladung von 20 Stunden eingestellt. Längere Entladezeiten führen zu höheren Kapazitätswerten. Die Blei-Säure-Akkus arbeiten gut bei starker Belastung.

In Bezug auf die Entsorgung, sind die Blei-Säure-Akkus weniger schädlich als Nickel-Kadmium, aber der hohe Bleianteil und der Elektrolyt machen die Blei-Säure-Akkus schwer umweltverträglich.

5.4.5 Folgerung

Aus den oben genannten Gründen kommt für unsere Anwendung lediglich ein Blei Gel Akku zum Einsatz. Dieser hat eine relativ lange Lebensdauer, ist wartungsarm und stellt überschaubare Gesamtkosten dar. In Bezug auf zu hohe Umgebungstemperaturen ist es sinnvoll, die Akkus zu isolieren, um ihre Lebensdauer nicht unnötig zu verkürzen.

5.5 Gesamtsystem

Wie in Abbildung 5-47 zu sehen ist besteht das hybride System zur solaren Meerwasserentsalzung aus den verschiedensten Komponenten. Einen Zentralen Punkt nimmt das Leichtwindrad AV7 der Firma Aventa ein. Durch dieses (vgl. Abschnitt 5.3) wird eine stetige Versorgung auch bei relativ geringen Windgeschwindigkeiten gewährleistet. Die Hauptaufgabe der Anlage besteht darin, die für den Betrieb der solaren Meerwasserentsalzungsanlage benötigte Leistung von 2,8 kW bereitzustellen. Überschüssig erzeugter Strom kann ausgekoppelt werden und einem weiteren Verbraucher bzw. der Bevölkerung zur Verfügung

gestellt werden. Des Weiteren wird ein Teil des Stroms, der von der Entsalzungsanlage nicht genutzt werden kann, in Bleiakkumulatoren (vgl. Abschnitt 5.4) gespeichert um Flauten (Windgeschwindigkeiten unter 2m/s) von bis zu einem Tag überbrücken zu können und trotzdem eine Trinkwasserversorgung gewährleisten zu können.

Bei der Wahl sämtlicher Komponenten wurde darauf geachtet möglichst wartungsarme Geräte zu verwenden. Dies wiederum hat enorme Auswirkungen, insbesondere bei der solaren Entsalzungsanlage, auf die Kosten (vgl. Abschnitt 5.6).

Abbildung 5-47: Darstellung des Gesamtsystems

5.6 Kosteneinschätzung

5.6.1 Entsalzungsanlage: Meerwasserentsalzungsanlage mit mehrstufiger Verdunstung

Für die Meerwasserentsalzungsanlage mit einer Leistung von ca. 0,5 m³/d werden die in Brendel, (2003) ermittelten Investitions- und Betriebskosten herangezogen. Diese betragen gesamt berechnet für einen Zeitraum von 20 Jahren ca. 100.000€. Hierbei sind sämtliche Pumpen, Ventilatoren, Sole- und Produktbehälter und

Befeuchter mit eingerechnet. Die Lohn- und Betriebsmittelkosten wurden mit 6% der Investitionskosten angenommen. Reparatur- und Ersatzteilkosten für Meerwasserentsalzungsanlagen sollten nach Janisch und Drechsel (1984) ebenfalls mit 1 bis 2% der Investitionskosten veranschlagt werden. Somit sind die Gesamtkosten von 100.000€ eine grobe Abschätzung und kein belegbarer Wert aus der Praxis.

5.6.2 Kleinwindenergieanlage: Leichtwindanlage AV-7

Die schlüsselfertige Windkraftanlage AV-7 kostet inklusive Planung, Anlage, Mast, Montage und Anschluss ans Netz derzeit 140.000 Schweizer-Franken (ca. 90.500€). Die Anlage allein, bestehend aus Gondel mit Flügeln sowie der Steuerungs- und Regelungstechnik kostet 67.500€. Durch eine Serienfertigung in naher Zukunft soll der Preis für die Anlage auf ca. 40.000€ gesenkt werden. Da eine komplette Planung der Anlage binnen der nächsten Jahre nicht abgeschlossen sein wird, gehen wir für unsere Kostenkalkulation von einem Preis von 40.000€ aus. Die weiteren Kosten wie z.B. für einen Mast, Verkabelungen und Montage werden erst bei Realisierung des Projektes vor Ort sichtbar und können deshalb bei dieser Berechnung nicht berücksichtigt werden.

