

# Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe

F. Zotlöterer

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**30/2012**

**Impressum:**

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

# Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe

Dipl.-Ing. Franz Zotlöterer  
Einzelunternehmen Zotlöterer

Obergrafendorf, März 2011

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie



## Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula  
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie



# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	9
Abstract .....	11
1 Einleitung.....	13
2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt .....	15
2.1 Beschreibung des Standes der Technik.....	15
2.1.1 Schnellaufzahl und Leistungsbeiwert einer Kleinwindkraftanlage.....	16
2.1.2 Kleinwindkraftanlagen mit vertikaler und horizontaler Rotordrehachse .....	16
2.1.3 Generatorkonzepte für Kleinwindkraftanlagen.....	16
2.1.4 Masten für Kleinwindkraftanlagen.....	18
2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema.....	18
2.3 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts) .....	18
2.3.1 Anpassung der Kleinwindkraftanlage an das tatsächlich vorhandene Windgeschwindigkeitsangebot.....	19
2.3.2 Umgebungsgeräuschsensitive Rotordrehzahlregelung .....	20
2.3.3 Elektronisches Not-Aus-System .....	20
2.3.4 Mast-Knick-System .....	20
2.3.5 Kombination Kleinwindkraft und Erdwärme .....	21
2.4 Verwendete Methoden .....	21
2.5 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten .....	21
3 Ergebnisse des Projektes.....	22
3.1 Entwicklung einer Optimal-Kleinwindkraftanlage im Rahmen der aktuellen Bauordnung.....	22
3.2 Installation dreier Kleinwindkraftanlagen an typischen aber unterschiedlichen Standorten in unmittelbarer Nähe zu Einfamilienhäusern bzw. einem Kleinbetrieb .....	30
3.3 Test und Analysephase der drei Pilotanlagen.....	34
3.4 Entwicklung eines Prototyps einer Kleinwindkraftanlage für eine Serienfertigung ..	37
4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms .....	41
4.1 Einpassung in das Programm .....	41
4.2 Einbeziehung der Zielgruppen .....	41
4.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale .....	42
5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen .....	45
5.1 Erkenntnisse für das Projektteam .....	45
5.2 Perspektive für das Projektteam .....	45
5.3 Relevanz bzw. zukünftige Nutzung der Projektergebnisse .....	45
6 Ausblick und Empfehlungen.....	47
7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis .....	48
7.1 Literaturverzeichnis .....	48
7.2 Abbildungsverzeichnis.....	48
7.3 Tabellenverzeichnis.....	49



# **Kurzfassung**

## **Ausgangssituation/Motivation**

Die bisherigen vor allem negativen Erfahrungen von Kleinwindkraftanlagenbetreibern in Österreich haben uns dazu animiert, die Eigenschaften von Kleinwindkraftanlagen genau zu analysieren. Ein Grundproblem dabei stellt der auf die Windgeschwindigkeit bezogene Einsatzbereich von herkömmlichen Kleinwindkraftanlagen dar. Herkömmliche Kleinwindkraftanlagen sind überwiegend für hohe Windgeschwindigkeiten ( $>5$  m/s) ausgelegt, während die tatsächlich häufig vorkommenden Windgeschwindigkeiten bei geringer Masthöhe ( $<12$  m) im Binnenland niedrig ( $<4$  m/s) sind.

## **Inhalte und Zielsetzungen**

Auf die Analyse verschiedener Kleinwindkraft-Konzepte (H-Rotor, Rotor mit Windkonzentrator bzw. Winddiffusor, Propellerrotor in Kombination mit unterschiedlichen Generatoren und Wechselrichtern) folgt die kontinuierliche Entwicklung einer Optimal-Kleinwindkraft-Pilotanlage für geringe Windgeschwindigkeiten.

Übergeordnetes Projektziel ist es die Kleinwindkraft vor Ort für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe speziell in Hinblick auf Kombination mit oberflächennaher Erdwärme unter Einbeziehung der lokalen Bauordnung zu entwickeln.

## **Methodische Vorgehensweise**

Das systematische Vorgehen, um das Projektziel zu erreichen, orientiert sich an der Komplexität einer technischen Lösung, dem finanziellen Aufwand für die Fertigung und an der vor allem anzustrebenden hohen wirkungsgradmäßigen Effizienz der Kleinwindkraftanlage. In mehreren iterativen Schritten innerhalb dieser drei Eckpfeiler soll sich eine Optimal-Kleinwindkraft-Pilotanlage vor allem im praktischen Einsatz bewähren. Dafür wurde jeder erfolgsversprechenden Entwicklungsstufe eine Testphase in Form eines mehrwöchigen Dauerbetriebs eingeräumt.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Es konnten zahlreiche Erfahrungswerte im praktischen Betrieb und Ertragsergebnisse mit unterschiedlichen Kleinwindkraftanlagen bei niedriger mittlerer Windgeschwindigkeit in geringer Masthöhe gewonnen werden.

Das leistungsfähigste und gleichzeitig kostengünstigste Kleinwindkraftwerkskonzept für geringe Windgeschwindigkeiten ( $<6$  m/s) ist der elektronisch drehzahlgeregelte 2-Blatt-Propellerrotor samt rastfrei anlaufendem permanentmagneterregtem Synchrongenerator. Mit einer elektronischen Rotordrehzahlregelung lassen sich Kleinwindkraftanlagen einerseits auch bei sehr hoher Windgeschwindigkeit (Sturm) betreiben, andererseits können die Schallemissionen minimiert werden. In einer mehrjährigen Testphase hat sich speziell in den Wintermonaten gezeigt, dass die kombinierte Nutzung von Kleinwindkraft und Erdwärme eine zukunftsweisende ist, die sich gut ergänzt. Auf eine aufwendige Zwischenspeicherung von elektrischer Energie kann verzichtet werden.

Als Schlussfolgerung muss angemerkt werden, dass speziell die lokale Bauordnung die Größe und Höhe von Kleinwindkraftanlagen erheblich einschränkt, wodurch der elektrische Energiebedarf für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe durch Kleinwindkraftanlagen in windschwachen Regionen nur bedingt aufgebracht werden kann.

## **Ausblick**

Wenn in Zukunft in der Bauordnung vorgesehen wird, dass Kleinwindkraftanlagen so hoch gebaut werden dürfen, dass Sie über bestehende Bauwerke hinausragen dürfen, können vor Ort durchaus jene elektrischen Energiemengen erzeugt werden, um Einfamilienhäuser oder Kleinbetriebe versorgen zu können. Jedoch sind bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch eines Einfamilienhauses von 4000 bis 5000 kWh pro Jahr Kleinwindkraftanlagen mit einem Rotordurchmesser von 5 bis 10 m nötig. Derart großzügig bemessene Kleinwindkraftanlagen können bereits bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten eine gewisse Grundlast der Verbraucher ohne zusätzliche Aufwendungen für eine Energiezwischenspeicherung abdecken. Inwiefern die breite Bevölkerung Kleinwindkraftanlagen akzeptiert bzw. diese auch selbst in Zukunft nutzt, entscheidet einerseits die allgemeine Kostenentwicklung für Energie bzw. andererseits das Gefahrenpotential umweltschädigender Energiequellen, die unseren Lebensraum zerstören.

## **Abstract**

### **Starting point/Motivation**

The negative experience of owners of small wind turbines animates us to analyze small wind turbines more detailed. A main problem is the range of wind speed of conventional small wind turbines. Conventional small wind turbines are designed for high wind speed, but under on-shore conditions the wind speed is low (<4 m) also because of low masts (<12 m).

### **Contents and Objectives**

After finishing the analysis of different small wind turbine concepts (H-rotor, rotor with wind concentrators and wind diffusers, propeller-rotor with different generators and power converters) follows a continuous development of an optimal small wind turbine pilot system for low wind speed.

The main goal of the project is to develop small wind turbines for private houses and small firms especially in combination with heat pump systems regarding to the building regulations.

### **Methods**

The systematic strategy to reach the project goal is geared to the complexity of a technical solution, the financial effort for realization and the aspiration to a high efficiency small wind turbine system. In several iterative steps within these boundary conditions the small wind turbine system should be successful in practical applications. Therefore every well developing step will be tested for several months.

### **Results**

Several experiences in practical operation of small wind turbines at low wind condition with low masts can be made.

The most efficient small wind turbine concept for low wind speed (<6 m/s) is the electronic rotation speed regulated two blade propeller rotor with a permanent magnetic cogging less synchronous generator. With an electronic rotor speed regulation system small wind turbines can be in operation at very high wind speed, but it is also possible to reduce the noise emission. In a perennial test phase could be shown that especially in the winter months the combination of small wind power and geothermal heat is a forward-looking technology, which complement one another. An expensive buffer for electricity is needless.

As a conclusion must be observed, that especially the local building regulations reduce the potential of small wind turbines dramatically and so at low wind conditions only a small part of electricity can directly produce at private houses and small firms.

## **Prospects / Suggestions for future research**

At the time when the building regulation authority will admit that small wind turbine systems can be built a little bit higher than the existing buildings, then it will be possible to produce the electricity for private houses and small firms onsite. For generation of 4000 to 5000 kWh electricity for a single family house it is necessary to use small wind turbines with a rotor diameter between 5 and 10 m. Such amply dimensioned small wind turbines supply also at low wind speed the basic load of electric consumption without an energy buffer system. In which way the general public will accept and also use small wind turbines in the future depends on future costs of energy and on risks of non regenerative energy sources, which continuously destroy our environment.

# 1 Einleitung

Die immer rasanter steigenden Energiepreise in den letzten Jahren weisen darauf hin, dass das Energieangebot der ständig wachsenden Nachfrage nicht ganz folgen kann.