5.6.3 Energiespeicher: Blei-Akku

Dieses Modul wurde aus dem Conrad-Business-Katalog exemplarisch, ohne auf dieses festgelegt zu sein, als Beispiel für unsere Anwendung ausgewählt. Der Speicher besitzt eine Akku-Kapazität von 230Ah. Daraus ergibt sich eine verfügbare elektrische Energie von 2,76kWh je Modul.

Akku Blei 230 AH Solar Dryfit
S12/230A:

Technische Daten:

- Akku-Technologie: Blei-Gel
- Akku-Kapazität: 230 Ah
- Abmessung: (B x H x T) 518 x 238 x 274 mm
- Anschluss: A-Pol
- Wiederaufladbar: Ja
- Spannung: 12V



- Gewicht: 67 kg

Kosten: 472, 27€



Abbildung 5-48: Akku Blei 230Ah Solar Dryfit S12/230A
(oben: Single-Bau, unten: Group-Bau) [7]

Um für die Meerwasserentsalzung einen Tag der Flaute überbrücken zu können und den in der Nacht durch das Windrad anfallenden Strom speichern zu können wurde eine benötigte speicherbare Energie von ca. 50KWh angenommen. Somit ergeben sich 20 Module und daraus für unseren Anwendungsfall folgende Kosten für die Energiespeicherung:

$$20 \times 472,27\text{€} = 9445,40\text{€}$$

5.6.4 Gesamtanlage

Die Kosten für die Gesamtanlage, also für Energiespeicher, Kleinwindenergieanlage und mehrstufige Meerwasserentsalzungsanlage belaufen sich somit auf 149.945,40€. Des weiteren werden für Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten sowie sonstige Kosten für Zinsen, Wechsel- und Gleichrichter, Verkabelung, Verrohrung, Mast, etc. von ca. 20.000€ angenommen.

Dadurch ergeben sich gesamt für eine Laufzeit von 20 Jahren Kosten von ca. 210.000€⁵.

Umgerechnet auf einen Liter produziertes Trinkwasser ergibt sich somit folgende Kostenschätzung:

Die Produzierte Trinkwassermenge in 20 Jahren bei einer Verfügbarkeit von 85% ergibt sich somit aus dem Produkt der pro Tag produzierten Trinkwassermenge, der Verfügbarkeit, der angenommenen Lebensdauer in Jahren und den 365 Tagen/Jahr.

$$\text{Trinkwassermenge} = 0,5\text{m}^3/\text{d} \times 0,85 \times 20\text{a} \times 365\text{d/a} = 3102,5\text{m}^3 = 3102,5 \times 10^3\text{l}$$

⁵ Annahme: Laufzeit der Akkus 5 Jahre, kann ggf. durch Klimatisierung des Lagerraums erhöht werden (vgl. Abschnitt 5.4.4)



Somit ergeben sich die Kosten für einen Liter Trinkwasser durch den Quotienten aus den Gesamtkosten in Euro und die gesamt produzierte Trinkwassermenge in Litern:

$$\text{Kosten pro Liter} = 210.000\text{€} / 3102,5 \times 10^3 \text{l} = 0,068\text{€} / \text{l} = 6,8\text{Cent} / \text{l}$$

Zur Zeit kostet ein Kubikmeter Wasser in unseren Breiten ca. 2,50€ inklusive sämtlicher Nebenkosten, wie Abwasser, Wasserzähler etc.. Somit kostet unser durch mehrstufige Meerwasserverdunstung produziertes Trinkwasser etwa das 20fache dessen, was es in unseren Breiten kostet. Dabei darf jedoch nicht vergessen werden, dass die Rahmenbedingungen in Ländern wie z.B. dem Senegal ganz andere sind. Abschließend kann gesagt werden, dass die Umsetzung eines solchen Projektes nicht ohne eine staatliche Förderung und Unterstützung realisiert werden kann.