Geschichtlich betrachtet, hat sich das Stromversorgungsnetz in Europa ursprünglich aus zahlreichen einzelnen autonomen regionalen Netzen rund um kleinere Wasserkraftanlagen entwickelt, welche sich zunehmend untereinander vernetzten. Immer größere Wasserkraftanlagen, aber auch große kalorische Kraftwerke und schließlich Atomkraftwerke führten schließlich zu jenem zentralen Stromversorgungsnetz, welches die europäische Bevölkerung bis etwa im Jahr 2000 mit elektrischer Energie versorgte. Die jahreszeitlich bedingten Schwankungen der Energiegewinnung aus Wasserkraft wurden durch kalorische Kraftwerke ausgeglichen. Ausgehend von den Großkraftwerken verteilt sich der Strom nahezu sternförmig über Hoch-, Mittel- und Niederspannungsnetze bis zum Endverbraucher.

Seit etwa 2000 speisen vermehrt Großwindkraftanlagen in das zentrale Stromversorgungsnetz ein. Das Stromversorgungsnetz steht damit vor neuen Herausforderungen, um die oft sprunghaft ansteigenden Energiemengen von Großwindkraftanlagen verteilen oder beispielsweise über Pumpspeicherkraftwerke zwischenspeichern zu können. Bei Windstille hingegen müssen oft Gaskraftwerke rasch hochgefahren werden, um die nötigen Energiemengen für Verbraucher zur Verfügung zu stellen. Um das Stromversorgungsnetz bezüglich Spannung und Frequenz stabil halten zu können, wird das Stromnetz zunehmend intelligenter, indem Energieströme ständig überwacht und Erzeuger und Verbraucher aktiv einbezogen werden.

Während Großwindkraftanlagen auf der Hochspannungsebene meist über eigene Umspannwerke mit dem Stromversorgungsnetz verbunden sind, speisen Kleinwindkraftanlagen auf der Niederspannungsebene in das Stromversorgungsnetz ein.

Mit der Errichtung von Großwindkraftanlage muss wie oben erwähnt die Infrastruktur des Stromversorgungsnetzes deutlich ausgebaut werden.

Mit Kleinwindkraftanlagen wird hingegen ein anderer Weg beschritten, indem direkt beim Endverbraucher jene Energie erzeugt werden soll, die vor Ort benötigt wird. Mit Hilfe von kleinen Energiespeichersystemen steht sogar dann ausreichend Energie zur Verfügung, wenn von der Kleinwindkraftanlage kein oder nur ein sehr geringer Energiestrom fließt. Zusätzlich kann mit Hilfe einer Wärmepumpe samt Erdwärmenutzung die erzeugte Energie einer Kleinwindkraftanlage etwa verfünffacht und durch eine gute Wärmedämmung eines Hauses über Tage hinweg gespeichert werden. Somit gliedert sich das vorliegende Projekt in mehreren Varianten in das FFG-Förderprogramm „Haus der Zukunft Plus“.

Ob sich schließlich ein zentrales oder dezentrales Energiekonzept durchsetzt oder beide Systeme nebeneinander oder miteinander existieren wird die Zukunft zeigen.

Für große Windkraftanlagen sprechen die wesentlich höheren Energieerträge in Masthöhen von weit über 100 m. Jedoch ist der finanzielle und auch bürokratische Aufwand enorm, wenn gleichzeitig Hochspannungsleitungen zu oft sehr weit entfernten Pumpspeicherkraftwerken errichtet werden müssen und auf diesem Umweg nur mehr rund 50% der durch Großwindkraftanlagen erzeugten Energie beim Verbraucher ankommen. Interessant ist jedenfalls, dass es aktuell kaum mehr Windkraftanlagenhersteller gibt, die Windkraftanlagen im Leistungsbereich zwischen 50 kW und 500 kW anbieten. Momentan gibt es weltweit zahlreiche Hersteller von sehr kleinen Windkraftanlagen im Bereich von 100 W bis etwa 10 kW und es gibt einige Hersteller von immer leistungsfähigeren Großanlagen von 800 kW bis 7 MW.

Auf Grund der oft für den einzelnen zukünftigen Betreiber unzumutbar aufwendigen behördlichen Genehmigungsverfahren von Kleinwindkraftanlagen, ist es derzeit eher anzuzweifeln, dass sich beispielsweise 700 Kleinwindkraftanlagen mit je 10 kW gegenüber einer 7 MW Großwindkraftanlage durchsetzen können. Noch dazu muss angemerkt werden, dass eine 7 MW Großwindkraftanlage etwa mit 2300 äquivalenten Volllaststunden pro Jahr betrieben werden kann, während eine herkömmliche 10kW Kleinwindkraftanlage meist so dimensioniert ist, dass nur 800 äquivalenten Volllaststunden erreicht werden. Mit etwas größeren Rotoren können jedoch auch 10 kW Kleinwindkraftanlage mit 2300 oder auch mehr äquivalenten Volllaststunden pro Jahr konstruiert und betrieben werden und zu einer kontinuierlicheren Stromproduktion beitragen. Der zusätzliche Aufwand an größeren Rotorflächen würde den Aufwand für Stromspeichertechnologien wiederum verringern. Leider werden diesen wesentlichen Zusammenhängen aktuell noch wenig Aufmerksamkeit entgegen gebracht. Vielmehr entscheiden nicht ökologische aber oft auch nicht ökonomische sondern vielmehr energiepolitische Interessen welche Konzepte schlussendlich realisiert werden.

Das vorliegende Projekt „Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe“ zeigt die doch eher eingeschränkten Möglichkeiten von modernen Kleinwindkraftanlagen für unsere Energieversorgung auf Grund der aktuell gültigen Bauordnung in Österreich.

## 2 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

Unsere Zeit erfordert dringend neue Lösungen, um die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu reduzieren.

Die oberflächennahe Geothermie steht uneingeschränkt zur Verfügung und soll mit modernen Wärmepumpen für die Beheizung bzw. Klimatisierung von Gebäuden verwendet werden. Dafür wird rund ein Fünftel der Wärmeenergiemenge für den Betrieb der Wärmepumpe in Form von elektrischer Energie benötigt. Nachdem Gebäude wegen Undichtheiten der Gebäudehülle, wegen erhöhter Verdunstungswärmeabgabe an der Gebäudehülle und wegen eines beschleunigten Wärmetransports bei steigenden Windverhältnissen vermehrt Heizenergie benötigen, liegt es nahe, die Energie für den Betrieb der Wärmepumpe aus der Windkraft direkt vor Ort beim Gebäude zu gewinnen. Die Möglichkeit genau bei Energiebedarf regenerative Energie zur Verfügung zu haben, macht diese Variante der Energieversorgung besonders attraktiv, da zusätzliche Energiespeicher entfallen können.

Letztendlich entscheidet aber auch die Bauordnung vor Ort in wie weit die Kombination aus Windkraft und Geothermie genutzt werden kann.

Die bisherigen vor allem negativen Erfahrungen von Kleinwindkraftanlagenbetreibern in Österreich haben uns dazu animiert, die Eigenschaften von Kleinwindkraftanlagen genau zu analysieren. Ein Grundproblem dabei stellt der auf die Windgeschwindigkeit bezogene Einsatzbereich von herkömmlichen Kleinwindkraftanlagen dar. Herkömmliche Kleinwindkraftanlagen sind überwiegend für hohe Windgeschwindigkeiten ( $>5$  m/s) ausgelegt, während die tatsächlich häufig vorkommenden Windgeschwindigkeiten bei geringer Masthöhe ( $<12$  m) im Binnenland niedrig ( $<4$  m/s) sind.

In den folgenden Arbeitspaketen und den zugehörigen Meilensteinen werden in der praktischen Umsetzung Erfahrungswerte gesammelt und diese als Impuls für weitere Entwicklungsstufen herangezogen.

Das gesamte Projekt soll schließlich Aufschluss geben, welcher Anteil des Energiebedarfs von Gebäuden durch die Kombination aus Kleinwindkraft und Geothermie gedeckt werden kann bzw. welche Voraussetzungen für eine dezentrale Energieversorgung nötig sind.

### 2.1 Beschreibung des Standes der Technik

Aktuell gibt es eine große Zahl an Herstellern von Kleinwindkraftanlagen im Leistungsbereich von 100 W bis etwa 10 kW. Ebenso sind die technischen Konzepte dahinter vielfältig. Wie aus der einschlägigen Fachliteratur bekannt, gibt es schnell und langsam laufende Rotorkonzepte, Rotorkonzepte mit vertikaler und horizontaler Rotordrehachse, Generatorkonzepte mit und ohne Getriebe, die direkt mit dem 50Hz-Wechselstromnetz gekoppelt sind, aber auch solche, die über einen elektronischen Wechselrichter in das 50Hz-Wechselstromnetz einspeisen. Kleinwindkraftanlagen besitzen entweder einen eigenen Mast

samt Fundament oder können direkt auf ein Gebäude installiert werden. Im Folgenden werden die wesentlichen technischen Merkmale einer Kleinwindkraftanlage angeführt.

### **2.1.1 Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert einer Kleinwindkraftanlage**

Aus bisherigen theoretischen und praktischen Untersuchungen sind hohe Leistungsbeiwerte nur mit hohen Schnelllaufzahlen von Windrotoren erreichbar.

Die Schnelllaufzahl eines Windrotors einer Kleinwindkraftanlage (KWKA) beschreibt das Verhältnis zwischen der Umfangsgeschwindigkeit der Rotorblattspitze und der Windgeschwindigkeit.

Der Leistungsbeiwert gibt an wie viel Energie der Rotor einer KWKA aus dem Wind entnehmen kann. Der maximale Wert liegt nach dem Physiker Betz bei 0,59.

Bei Einblattrotoren liegt der optimale Leistungsbeiwert bei einer Schnelllaufzahl von 15.

Bei Zweiblattrotoren liegt der optimale Leistungsbeiwert bei einer Schnelllaufzahl von 11.

Bei Dreiblattrotoren liegt der optimale Leistungsbeiwert bei einer Schnelllaufzahl von 7,5.

### **2.1.2 Kleinwindkraftanlagen mit vertikaler und horizontaler Rotordrehachse**

Auf Grund der deutlich höheren Schnelllaufzahl und damit auch des höheren Leistungsbeiwerts haben sich bei Windkraftanlagen eindeutig Rotoren mit horizontaler Drehachse gegenüber jenen mit vertikaler Drehachse durchgesetzt.

### **2.1.3 Generatorkonzepte für Kleinwindkraftanlagen**

Die Baugröße und das Gewicht eines Generators werden umso kleiner, je größer die Generatordrehzahl gewählt werden kann. Deswegen werden bevorzugt Rotoren mit hoher Schnelllaufzahl für die Stromproduktion eingesetzt und es kann gegebenenfalls auf ein Getriebe zwischen Rotor und Generator verzichtet werden. Unabhängig vom Generatorkonzept gelten im verlustlosen Idealfall folgende wesentlichen Zusammenhänge auf Grund der Lorenzkraft und des Induktionsgesetzes.

$$P = F \cdot v = F \cdot r \cdot \omega = L \cdot \omega = U \cdot I = v \cdot B \cdot l \cdot I$$

$P$  ...Leistung (mechanische Leistung entspricht elektrischer Leistung)

$F$  ...Kraft am mittleren Umfang des Generators

$v$  ...Tangentialgeschwindigkeit am mittleren Umfang des Generators

$r$  ...mittlerer Radius

$\omega$  ...Kreisfrequenz

$L$  ...Drehmoment

$U$  ...Generatorspannung

$I$  ...Generatorstrom

$B$  ...Magnetfeld des Generatorrotors am mittleren Umfang des Generators

$l$  ...Länge des ruhenden Generatorspulendrahtes am mittleren Umfang des Generators im mit der Kreisfrequenz  $\omega$  drehenden Magnetfeld

Der Wirkungsgrad eines Generators kann durch Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit  $v$  (Erhöhung der Generatordrehzahl oder Vergrößerung des Generatordurchmessers) und Verkürzung des wirksamen Generatorspulendrahtes  $l$  (Verringerung der Generatorinnenwiderstandes) gesteigert werden. Das bedeutet für die Praxis, dass, vereinfacht ausgedrückt, ein (leichter und kostengünstiger) Generator mit geringem Durchmesser für eine hohe Generatoreffizienz mit hoher Drehzahl betrieben werden muss, während ein (schwerer und teurer) Generator mit großem Durchmesser auch bei niedriger Drehzahl einen hohen Wirkungsgrad erreichen kann.

### **2.1.3.1 Asynchrongenerator für Kleinwindkraftanlagen**

Der kostengünstige aber sehr robuste Asynchrongenerator wird für die Windkraft meist als 4 (1500 rpm) oder 6 (1000 rpm) -polige Maschine gefertigt und im direktem Netzparallelbetrieb in Kombination mit einem kompakten Zahnradgetriebe verwendet.

Der lastabhängige Schlupf der Asynchronmaschine bietet den Vorteil, dass bei plötzlichem Lastwechsel durch Windböen eine gewisse Dämpfung durch eine geringfügige Variabilität der Rotordrehzahl gegeben ist.

Mit polumschaltbaren Asynchronmaschinen lassen sich außerdem bei direktem Netzparallelbetrieb zwei unterschiedliche Rotordrehzahlen schaltbar realisieren. Mit Hilfe von Leistungselektronik kann die Rotordrehzahl auch in einem größeren Drehzahlbereich variabel geregelt werden.

### **2.1.3.2 Synchrongenerator für Kleinwindkraftanlagen**

Auf Grund des hohen Drehmoments und des hohen Wirkungsgrads einer permanentmagneterregten Synchronmaschine eignet sich dieser Generatortyp besonders gut für Kleinwindkraftanlagen.

Die meist dreiphasige Generatorwechselspannung wird gleichgerichtet und über einen netzgeführten Wechselrichter in das vorhandene 50Hz-Wechselstromnetz eingespeist. Mit

einem modernen Wechselrichter kann der Generator samt Rotor in einem breiten Drehzahlbereich betrieben werden.

Die permanentmagneterregten Synchronmaschinen bieten außerdem den Vorteil, dass einerseits durch Kurzschließen des Generators der Rotor zum Stillstand gebracht werden kann und andererseits ermöglicht die Wechsellspannungsfrequenz eines direkt mit dem Rotor gekoppelten Synchrongenerators eine exakte Auswertung der Rotordrehzahl.

#### **2.1.4 Masten für Kleinwindkraftanlagen**

Als Masten für Kleinwindkraftanlagen dienen mit Seilen abgespannte Masten, Gittermasten, Metallrohrmasten aber auch sich nach oben hin verjüngende Schleuderbetonmasten auf massiven Betonfundamenten.

## **2.2 Beschreibung der Vorarbeiten zum Thema**

Begonnen wurden die Vorarbeiten zum Thema „Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe“ ähnlich wie bei einer konkreten Projektumsetzung einer Kleinwindkraftanlage an einem neuen Standort.

Welche Windenergiepotentiale sind an typischen Kleinwindkraftanlagenstandorten im Binnenland vorhanden und mit welchem technischen Aufwand sind diese in elektrische Energie (Jahresarbeitsvermögen) umsetzbar?

Welche rechtlichen Rahmenbedingungen müssen beachtet werden?

Wie gut funktionieren bekannte Kleinwindkraftkonzepte tatsächlich und wo besteht Verbesserungspotenzial?

## **2.3 Beschreibung der Neuerungen sowie ihrer Vorteile gegenüber dem Ist-Stand (Innovationsgehalt des Projekts)**

Die Konzeptionierung einer Kleinwindkraftanlage für geringe Windgeschwindigkeiten erfordert spezielle Erfahrung im Bereich Meteorologie, Aerodynamik, Fertigungstechnik, Maschinenbau, Elektrotechnik und Elektronik.

Der maßgebliche Innovationgehalt des Projekts „Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe“ liegt im interdisziplinären Zugang auf diese Wissensgebiete und ermöglicht auch die Windenergiepotentiale an Standorten mit geringer mittlerer Windgeschwindigkeit zu nutzen.

### **2.3.1 Anpassung der Kleinwindkraftanlage an das tatsächlich vorhandene Windgeschwindigkeitsangebot**

Der erste und wesentliche Schritt ist es den Windenergiewandler an die tatsächlich häufig vorkommenden geringen Windgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 2m/s und 6m/s zu optimieren bzw. anzupassen.

#### **2.3.1.1 Rotor für geringe Windgeschwindigkeit**

Der Ist-Stand im Bereich der Windkraftnutzung zeigt, dass überwiegend Windkraftanlagen mit 3-Blatt-Propeller-Rotoren im Einsatz sind. Dies gilt auch für Kleinwindkraftanlagen. Jedoch lässt sich zeigen, dass speziell bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten eine Kleinwindkraftanlage mit 2-Blatt-Propeller-Rotor deutlich bessere Energieerträge liefert als eine Kleinwindkraftanlage mit 3-Blatt-Propeller-Rotor. Ursache ist die höhere Schnelllaufzahl des 2-Blattrotors, die eine höheren Generatordrehzahl und damit eine um 15 % höhere Generatoreffizienz ermöglicht.

#### **2.3.1.2 Rotor samt Generator mit rastfreien Anlauf und elektronischer Drehzahlregelung**

Die meisten Kleinwindkraftanlagen nutzen eine P/U-Kennlinie am Vdc-Spannungseingang des Wechselrichters. Für einen ruhigen kontrollierten Lauf des Rotors einer Kleinwindkraftanlage ist eine programmierbare P/f-Kennlinie am Vdc-Spannungseingang des Wechselrichters wegen der zusätzlichen Kompensation des Generatorinnenwiderstandes wesentlich besser geeignet. Damit wird erreicht, dass bei einer Windböe die Spannung am Generator zurückgeregelt wird, wodurch die Rotordrehzahl auch bei hohen Windgeschwindigkeit konstant gehalten werden kann (Stallregelung) und folglich eine Überlastung des Generator bzw. damit der Gesamtanlage vermieden werden kann.

#### **2.3.1.3 Wechselrichter mit geringer Anlaufleistung und einer P/f programmierbaren Eingangsspannungskennlinie**

Für die Netzsynchrosation soll der Leistungs- und Energieaufwand (Synchronisationszeitspanne) eines netzgeführten Wechselrichters so gering wie möglich sein, um auch geringe Energiemengen in das Stromnetz einspeisen zu können.

Um eine wirksame Stallregelung des Rotors zu erreichen, sollte der netzgeführte Wechselrichter vorzugsweise mit einer ausreichend genau programmierbaren P/f-Kennlinie für die Eingangsspannung ausgestattet sein.

Für die Einspeisung von elektrischer Energie in einem weiten Windgeschwindigkeitsbereich ist ein netzgeführter Wechselrichter mit einem möglichst hohen Eingangsspannungsbereich (Rotordrehzahlbereich) für ein Kleinwindkraftwerk nötig.

### **2.3.2 Umgebungsgeräuschsensitive Rotordrehzahlregelung**

Das Strömungsgeräusch eines Propellerrotors steigt mit der 5-Potenz der Geschwindigkeit der Rotorblattspitzen. Besonders störend wird das ansteigende pfeifende Geräusch bei hoher Rotordrehzahl bei tendenziell sinkender Umgebungsgeräuschkulisse in der Nacht wahrnehmbar. Mit Hilfe der Aufnahme des Umgebungsgeräuschpegels durch ein von der Windkraftanlage abgewandtes Mikrofon steht ein Steuersignal zur Verfügung, um die Rotordrehzahl soweit zu reduzieren, dass die Umgebungsgeräusche überwiegen. Mit Hilfe eines Wechselrichters dessen Kennlinie für die Eingangsspannung des Generators über eine Schnittstelle durch das akustische Steuersignal geändert werden kann, steigt die elektrische Belastung des Generators bei sinkendem Umgebungsgeräusch. Damit sinkt die Rotordrehzahl und somit die aerodynamische Geräuschentwicklung des Rotors.