6 Ausblick

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass die dezentrale Bereitstellung von Strom und Trinkwasser in Zukunft stark zunehmen wird. Auch in den angrenzenden Küstengebieten Europas könnten sich solche Systeme in größerem Umfang durchsetzen, wenn die momentane Preisentwicklung der fossilen Energieträger anhält oder sich noch weiter verschärft. Nicht nur durch die Veränderung der klimatischen Verhältnisse, sondern auch aus wirtschaftlichen Gründen ist es sinnvoller, autarke Inselösungen zu realisieren, anstatt wenig besiedelte, weitläufige Gebiete miteinander zu vernetzen. Mit Hilfe solcher Systeme wäre es möglich, einer breiten Bevölkerungsschicht den Zugang zu den lebenswichtigsten Ressourcen möglichst kosten- und umweltschonend zu ermöglichen. Die wichtigsten Realisierungsvoraussetzungen dafür sind jedoch eine möglichst hohe Solarstrahlung und ein Mindestmaß an Windenergie. Außerdem sollte das gesamte System möglichst einfach aufgebaut sein, um Wartungsprobleme und weitere Kosten zu vermeiden.

7 Projektmanagement

7.1 Allgemein

Die Projektgruppe „Kleinwindkraftwerk“ hat sich explizit mit der Datenrecherche rund um das Thema Kleinwindkraftwerke und ihre Anwendung beschäftigt. Die Arbeit wurde anfangs gleichmäßig auf die Projektteilnehmer aufgeteilt. Dabei haben sich leider einige Unstimmigkeiten ergeben, da die zu erledigenden Arbeiten oft nicht zum vereinbarten Zeitpunkt ausgeführt wurden. Vor allem in der Endphase bestanden zum Teil erhebliche Differenzen über die Qualität und Form von Recherchen und deren termingerechte Ablieferung. Nur durch einen erheblichen Mehraufwand der restlichen Gruppe, war es zu gewährleisten die schriftliche Ausarbeitung des Berichtes rechtzeitig fertig zu stellen (vgl. 10 Arbeitsverteilung).

7.2 Gruppenorganisation

Termine mit einer Gruppe zu vereinbaren, welche aus sechs Personen besteht, ist eine Herausforderung. Um flexibler agieren zu können, wurde die Gruppe in drei Zweierteams aufgeteilt, die jeweils einen der gemeinsam festgelegten Schwerpunkte ausarbeiten.

Die Arbeitsgruppen setzen sich wie folgt zusammen:

Gruppe 1: Daniel Reznicek, Bernhard Tetzlaff

Gruppe 2: Danijel Leovac, Qing Yang

Gruppe 3: Philip Hughes, Georg Mayr

7.3 Kommunikation

Die Kommunikation zwischen den Projektteilnehmern lief in erster Linie per E-Mail und regelmäßigen Besprechungen ab. Während des gesamten Projektzeitraumes hat Herr Tetzlaff eine Internetseite eingerichtet, die es der Gruppe ermöglichte, sich direkt in einem Forum auszutauschen. Kurzfristige Fragen oder Erkenntnisse wurden per Telefon oder mittels Skype geklärt. Dadurch war sichergestellt, dass jedes Teammitglied stets auf dem aktuellen Stand des Gesamtprojektes war.