Der Vorteil der umgebungsgeräuschsensitiven Rotordrehzahlregelung über die Kennlinie des Wechselrichters liegt darin, dass weiterhin die gesamte vom Generator generierte elektrische Energie vollständig dem Wechselrichter zugeführt wird.

### **2.3.3 Elektronisches Not-Aus-System**

Für den Fall, dass die elektrische Verbindung zwischen Generator und Wechselrichter beispielsweise durch einen Kabelbruch Schaden nimmt und damit die Rotordrehzahl ungebremst zunehmen kann, wird die Generatorspannung bereits in der Gondel ständig überwacht. Ein Spannungsüberwachungsmodul bremst den Rotor bei Überschreiten einer definierten maximalen Generatorspannung durch Auslösen eines Kurzschlusses an den Generatorklemmen. Der Vorteil dieses elektronischen Not-Aus-Systems liegt darin, dass im Fall einer unerwarteten Trennung von Generator und Wechselrichter vom Generator sofort die Leerlaufspannung anliegt und diese unmittelbar das Spannungsüberwachungsmodul aktiviert und den Rotor abbremst. Durch ein Restsignal über das wieder in Stand gesetzte Kabel zwischen Generator und Wechselrichter kann das Spannungsüberwachungsmodul deaktiviert werden und die Kleinwindkraftanlage in Betrieb genommen werden.

### **2.3.4 Mast-Knick-System**

Die Platzverhältnisse rund um eine Kleinwindkraftanlage sind oft eingeschränkt. Ein Mast der etwa in der Mitte gekickt werden kann, um Gondel samt Rotor für Servicezwecke oder für die Montage abzusenken benötigt relativ wenig Platz. Nach Lösen der Sicherungsschraubverbindungen kann die obere Masthälfte mit Hilfe einer Seilwinde samt Handkurbel über eine Umlenkrolle geneigt werden. Bei abgesenkter Mastspitze ist der Rotor

gut zugänglich und kann in geringer Höhe über Grund exakt gewuchtet werden, um auch bei sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten anzulaufen.

### **2.3.5 Kombination Kleinwindkraft und Erdwärme**

Ein wesentlicher Aspekt bei der Nutzung regenerativer Energiequellen ist deren zeitliche Verfügbarkeit.

Bei kräftigem Wind kühlt die äußere Hülle eines Gebäudes rasch ab und es wird vermehrt Wärmeenergie zur Klimatisierung der Innenräume benötigt.

Der Vorteil in der Kombination von Kleinwindkraft und Erdwärme ist deren gemeinsame Verfügbarkeit zu Zeiten in denen tatsächlich Heizbedarf für ein Gebäude nötig ist.

## **2.4 Verwendete Methoden**

Die angewandten Methoden waren Recherche, Berechnung, Modellbildung, Simulation, Praxistest samt Analyse und iterative Lösungsverfahren.

Recherche der Theorie zur Technologie von Windkraftanlagen.

Berechnung des theoretisch erreichbaren Energiepotentials.

Recherche nach realisierten Kleinwindkraftkonzepten.

Praxistest an zahlreichen Modellen.

Abwägen der Vor- und Nachteile unterschiedlicher Kleinwindkraftkonzepte.

Entwicklung eines durchgängig energieeffizienten Kleinwindkraftkonzepts.

Minimierung der Komplexität im technischen Aufbau.

Erweiterung bzw. stetige Optimierung des Grundkonzepts durch iterative Lösungsverfahren in der praktischen Umsetzung.

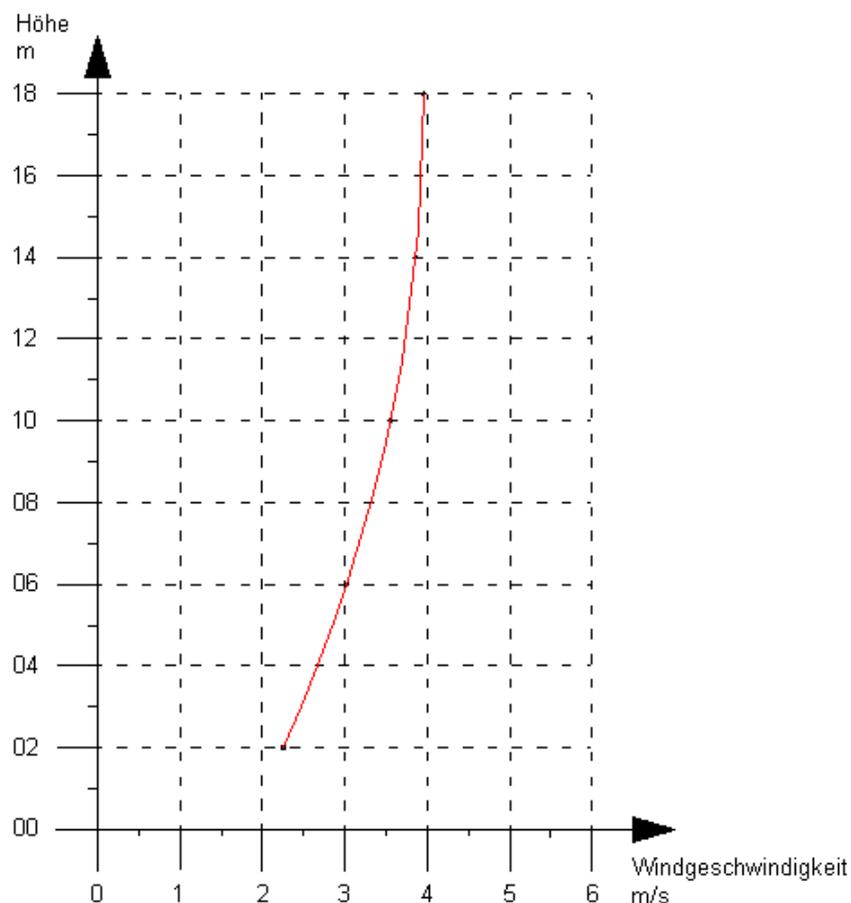
## **2.5 Beschreibung der Vorgangsweise und der verwendeten Daten**

Die angeführten Windgeschwindigkeitswerte wurden mit Hilfe von Anemometern auf einem eigenen Mast vor Ort, wie in Abb. 2 zu sehen, ermittelt. Die Leistungs- bzw. Energiewerte wurden entweder für theoretische Überlegungen bzw. Prognosen aus den Windgeschwindigkeitsmesswerten berechnet oder direkt von den Leistungs- bzw. Energieanzeigen der Wechselrichter übernommen.

### 3 Ergebnisse des Projektes

#### 3.1 Entwicklung einer Optimal-Kleinwindkraftanlage im Rahmen der aktuellen Bauordnung

Im Rahmen der aktuellen Bauordnung ist für Kleinwindkraftwerke vor allem die maximal zulässige Bauhöhe am Standort interessant. Bei glatter Beschaffenheit der Erdoberfläche steigt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe stetig an. In bebautem Gebiet herrschen in geringer Höhe jedoch überwiegend turbulente Strömungsverhältnisse vor, die sich zusätzlich in Abhängigkeit von der Hauptwindrichtung ändern. Eine diesbezügliche Strömungssimulation ist äußerst schwierig zu generieren. An Teststandort-1 wurde der Windgeschwindigkeitsanstieg über der Erdoberfläche siehe Abb. 1 mit mehreren Windgeschwindigkeitsmessgeräten (Schalenkreuz-Anemometer) siehe Abb. 2 in unterschiedlichen Höhen auf einem abgespannten Mast gemessen. Der gemessene Geschwindigkeitsanstieg entspricht jenem, der in der einschlägigen Fachliteratur zu finden ist.



*Abb.1: Gemessener Windgeschwindigkeitsanstieg in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche an Teststandort-1 bei einer Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s in 10 m Höhe*

### 3.1.1 Analyse der vom Antragsteller konstruierten und betriebenen Kleinwindkraftanlagen

Vom Projekteinreicher wurden zahlreiche vom Rotorprinzip unterschiedliche Kleinwindkraftkonzepte in geringer Masthöhe (10 m) in einem typischen Siedlungsgebiet getestet. Die Anlagen wurden an den Standort adaptiert bzw. optimiert und im praktischen Betrieb speziell auf ihre Effizienz hin erprobt.



*Abb. 2: Grundsätzliche Situation der getesteten Kleinwindkraftkonzepte samt Windgeschwindigkeitsmeßsystem mit mehreren Schalenkreuz-Anemometern auf eigenem Mast*

Über die Schalenkreuz-Anemometer und über die Leistungsanzeige bzw. den Stromzähler des Wechselrichters stehen die Messwerte bezüglich Windgeschwindigkeit, Leistung und Energie zu Verfügung und ermöglichen mit den technischen Daten der verwendeten Generatoren eine genaue Analyse der unterschiedlichen Kleinwindkraftkonzepte.

Bei einer am Teststandort-1 siehe Abb.1 und 6 verfügbaren mittleren Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s, einem anzustrebenden guten mittleren Rotorleistungsbeiwert für eine Kleinwindkraftanlage von 0,4 und einem gegebenen mittleren Generator- samt Wechselrichterwirkungsgradfaktor von 0,78 ergibt sich rein theoretisch ein pro 1 m<sup>2</sup> Rotorfläche erzielbares Jahresarbeitsvermögen von rund 77 kWh/anno.

$$E = P \cdot t = \frac{1}{2} \cdot A_{\text{Rotor}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot C_P \cdot v_{\text{Wind}}^3 \cdot \eta_{\text{Generator}} \cdot t$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot 1 \text{m}^2 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,4 \cdot \left(3,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 \cdot 0,78 \cdot 8760 \text{h} = 77 \text{kWh}$$

Die tatsächlich erreichten Jahresarbeitsvermögen pro 1 m<sup>2</sup> Rotorfläche lagen je nach getestetem Kleinwindkraftkonzept – siehe unterschiedliche Rotortypen in Tabelle 1 - zwischen 15 und 71 kWh/anno.

Rotortyp	Rotorfläche (m <sup>2</sup> )	theoretischer Jahresertrag (kWh)	erzielter Jahresertrag (kWh)	erzielter Jahresertrag/ 1 m <sup>2</sup> (kWh)
H-Rotor  - mit herkömmlichen Blattprofil für Selbstanlauf ab 4,6m/s	3,5	343	53	15
H-Rotor  - mit speziellem Blattprofil für Selbstanlauf ab 1,9m/s	3,5	343	63	18
Propellerrotor  - Zweiblattrotor  - mit Eklipen-Regelung	10	980	574	57
Propellerrotor  - Zweiblattrotor-Propeller  - mit elektronischer Drehzahlbegrenzung	10	980	638	64
Optimierter Propellerrotor  - Zweiblattrotor-Propeller  - mit elektronischer Drehzahlbegrenzung	16	1567	1143	71
Optimierter Propellerrotor  - Zweiblattrotor-Propeller  - mit elektronischer Drehzahlbegrenzung  - Integrierte Schwingungsdämpfer	16	1567	1143	71

*Tabelle 1: Stromerträge der getesteten Kleinwindkraftkonzepte*



*Abb. 3: H-Rotor ( $3,5\text{m}^2$ ) mit Flügelblattprofil mit großer Flügeltiefe - Selbstanlauf bei  $1,9\text{m/s}$*



*Abb.4: Zweiblatt-Propellerrotor ( $16\text{m}^2$ ) mit elektronischer Drehzahlbegrenzung – Selbstanlauf bei  $1,3\text{m/s}$*

## Resümee:

- Bezüglich Effizienz konnte sich auch bei schwachen und turbulenten Windverhältnissen der weniger schnellläufige H-Rotor nicht gegen den klassischen LUV-seitig laufenden Propellerrotor durchsetzen.
- Die überlegene Schnellläufigkeit und die hohe Dynamik des Zweiblatt-Propellerrotors auch bei geringer Windgeschwindigkeit machen sich in Kombination mit dem getriebelosen Generatorkonzept jedoch eindeutig in einem höheren Stromertrag bemerkbar.
- Die geringere Angriffsfläche des Zweiblatt-Propellerrotors ermöglicht bei extremen Windverhältnissen eine wirksam umsetzbare Stallregelung des Rotors durch eine elektronische Drehzahlbegrenzung mit Hilfe des Generators und der programmierbaren Kennlinie für die Eingangsspannung des netzgeführten Wechselrichters.
- Die Eklipsenregelung mit schwenkbarer Windfahne reduziert zwar wirkungsvoll die Leistung bei extremen Windverhältnissen, kann jedoch bei einem Propellerrotor mit elektronischer Drehzahlbegrenzung entfallen.
- Mit einem zwischen dem Generator und der Gondel integrierten Schwingungsdämpfer wird die Körperschallübertragung auf Gondel und Mast und damit die Schallabstrahlung insgesamt deutlich reduziert.

### **3.1.2 Ausarbeitung eines Optimal-Konzeptes für eine Schwachwindkraftanlage, welche innerhalb der bestehenden Bauordnung realisierbar ist**

In niedriger Masthöhe liegt die Windgeschwindigkeit überwiegend unter 6 m/s. Somit sollte auch von einer Kleinwindkraftanlage dieser Windgeschwindigkeitsbereich vorrangig und optimal genutzt werden können. Die Strömung ist wegen der meist geringen Distanz zu Strömungshindernissen überdies meist turbulent. Um die Windenergie auch bei Schwachwindverhältnissen in elektrische Energie umwandeln zu können, sind folgende Punkte wesentlich:

- Um einen Rotor- bzw. Generatoranlauf bei möglichst geringer Windgeschwindigkeit zu ermöglichen müssen einerseits die Rotorblätter auch bei geringer Windgeschwindigkeit genügend Drehmoment liefern, um den Generator aus der Ruhelage bewegen zu können. Hierzu muss das Blattprofil mit zunehmender Profillänge und mit stärker werdender Verwindung bis zur Blattwurzel geführt werden. Hier kann beispielsweise auf die modernen hocheffizienten Rotorblätter des deutschen Großwindkraftanlagenherstellers Enercon verwiesen werden.
- Andererseits darf der Generator im elektrisch unbelasteten Zustand über kein Rastmoment verfügen und leicht anlaufen können.

- Die Wuchtung von Rotor und Generator sollte, um jegliche unnötigen Vibrationen zu vermeiden, gegen Null gehen.
- Ebenso muss die Windnachführung einer Kleinwindkraftanlage mit horizontaler Rotordrehachse auch bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten exakt funktionieren. Um zusätzlich den Standby-Energieaufwand möglichst gering zu halten, ist die klassische Windnachführung mit passiver Windfahne eine sehr effiziente und präzise Methode. Der Schwerpunkt der Gondel samt Rotor und Generator muss hierfür über dem Azimutlager liegen. Mit dem Rotor samt Generator auf der windzugewandten Seite und der Windfahne auf der windabgewandten Seite kann der Schwerpunkt ohne zusätzlichen Ballast über den Auflagepunkt des Masts geführt werden.
- Für einen hohen Wirkungsgrad der gesamten Kleinwindkraftanlage ist eine genaue Abstimmung des Rotors auf den Generator und die Einspeiseelektronik nötig. Der Synchronisationsprozess der Einspeiseelektronik benötigt eine Mindestleistung und auch eine Mindestenergie (Dauer der Synchronisation), die vom Rotor und Generator bereit gestellt werden müssen. Mit dem Leistungsbeiwert des Rotors, dem Generatorwirkungsgrad und der gegebenen Windgeschwindigkeit, ab der in das Netz eingespeist werden soll, kann die nötige Mindestrotorfläche berechnet werden.

Zusätzlich sind die **Vorschriften der lokalen Bauordnung** zu beachten:

- Je nach Bauklasse eines Siedlungsgebietes kann die maximale Höhe einer Kleinwindkraftanlage zwischen etwa 6 und 14 m variieren.
- Auch bezüglich der Lärmemission sind die zulässigen Maximalwerte unterschiedlich. Sie sollten jedenfalls unter 45 dB(A) an der Grundstücksgrenze sein. Wenn die Windkraftanlage im Siedlungsgebiet installiert wird, so ergeben sich speziell in der Nacht, wenn der Pegel von Umgebungsgeräuschen wie beispielsweise dem Straßenverkehr deutlich zurück geht, hohe Anforderungen an einen geräuscharmen Betrieb. Hier können bereits Schallemissionen von 40 dB(A) in 10 m Entfernung für direkte Anrainer als störend empfunden werden. Andererseits steigt das Umgebungsgeräusch auch mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Genau wegen dieser Vielzahl von Möglichkeiten kann ein definierter Schallemissionsgrenzwert bei einer ungünstigen örtlichen akustischen Situation, wo sich die Schallemissionen einer Kleinwindkraftanlage etwa in einem Innenhof einer Wohnanlage sammeln, unzureichend sein bzw. kann bei freier Schallabstrahlung und hohem Windgeräuschanteil von Sträuchern und Bäumen auch deutlich übertroffen werden.
- Wesentliche Schallemissionen von Kleinwindkraftanlagen entstehen durch die Strömungsgeräusche an den Rotorblattspitzen. Bei 8 m/s Windgeschwindigkeit ergibt sich eine Blattspitzengeschwindigkeit von 60 m/s (216 km/h) bei einem Dreiblattrotor mit einer Schnelllaufzahl von 7,5. Die Strömungsgeräusche liegen bei modernen Blattprofilen und entsprechend steifen Rotorblattmaterialien aus GFK unter 40 dB(A) in 10 m Entfernung. Der Zweiblattrotor mit einer Schnelllaufzahl von 10 erreicht diesen Geräuschpegel bereits bei etwa 6 m/s Windgeschwindigkeit.

- Zusätzlich kann auch der Generator unter Last bei unzureichender Schallisolierung auf die Rotorblätter und oder auf den Mast Brummgeräusche übertragen, wodurch es zu einer großflächigen und damit beträchtlichen Schallabstrahlung kommt.

#### **Resümee:**

- In Anbetracht geringer Lärmemissionen und der überwiegend vorherrschenden niedrigen Windgeschwindigkeitsverhältnisse ist es sinnvoll den Arbeitsbereich einer Kleinwindkraftanlage bezogen auf die Windgeschwindigkeit auf bis zu maximal 8m/s ein zu schränken, um an möglichst vielen Tagen im Jahr eine gewisse Grundlastabdeckung des Energiebedarfes eines Einfamilienhauses oder eines Kleinbetriebes durch eine Kleinwindkraftanlage zu erreichen. Diese Anforderungen widersprechen dem Wunsch von Kleinwindkraftanlagenherstellern zu möglichst niedrigen Kosten eine überaus leistungsstarke Kleinwindkraftanlage anbieten zu können, um sich gegen die vielfältige Konkurrenz durchsetzen zu können. Eine große Rotorfläche kostet eben einmal deutlich mehr als eine kleine und zusätzlich verlangt eine große Rotorfläche einen wesentlich robusteren Aufbau, um bei Sturm und turbulenten Böen die nötige Sicherheit für die Anlage gewährleisten zu können.
- Aus den bisherigen Betrachtungen setzt sich für das Optimalkonzept einer Kleinwindkraftanlage ein Zweiblattrotor mit rastfrei anlaufendem hocheffizienten permanentmagneterregten Synchrongenerator durch. Um den Standby-Verbrauch zu minimieren erfolgt die Windnachführung über eine klassische Windfahne. Die Leistungsbegrenzung wird über eine Stallregelung des Rotors mit Hilfe einer elektronischen Drehzahlbegrenzung des Generators erreicht. Die Netzeinspeisung erfolgte über einen netzgeführten Wechselrichter und Steuerelektronik mit Spannungsbegrenzung, Hand-Not-Aus-Schalter und automatischer Überlast-Not-Abschaltung.