8 Danksagung

Besonderer Dank gilt an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing.(FH) Sebastian Brenner und Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcus Reppich, die die Projektgruppe betreut haben und das Voranschreiten des Projektes wesentlich mitgestaltet haben. Durch die fachliche Betreuung der beiden oben genannten Herren wurde eine fachliche Umsetzung des Projektes erst möglich.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Windmühle mit vertikaler Drehachse in Afghanistan [16].....	6
Abbildung 1-2: Chinesisches Windrad mit umklappbaren Flügeln [16].....	7
Abbildung 1-3: Aufbau einer Blockwindmühle [16].....	8
Abbildung 1-4: Aufbau einer Wippwindmühle [13].....	9
Abbildung 1-5: Aufbau einer Holländer Mühle [16].....	10
Abbildung 1-6: Halladaysche Windmühle [16].....	12
Abbildung 1-7: Windturbine "Eclipse" [16].....	12
Abbildung 1-8: Windkraftanlage zur Erzeugung von Elektrizität in Askov, Dänemark, 1891 [16].....	13
Abbildung 1-9: Smith-Putnam-Anlage, USA, 1941 [16].....	14
Abbildung 1-10: Palmer C. Putnam [16].....	14
Abbildung 1-11: W34-Anlage, BRD, 1958 [16].....	15
Abbildung 1-12: Ulrich Hütter [16].....	15
Abbildung 2-13: Massendurchsatz einer durchströmten Fläche [14].....	16
Abbildung 2-14: Windgeschwindigkeiten vor, in und hinter der Radebene [14].....	17
Abbildung 2-15: Nutzung des Luftwiderstandes als Antriebskraft [14].....	17
Abbildung 2-16: Prinzip Widerstandsläufer [14].....	18
Abbildung 2-17: Auftriebskraft A und Widerstandskraft W am Tragflügel [14].....	19
Abbildung 2-18: Druckverteilung auf einem Tragflügelprofil bei kleinerem und größerem Anstellwinkel [14].....	19
Abbildung 2-19: Resultierende K aus Auftriebskraft A und Widerstandskraft W [14]	20
Abbildung 2-20: Winddreiecke in verschiedenen Flügelschnitten [14].....	21
Abbildung 2-21: Spitzenumströmung von der Druckseite zur Saugseite [14].....	22
Abbildung 2-22: Drallbehaftete Strömung hinter dem Windrad [14].....	23
Abbildung 2-23: Strömungsabriss bei zu hoher Windgeschwindigkeit [14].....	24
Abbildung 2-24: Pitchen des Rotorblattes in Richtung Fahnenstellung [14].....	24
Abbildung 3-25: Windgeschwindigkeiten Global [6].....	26
Abbildung 3-26: Windgeschwindigkeiten Europa [6].....	27
Abbildung 3-27: Windgeschwindigkeiten Deutschland [6].....	28

Abbildung 3-28: Konzept Luftdruckspeicherung [18].....	32
Abbildung 3-29: Containerlösung [18].....	33
Abbildung 3-30: Insellösung [18].....	34
Abbildung 3-31: Vergleich Windpark [20].....	35
Abbildung 4-32: Microwindturbine [33].....	37
Abbildung 4-33: Solar-Wind-Hybrid System (links: Arbeitsprinzip, rechts: Beispiel) [23].....	38
Abbildung 4-34: Savonius-Rotor 3.000 kWh Strom zur Heizungsunterstützung [3]...	38
Abbildung 4-35: Savonius [44].....	39
Abbildung 4-36: H-Darrieus-Rotor [35].....	40
Abbildung 4-37: Darrieus-Rotor [32].....	40
Abbildung 4-38: Lee-Läufer [25].....	41
Abbildung 4-39: Luv-Läufer [25].....	41
Abbildung 5-40: Aufbau der solaren Meerwasserentsalzungsanlage [4].....	47
Abbildung 5-41: Mollier h-x-Diagramm [4].....	48
Abbildung 5-42: Daten der Referenzanlage [4].....	48
Abbildung 5-43: Leistungsdiagramm der Fortis Alize [12].....	51
Abbildung 5-44: Leistungsdiagramm des Big Star Vertical der Firma Ropatec GmbH [21].....	52
Abbildung 5-45: Leistungsdiagramm der Leichtwindanlage AV-7 der Aventa AG [2]	53
Abbildung 5-46: Einsatzbereiche der verschiedenen Energiespeicher [11].....	54
Abbildung 5-47: Darstellung des Gesamtsystems.....	60
Abbildung 5-48: Akku Blei 230Ah Solar Dryfit S12/230A (oben: Single-Bau, unten: Group-Bau) [7].....	62