### **3.1.3 Gliederung der Gesamtkonstruktion in einfache Baugruppen, um durch Varianten von einzelnen Baugruppen eine einfache Anpassung an unterschiedliche Standortbedingung durchführen zu können**

Die Standortbedingungen unterscheiden sich in erster Linie bezüglich der vorherrschenden Windverhältnisse und auf Grund der vor Ort gültigen Bauordnung bezüglich der maximalen Masthöhe.

Im Allgemeinen steigt die Windgeschwindigkeit mit zunehmender Masthöhe. Somit kann speziell nach genauerer Analyse der vorherrschenden Windverhältnisse am zukünftigen Standort die nötige Rotorgöße samt Auslegung des Generators berechnet werden, während die Gondelkonstruktion samt Leistungselektronik gleich bleiben kann.

Die wesentlichen Baugruppen der Kleinwindkraftanlage sind Rotorblätter, Generator, Gondel, Mast, Fundament, Steuerelektronik und netzgeführter Wechselrichter, die standortbezogen dimensioniert werden können.

### 3.1.4 Erstellung der Detailpläne und Fertigung eines Prototypen

Als Prototyp einer Kleinwindkraftanlage wurde schließlich ein Dreiblattrotor mit hocheffizientem permanentmagneterregten Synchronscheibengenerator realisiert.

Die Rotordrehzahl wurde ab einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s elektronisch konstant gehalten, um die Geräuschemissionen für möglichst alle Betriebszustände auf einem Niveau unter 44 dB in 10 m Entfernung zu halten.

Die Einspeisung der elektrischen Energie in das öffentliche Stromnetz übernimmt ein netzgeführter Wechselrichter dessen Leistungsaufnahme durch eine P/f-Kennlinie der Eingangsspannung des Wechselrichters in Abhängigkeit von der Generatorfrequenz und damit exakt von der Rotordrehzahl programmiert werden kann.



*Abb.5: Dreiblatt-Propellerrotor (4,5m Rotordurchmesser) mit elektronischer Drehzahlbegrenzung*

### 3.1.5 Installation, Optimierung und Inbetriebnahme sowie Analyse und Auswertung der Prototypenanlage

Die Installation der Prototypenanlage erfolgte am Teststandort-1. In wenigen Metern Entfernung wurde eine Windmessstation auf einem abgespannten Mast errichtet.

Nach der Programmierung einer auf den Rotor samt Generator bezogenen optimierten Kennlinie der Eingangsspannung des netzgeführten Wechselrichters konnten folgende Daten für die Prototypenanlage ermittelt werden.

Masthöhe	10 m
Rotordurchmesser des 3-Blatt-Propeller-Rotor	4,5 m
Schnellaufzahl	7,5
Rotordrehzahl elektronisch begrenzt (Stall ab 8 m/s Windgeschw.)	maximal 255 U/min
Maximale elektrische Leistung (bei 8 m/s Windgeschw.)	1820 W
Windgeschwindigkeit für Netzeinspeisung	ab 1,9 m/s
Maximaler Leistungsbeiwert	0,42
Permanentmagneterregte Synchronmaschine	24-polig
Maximaler Generatorwirkungsgradfaktor	0,92
Eingangsspannungsbereich des netzgeführten Wechselrichters	50 bis 500 Vdc
Maximaler Wirkungsgradfaktor des Wechselrichters	0,96
Gesamtwirkungsgrad (bei 8m/s Windgeschw.)	0,37
Mittlerer Gesamtwirkungsgrad (zw. 2 und 8 m/s Windgeschw.)	0,32
Maximale Geräuschemission in 10m Entfernung vom Mastfuß	44 dB

*Tabelle 2: Technische Daten der Prototypenanlage*

## **3.2 Installation dreier Kleinwindkraftanlagen an typischen aber unterschiedlichen Standorten in unmittelbarer Nähe zu Einfamilienhäusern bzw. einem Kleinbetrieb**

### **3.2.1 Auswahl von drei typischen aber unterschiedlichen Kleinwindkraftstandorten**

Um ein möglichst repräsentatives Ergebnis bezüglich der elektrischen Energiegewinnung durch Kleinwindkraftanlagen zu erhalten, wurden drei möglichst unterschiedliche, aber jeweils typische Standorte in der Nähe von Gebäuden gewählt.

Bei der Auswahl der Teststandorte stand eine praxisnahe Umsetzung im Vordergrund. Gebäude und Liegenschaft auf der die Kleinwindkraftanlagen errichtet wurden, gehören jeweils demselben Besitzer. Es wurde lediglich versucht auf den gewählten Liegenschaften einen möglichst windbegünstigten Teststandort zu finden. Selbstverständlich wäre ein Kleinwindkraftstandort am nächstgelegenen Hügel (eines anderen Liegenschaftseigentümers) für einen hohen Jahresenergieertrag besser geeignet gewesen. Eine derartige Einbeziehung von Liegenschaftsnachbarn hätte jedoch den Rahmen des vorliegenden Projekts gesprengt.

### 3.2.1.1 Teststandort-1 in Siedlungsrandlage

Teststandort-1 befindet sich im Garten eines Einfamilienhauses in Siedlungsrandlage. In Hauptwindrichtung ist in etwa 200m Entfernung ein 20m hoher Hügel quer zur Hauptwindrichtung (Wind von Westen bzw. Ost) vorgelagert, der zu turbulenten und böigen Windverhältnissen bei Wind aus westlicher Richtung führt.



Abb.6: Teststandort-1 im Garten eines Einfamilienhauses in Siedlungsrandlage

Die Gebäude in nördlicher und östlicher Richtung sowie ein Bahndamm in südlicher Richtung vom Teststandort-1 verursachen auch aus den verbleibenden Windrichtungen eine turbulente Anströmung der Kleinwindkraftanlage. Der Teststandort ist deshalb ein eher ungünstiger aber durchaus typischer Kleinwindkraftanlagenstandort, wenn der Strombedarf für ein Einfamilienhaus vor Ort erzeugt werden soll. Auf Grund der sehr nahe stehenden Wohnhäuser mussten jegliche Geräuschemissionen soweit möglich vermieden werden.



*Abb.7: Prototypenanlage am Teststandort-2*

### **3.2.1.2 Teststandort-2 in leicht hügeliger Streusiedlungslage**

Teststandort-2 liegt im Garten eines ehemaligen landwirtschaftlichen Betriebs in Siedlungsstreulage. In Hauptwindrichtung (Wind von Westen bzw. von Ost) gibt es keine relevanten vorgelagerten Strömungshindernisse. Aus nördlicher Richtung strömt der Wind leicht fallend über einen langgestreckten Hügel zum Teststandort. Lediglich aus südlicher Richtung gibt es turbulente und böige Windverhältnisse auf Grund der unmittelbar vorgelagerten Gebäude und Bäume.



*Abb.8: Teststandort-2 im Garten eines Einfamilienhauses in leicht hügeliger Streusiedlungslage*

### 3.2.1.3 Teststandort-3 am Bergrücken in weitläufiger Streusiedlung

Teststandort-3 befindet sich am Bergrücken in der Nähe eines landwirtschaftlichen Betriebs. Der Teststandort kann aus westlicher, südlicher und östlicher Windrichtungen ungehindert angeströmt werden. Lediglich aus nördlicher Richtung ist mit turbulenten bzw. deutlich eingeschränkten Windverhältnissen auf Grund des vorgelagerten Waldstücks zu rechnen.



Abb.9: Teststandort-3 am Bergrücken in der Nähe eines landwirtschaftlichen Betriebs

## 3.2.2 Durchführung der behördliche Projektbewilligung

In der zur Verfügung stehenden Projektlaufzeit ist es leider nicht gelungen eine offizielle langfristige behördliche Projektbewilligung für die drei Teststandorte zu erhalten. Für eine befristete Testlaufzeit der Pilotanlagen wurde jedoch kein Einspruch erhoben.

## 3.2.3 Fertigung und Installation der Pilotanlagen an den drei unterschiedlichen Teststandorten

Nach der Fertigung der einzelnen Komponenten konnten die Pilotanlagen rasch vor Ort montiert werden. Über ein knickbares Mastsystem - siehe Abb. 10 - wurden Rotor samt Generator und Gondel über einen Seilzugmechanismus aufgezogen und fertig installiert. Damit konnte speziell in der Phase der Entwicklung ohne LKW samt Kran Rotoren mit unterschiedlichen Rotorblattprofilen getestet werden. Auch eventuell nötige Service- oder Kontrollarbeiten können in geringer Höhe erledigt werden.



Abb.10: Installation der Prototypenanlagen an den Teststandorten

### 3.3 Test und Analysephase der drei Pilotanlagen

#### 3.3.1 Monitoring der drei Pilotanlagen über einen Zeitraum von 1 Jahr

Wesentlich sind die erzielten Energieerträge an den drei Teststandorten im gewählten Betrachtungszeitraum vom 10. Oktober 2010 bis 10. Oktober 2011

Standort	Energieertrag aus standortbezogenen Windgeschwindigkeitsmesswerten berechnet [kWh]	Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	Energieertrag laut Auswertung der Stromzähler [kWh]	Prozentanteil auf 4000 kWh eines durchschnittlichen österreichischen Haushalt [%]
Teststandort-1	1295	3,6	1036	26
Teststandort-2	2181	4,2	1843	46
Teststandort-3	3231	4,7	2571	64

Tabelle 3: Theoretische und in der Praxis erreichte Energieerträge an den Teststandorten

Nach einem Jahr ohne nennenswerte Störungen (an Teststandort-3 gab es mehrmals Stromausfälle über einige Stunden, währenddessen keine Stromeinspeisung möglich war) ergab der Vergleich, der aus den Windgeschwindigkeitsmesswerten berechneten

Jahresarbeitsvermögen und der Werte der Stromzähler der Wechselrichter, laut Tabelle 3. Zum Vergleich wurde auch jener Prozentanteil auf 4000 kWh an elektrischer Energie angeführt, die nötig ist, um einen durchschnittlichen österreichischen Haushalt zu versorgen.

Aus den standortbezogen aufgenommenen Minutenmittelwerten der Windgeschwindigkeitsmesswerte im Betrachtungszeitraum konnten die theoretisch erreichbaren Jahresarbeitsvermögen entsprechend Tabelle 4 ermittelt werden.

Teststandort-1	$\bar{v}_1 = \sum_{525600} \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_{525600}}{525600} = 3,6 \text{ m/s}$
	$E_1 = 0,5 \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta \cdot t = 0,5 \cdot 16 \cdot 1,2 \cdot 3,6^3 \cdot 0,33 \cdot 8760 = 1295 \text{ kWh}$
Teststandort-2	$\bar{v}_1 = \sum_{525600} \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_{525600}}{525600} = 4,2 \text{ m/s}$
	$E_1 = 0,5 \cdot 16 \cdot 1,2 \cdot 4,2^3 \cdot 0,35 \cdot 8760 = 2181 \text{ kWh}$
Teststandort-3	$\bar{v}_1 = \sum_{525600} \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_{525600}}{525600} = 4,7 \text{ m/s}$
	$E_1 = 0,5 \cdot 16 \cdot 1,2 \cdot 4,7^3 \cdot 0,37 \cdot 8760 = 3231 \text{ kWh}$

*Tabelle 4: Theoretisch erreichbare Jahresarbeitsvermögen an den drei Teststandorten*

Die Abweichungen der Energieerträge in Spalte 2 und 4 in Tabelle 3 sind vorwiegend darauf zurück zu führen, dass bei der Auswertung des Energieertrags in Spalte 2 die Rotordrehzahlbegrenzung der Kleinwindkraftanlagen ab einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s nicht berücksichtigt wurde.

### **Resümee:**

- Um an einem ungünstigen Kleinwindkraftstandort bei einer niedrigen mittleren Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s (Teststandort-1) den elektrischen Jahresenergiebedarf eines durchschnittlichen österreichischen Einfamilienhaushalts von 4000 kWh decken zu können, wird eine Rotorfläche von rund 56 m<sup>2</sup> (= 3,5 x 16 m<sup>2</sup>) bzw. ein Rotordurchmesser von 8,5 m benötigt. Für die praktische Umsetzung ist hierfür zumindest eine Masthöhe von 12 m erforderlich.
- Am günstigen Kleinwindkraftstandort Teststandort-3 reicht für die Stromversorgung eines durchschnittlichen Einfamilienhaushalts bereits eine Rotorfläche von 24 m<sup>2</sup> (= 1,5 x 16 m<sup>2</sup>) bzw. ein Rotordurchmesser von 5,5 m. Bei einer möglichst turbulenzarmen Anströmung aus den Hauptwindrichtungen ist auch ein 10 m hoher Mast bereits ausreichend.

### 3.3.2 Deckung des Energiebedarfs vor Ort

An einem der gewählten Kleinwindkraftstandorte wird auch eine Wärmepumpe für die Beheizung eines Wohngebäudes samt Zeichenbüro betrieben. Hier sollen die tatsächlichen Betriebszeiten der Kleinwindkraftanlage und der Wärmepumpe aufgezeichnet werden, um die zeitlichen Überlappungsbereiche (die gezielt angestrebte und erwünschte Gleichzeitigkeit von Windkraft und Erdwärme) dokumentieren zu können.

Am Teststandort-1 wurde im Betrachtungszeitraum vom 10. Oktober 2010 bis 10. Oktober 2011 eine Wärmepumpe zur Beheizung eines Einfamilienhauses samt Zeichenbüro mit 280 m<sup>2</sup> Gesamtfläche betrieben.

Teststandort-1 Einfamilienhaus samt Zeichenbüro mit 280m <sup>2</sup> Gesamtfläche	Energie- verbrauch  [kWh]	Energiegewinnung		
		[kWh]		
		vor Ort durch Kleinwindkraftanlage	vor Ort durch Grundwasser	extern durch öffentliches Stromnetz
Elektrische Energie	4841	1036		3805
Wärme Energie	22000		16968	5032

*Tabelle 5: Energieverbrauch und Energiegewinnung an Teststandort-1*

Laut Tabelle 5 können auf Grund der geringen mittleren Windgeschwindigkeit an Teststandort-1 mit einer Kleinwindkraftanlage mit 16 m<sup>2</sup> etwa 11% der benötigten gesamten elektrischen Energie (elektrischer Energiebedarf plus den Anteil der Wärmepumpe für die nötige Wärme Energie) produziert werden.

Laut Tabelle 6 ist die Kleinwindkraftanlage rund dreimal solange in Betrieb (6366 h/anno) wie die Wärmepumpe (2013 h/anno). Während 91 % der Betriebszeit der Wärmepumpe ist auch die Kleinwindkraftanlage in Betrieb.

	Kleinwindkraftanlage	Wärmepumpe
Betriebsdauer pro Jahr	6366 h	2013 h
Elektrische Leistung	0 bis 1,82 kW	nahezu konstant 2,5 kW

*Tabelle 6: Betriebsdauer und elektrische Leistung von Kleinwindkraftanlage und Wärmepumpe*

#### Resümee:

Wie könnte die gesamte Energie vor Ort erzeugt werden?

- Variante I\*: Eine Kleinwindkraftanlage mit rund 120 m<sup>2</sup> (7,5 x 16 m<sup>2</sup>) Rotorfläche bzw. einem Rotordurchmesser von rund 12,4 m liefert die benötigten 9873 kWh pro Jahr.

- Variante II\*: Eine Kleinwindkraftanlage mit 64 m<sup>2</sup> (4 x 16 m<sup>2</sup>) Rotorfläche bzw. einem Rotordurchmesser von rund 9 m generiert rund 6700 kWh. Eine gute Wärmedämmung (samt kleiner Wärmepumpe) und energieeffizienter Elektrogeräte können auf der Verbraucherseite den Energiebedarf reduzieren.

\*... Auf Grund der höheren Effizienz größerer Kleinwindkraftanlagen reduziert sich die Rotorfläche in beiden Varianten um etwa 20%. In Variante I sind statt 150 m<sup>2</sup> Rotorfläche nur etwa 120 m<sup>2</sup> nötig.

## 3.4 Entwicklung eines Prototyps einer Kleinwindkraftanlage für eine Serienfertigung

### 3.4.1 Analyse der gewonnenen Erkenntnisse in Hinblick auf eine Serienfertigung.

Wesentliche Erkenntnis aus den bisherigen Erfahrungen aus dem praktischen Betrieb von Kleinwindkraftanlagen ist, dass mit Hilfe einer elektronischen Drehzahlregelung von Kleinwindkraftrotoren ohne Pitchregelung eine hohe Betriebssicherheit und ein geräuscharmer Betrieb ermöglicht werden. Für die Netzeinspeisung ist hierfür ein Wechselrichter mit einer programmierbaren P/f-Eingangskennlinie nötig. Mit einer programmierbaren P/U-Eingangskennlinie, womit die meisten Wechselrichter ausgestattet sind, steigt auch bei hoher Windgeschwindigkeit die Rotordrehzahl und damit die Spannung, der Strom, der Innenwiderstand und die Verlustleistung des Generators weiter an, wodurch keine definierte Leistungsbegrenzung der Kleinwindkraftanlage möglich ist. Hingegen sinkt bei einer P/f-Eingangskennlinie bei zunehmender Rotordrehzahl die Spannung am Generator, während die Stromstärke nur soweit ansteigt, dass die Generatorleistung der gewählten P/f-Eingangskennlinie entspricht. Mit der P/f-Eingangskennlinie des Wechselrichters wird der Generator bei Starkwind so stark abgebremst, dass durch den Strömungsabriss am Rotor (Stallregelung) die maximale Leistungsaufnahme des Rotors aus dem Wind ebenso wie die maximale elektrische Leistung des Generators nicht überschritten wird. Im Folgenden sind die wesentlichen physikalischen Zusammenhänge zwischen mechanischer und elektrischer Leistung dargestellt.

$$P_{\text{mechanisch}} = M \cdot \omega \cdot \eta_{\text{Generator}} = U \cdot I = P_{\text{elektrisch}}$$

$P_{\text{mechanisch}}$  .... Mechanische Ausgangsleistung des Rotors = mechanische Eingangsleistung des Generators

$M$  .... Ausgangsdrehmoment des Rotors = Eingangsdrehmoment des Generators

$\omega$  .....Winkelgeschwindigkeit des Generators (bzw. des Rotors)

$\eta_{\text{Generator}}$  .... Wirkungsgrad des Generators (sinkt bei Überlastung = Innenwiderstand steigt rasch mit der Temperatur an)

$U, I$  .... Spannung und Strom des Generators

$P_{\text{elektrisch}}$  .... Elektrische Ausgangsleistung des Generators = Elektrische Eingangsleistung für den Wechselrichter

Eigenschaften	Wechselrichter-A	Wechselrichter-B	Wechselrichter-C
Maximale Ausgangsleistung laut Hersteller	2300 W	3300 W	4200 W
Eingangsspannungsbereich	200 – 600 Vdc	100 – 450 Vdc	50 – 500 Vdc
Ausgangsspannungsbereich / Frequenz	230 Vac / 50Hz	230 Vac / 50Hz	230 Vac / 50Hz
Galvanische Trennung zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung	ja	nein	nein
P/U-Kennlinie für Eingangsspannung programmierbar	ja, jedoch nur wenige Punkte der Kennlinie definierbar	ja, jedoch nur wenige Punkte der Kennlinie definierbar	ja, ausreichend viele Punkte der Kennlinie definierbar
P/f-Kennlinie für Eingangsspannung programmierbar	nein	nein	ja, ausreichend viele Punkte der Kennlinie definierbar
Kennlinie für Eingangsspannung über Schnittstelle im Betrieb änderbar	nein	nein	ja
Einschaltzeitspanne aus Stand-By-Betrieb (gemessen)	ca. 180 Sekunden	ca. 40 Sekunden	ca. 40 Sekunden
Leistungsaufnahme im Stand-By-Betrieb (gemessen)	9W	14W	8W
Leistungsaufnahme auf Eingangsseite für Netzsynchronisierung (gemessen)	48W	39W	2W
Wirkungsgrad bei 1000 W (400 Vdc) Eingangsleistung (gemessen)	94	92	94