10 Quellen

- [1] Ampair: Ampair windpower solutions. Stand: 2007. URL: <http://www.boost-energy.com/ampair/windpower.asp> (abgerufen am: 31.12.08 18:17Uhr).
- [2] Aventa AG: Leichtwindanlage AV-7. Stand: 2004. URL: <http://www.avena.ch/deutsche%20Homepage/AV7/AV--7.HTM>. (abgerufen am: 01.01.08 13:15Uhr).
- [3] Beyer, Martin: Savonius-Rotor: Heizungsunterstützung mit Windenergie. In: Solar Magazin. Stand: Februar 2006. URL: <http://www.solarserver.de/solarmagazin/anlagefebruar2006.html> (abgerufen am: 31.12.08 17:33Uhr).
- [4] Brendel, Thomas: Solare Meerwasserentsalzungsanlagen mit mehrstufiger Verdunstung. Diss. Ruhr Universität Bochum, 2003. URL: <http://www-brs.ub.ruhr-uni-bochum.de/netahtml/HSS/Diss/BrendelThomas/diss.pdf> (abgerufen am: 31.12.08 18:39Uhr).
- [5] Buchmann, Isidor: Battery University. Stand: 2005. URL: <http://www.batteryuniversity.com/index-german.htm> (abgerufen am: 31.12.08 18:28Uhr).
- [6] Bundesverband Windenergie e.V.: Technik. Stand: 2005. URL: <http://www.windenergie.de/de/technik/> (abgerufen am: 31.12.08 18:24Uhr).
- [7] Conrad Electronic SE: Business-Katalog – Solarakkus. Stand: 2008. URL: http://www1.business.conrad.de/scripts/wgate/zcop_b2b/~flN0YXRIPTM0ODUxNzk1OTM=?~template=PCAT_AREA_S_BROWSE&glb_user_js=Y&p_init_ipc=X&~cookies=1 (abgerufen am: 31.12.08 16:33Uhr).
- [8] Danish Wind Industry Association: Streifzug. Stand: 12.05.2003. URL: <http://www.windpower.org/de/tour/wres/index.htm> (abgerufen am: 31.12.08 18:28Uhr).
- [9] Enercon: Enercon Meerwasserentsalzungsanlage als Inselsystem. Stand 2006. URL: http://www.wwindea.org/technology/ch05/de/5_2_1.html (abgerufen am: 31.12.08 18:01Uhr).
- [10] Energyprofi: Alles über Wind wind energy und Windenergien. Stand: ohne Jahr. URL: <http://www.energyprofi.com/jo/Alles-ueber-Wind-wind-energy-und-Windenergien.html> (abgerufen am: 01.01.08 13:41Uhr).
- [11] Forschungsstelle für Energiewirtschaft: Chemische Speicher im Stationären Einsatz. Stand 2008. URL: <http://www.ffe.de/index2.htm> (abgerufen am: 01.01.08 13:37Uhr).

- [12] Fortis Wind Energy: Alize Wind Turbine. Stand: 2006.
URL: <http://www.fortiswindenergy.com/products/wind-turbines/alize>. (abgerufen am: 01.01.08 13:10Uhr).
- [13] Gasch, R.; Schubert, M.: Aus der Geschichte der Windräder. In: Gasch, R., Windkraftanlagen, Stuttgart 1993, S. 14.
- [14] Gasch, Robert und Twele, Jochen: Windkraftanlagen. B.G. Teubner-Verlag Wiesbaden 2007.
- [15] Gipe, Paul: Kleinwindkraftanlagen und ihre Anwendung: Ein Überblick. Stand:2004. URL: http://www.wwindea.org/technology/ch05/de/5_1_1.html (abgerufen am: 31.12.08 17:46Uhr).
- [16] Hau, E. : Wind Kraftanlagen, 2. Auflage, Berlin 1996, S. 1 – 44.
- [17] Heyde, Michael: Technik und Trends in bei Kleinwindkraftanlagen. In: Erneuerbar Energien 07/04, Obercarsdorf 2004. URL: http://www.erneuerbarenergien.de/0704/s_26-28.pdf (abgerufen am: 31.12.08 17:43Uhr).
- [18] Neuhäuser Windkraftenergiesysteme: Weitere Möglichkeiten. Stand: ohne Jahr. URL: <http://www.neuhaeuser.de/windenergie/index2.htm>, (abgerufen am: 31.Dez.08 16:17Uhr).
- [19] Oliver Lönker: Speichertechnologien - ein Überblick. In: neue energie 5/2005, Berlin 2005.
- [20] Peters, Holger: Repowering: Die Größe von Windkraftanlagen. Stand: 2006. URL: http://www.wwindea.org/technology/ch02/de/2_4_4.html (abgerufen am: 31.12.08 18:14Uhr).
- [21] Ropatec GmbH: Big Star Vertical. Stand: ohne Jahr. URL: http://www.ropatec.com/admin/Prodotti/img/DE_Big_Star_Vertical.pdf (abgerufen am: 01.01.08 13:15Uhr).
- [22] Sauer, Dirk Uwe: Optionen zur Speicherungelektrischer Energie in Energieversorgungssystemen mit regenerativer Stromerzeugung. Junior Profesur RWTH Aachen 2006.
- [23] SolarWind Technologies Ltd.: Wind/Solar Hybrid System. Stand: 2008. URL: <http://solarwind.co.nz/hybrid.html> (abgerufen am: 31.12.08 16:45Uhr).
- [24] TASSA GmbH – Vertikale Windenergie: Anwendung. Stand: 2005. URL: <http://www.tassa.de/anwendung.html> (abgerufen am: 31.12.08 18:17Uhr).
- [25] Tsang, Yu-Hin und Trappe, Raffael: Windenergie. Stand: 2002. URL: <http://www.mareno.net/windkraft.html> (abgerufen am: 01.01.08 13:34Uhr).

- [26] Universität Duisburg-Essen, Technologie und Didaktik der Technik: Regenerative Energiequellen Sonne, Wind, Wasser. Stand: 2004.
URL: <http://www.tud.uni-duisburg-essen.de/exarb/imig/sonnewindwasser/reg-energie.html#33> (abgerufen am: 01.01.08 13:51Uhr).
- [27] US Department Of Energy: Wind. Stand: 03.06.2008.
URL: <http://www1.eere.energy.gov/buildings/residential/wind.html> (abgerufen am: 31.12.08 17:18Uhr).
- [28] World Windenrgy Association (WWEA): Netzintegration und Speicher. Stand: 2006. URL: <http://www.wwindea.org/technology/ch04/estructura-de.htm> (abgerufen am: 31.12.08 17:46Uhr).
- [29] World Windenrgy Association (WWEA): Spezialanwendung. Stand: 2006. URL: <http://www.wwindea.org/technology/ch05/estructura-de.htm> (abgerufen am: 31.12.08 17:52Uhr).
- [30] Wind Energy Market 2007/2008: BWE-Marktübersicht. 2007/2008.
- [31] Windfinder: Windstatistik Dakar. Stand: 2008. URL: http://www.windfinder.com/windstats/windstatistic_dakar.htm. (abgerufen am: 01.12.09 14:50Uhr).
- [32] Dörner: Privat-Windarchiv. Stand: 15.5.2006.
URL: <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,grossbild-624103-415921,00.html> (abgerufen am: 07.01.08 17:30Uhr).
- [33] Keytsman, Els: Microwindturbine. Stand: 05.07.2007. URL: <http://www.volkskrantblog.nl/pub/mm/1131039919.jpg> (abgerufen am: 07.01.08 17:30Uhr).
- [34] Encyclopedia Britannica: Savonius Rotor. Stand: 2007. URL: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/525828/Savonius-rotor> (abgerufen am: 07.01.08 17:30Uhr).
- [35] Schelter, Michael: Windrad mal anders. Stand: 26.02.2006.
URL: <http://www.michael-schelter.de/?p=53> (abgerufen am: 07.01.08 17:30Uhr).