*Tabelle 7: Technische Daten von netzgeführten Wechselrichtern für Kleinwindkraftanlagen von namhaften Herstellern*

In Tabelle 7 wurden die technischen Daten von netzgeführten Wechselrichtern dreier namhafter Hersteller bezüglich deren Eignung für Kleinwindkraftanlagen angeführt. Die netzgeführten Wechselrichter-A und -B sind für die Netzeinspeisung von Energie bei niedriger Windgeschwindigkeit weniger geeignet. Speziell für die Netzsynchrosation wird eine relative hohe Leistung von 39 bzw. sogar 48 W benötigt, sodass es nur mit Wechselrichter-C möglich ist geringe Energiemengen in das Netz ein zu speisen. Um eine Stallregelung des Rotors möglichst effizient zu erreichen, muss der netzgeführte Wechselrichter mit einer ausreichend genau programmierbaren P/f-Kennlinie für die Eingangsspannung ausgestattet sein. Dies ist ebenfalls nur mit Wechselrichter-C möglich. Für die Einspeisung von elektrischer Energie in einem weiten Windgeschwindigkeitsbereich ist ein netzgeführter Wechselrichter mit einem möglichst hohen Eingangsspannungsbereich am besten für eine Kleinwindkraftanlage geeignet. Im Idealfall verdoppeln sich bei einer Windgeschwindigkeitsverdopplung sowohl die Rotordrehzahl als auch die Generatorspannung und damit die Eingangsspannung am Wechselrichter.

Für einen hohen Leistungsbeiwert bei geringen Windgeschwindigkeiten soll sich das immer stärker verwindende Rotorblatt eines Propellerrotors möglichst bis zur Nabe hin in seiner Profillänge zunehmend vergrößern. Beim Vergleich des Rotors in Abb. 5 mit dem verbesserten Rotorblattprofil des Rotors in Abb. 11 ist der Unterschied deutlich im inneren Bereich des Rotors zu erkennen. Der Aufwand das optimale Rotorblattprofil bis zur Rotornabe hin zu führen ist hoch und wird deshalb von vielen Herstellern von Windkraftanlagen aus Kostengründen gemieden. Die resultierende Ertragssteigerung liegt im Bereich von etwa 7%.

#### **Resümee:**

- Eine Kleinwindkraftanlage kann mit Hilfe eines elektronisch drehzahlgeregelten Rotors auch bei Starkwindverhältnissen sicher und geräuscharm betrieben werden.
- Durch die Vermeidung von kurzfristigen Drehzahlüberhöhungen bei extremen Windböen wird ein frühzeitiges Not-Abschalten der Kleinwindkraftanlage vermieden.
- Für eine hohe Effizienz des Rotors müssen auch die Innenbereiche des Rotors mit Hilfe eines möglichst langen Flügelprofils rund um die Rotornabe aerodynamisch optimal gestaltet werden.

#### **3.4.2 Fertigungsverfahren für eine Serienfertigung in Kombination mit der Auswahl von geeigneten Materialien.**

Für eine Serienfertigung einer größeren Stückzahl (>50 Stück) von Rotorblättern und Gondeln ist sicherlich glasfaserverstärkter Kunststoff der geeignetste Werkstoff. Die einzelnen Teile können in Halbschalen passgenau gefertigt und dann verklebt werden. Der Nachbearbeitungsaufwand ist gering. Metallteile wie beispielsweise ein Kugellager lassen sich ebenfalls gut in die Konstruktion einfügen und kraftschlüssig verbinden.

Bei Kleinstserien hat sich bisher in der Praxis der sehr einfach zu bearbeitende Werkstoff Holz als sehr vorteilhaft erwiesen. Mit modernen D4-Klebstoffen können aus leimbinderähnlichem Ausgangsmaterial rasch Gehäuse aber auch Rotorblätter mit entsprechenden Fräswerkzeugen hergestellt werden. Für die nötige Witterungsbeständigkeit bieten sich für die Oberflächenbehandlung Zweikomponenten-Lacke an.

### **3.4.3 Detailplanung und Aufbau eines Prototyps mit ausgewählten Materialien für eine möglichst kostengünstige Serienfertigung.**

Die Abb. 11 zeigt den aktuell aufgebauten Prototyp mit einem Dreiblattroter samt verbessertem Rotorblattprofil und elektronischer Drehzahlbegrenzung an Teststandort-1.



*Abb.11: Installation der Prototypenanlage für eine Serienfertigung mit 16 m<sup>2</sup> Rotorfläche am Teststandort-1*

#### **Resümee:**

- Mit dem verbesserten Rotorblattprofil ist bereits eine Netzeinspeisung bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten ab 1,6 m/s Windgeschwindigkeit gegeben.
- Um die Errichtungskosten weiter zu verringern soll in einer weiteren Entwicklungsphase ein Zweiblattroter mit etwa 25% größerer Rotorfläche getestet werden, inwiefern das Jahresarbeitsvermögen bei baugleichem Generator und Gondelkonzept gegenüber dem Dreiblattroter gesteigert werden kann. Zumindest rein theoretisch sollte sich damit bei gleichem Investitionsaufwand die Anlagenleistung um 25% anheben lassen. Auf Grund der höheren Schnelllaufzahl des Zweiblattroters muss jedoch auf die Geräuschemissionen besonders geachtet werden.

## **4 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms**

Übergeordnetes Ziel des Programms „Haus der Zukunft Plus“ ist es Gebäude in der Zukunft so zu gestalten, dass sich diese von Energieverbrauchern zu Energieerzeugern weiterentwickeln.

Das vorliegende Projekt „Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe“ bietet speziell in der kühleren Jahreszeit, in der die Sonnenstunden abnehmen, bei entsprechend großzügiger Dimensionierung der Kleinwindkraftanlage einen wesentlichen Beitrag, um ein Gebäude mit ausreichend elektrischer Energie zu versorgen. Wenn es die Situation vor Ort erlaubt, kann ein Gebäude mit Hilfe einer etwas größeren Kleinwindkraftanlage und in Kombination einer Wärmepumpe auch beheizt werden.

Der Vorteil der Kombination aus Kleinwindkraft und Nutzung der Erdwärme liegt in der Verfügbarkeit der Energie, wenn diese auch tatsächlich gebraucht wird. Die Aufwendungen für eine Energiezwischenspeicherung können entfallen bzw. minimiert werden oder auch vom Bereich der elektrischen Energiespeicherung in den Bereich der thermischen Energiespeicherung verschoben werden.

### **4.1 Einpassung in das Programm**

Eine Kleinwindkraftanlage liefert speziell an Standorten mit windexponierter Lage einen Beitrag zur Energieversorgung für das Gebäude der Zukunft.

Mit Hilfe einer Wasser-Wasser-Wärmepumpe kann Wärme dem Grundwasser entzogen werden und diese steht dann für eine Niedertemperaturheizung oder auch zur Warmwasseraufbereitung zur Verfügung. Falls kein Grundwasser vorhanden ist, kann Wärmeenergie aus Tiefenbohrungen bis etwa 100 m oder aus Flächenkollektoren in etwa 2 m Tiefe bezogen werden. Eine dritte Variante sind sogenannte Luft-Wasser-Wärmepumpen die Wärmeenergie aus der Außenluft entnehmen. Gegenüber einem einfachen Elektroheizstab vervielfacht eine Wärmepumpe die von einer Kleinwindkraftanlage erzeugte elektrische Energie auf das 3 bis 7-fache in Form von Wärmeenergie.

### **4.2 Einbeziehung der Zielgruppen**

Für Planer, Energieberater und zukünftige Betreiber von Kleinwindkraftanlage bieten die vorliegenden Projektergebnisse Anhaltspunkte für die Dimensionierung von Kleinwindkraftanlagen.

Folgende Tabelle gibt in Abhängigkeit der mittleren Windgeschwindigkeit eines Standorts Auskunft über die nötige Größe einer hochwertigen Kleinwindkraftanlage um 4000 kWh an Ökostrom pro Jahr zu erzeugen.

mittlere Windgeschwindigkeit am Standort [m/s]	Rotorfläche [m <sup>2</sup> ]	Rotordurchmesser [m]	maximaler möglicher Jahresertrag (kWh)	Gesamtwirkungsgradfaktor*
3	80	10	7033	0,57
3,5	50	8	6650	0,60
4	33	6,5	6550	0,61
4,5	23	5,4	6500	0,62
5	16	4,5	6200	0,65

\*.... Ein Gesamtwirkungsgradfaktor von 1 entspricht dem maximalen Leistungsbeiwert von 0,59.

*Tabelle 8: Notwendige Rotorgröße einer Kleinwindkraftanlage um den Bedarf an elektrischer Energie eines durchschnittlichen Einfamilienhaushalts mit 4000 kWh/anno zu decken*

Wichtig ist hier anzumerken, dass nicht die elektrische Leistung einer Windkraftanlage entscheidend für das Jahresarbeitsvermögen ist, sondern die Rotorfläche (Erntefläche) und der Gesamtwirkungsgrad der Windkraftanlage! Der höhere Gesamtwirkungsgrad bei Kleinwindkraftanlagen für höhere mittlere Windgeschwindigkeiten ist auf den höheren Generatorwirkungsgrad bei höheren Drehzahlen, die wiederum bei kleineren Rotordurchmessern gegeben sind, zurückzuführen.

Ob die Erzeugung der nötigen Energie auch durch mehrere kleinere einzelne Kleinwindkraftanlagen sinnvoll ist, muss vor Ort geklärt werden. Eine diesbezügliche Untersuchung war im vorliegenden Projekt nicht vorgesehen.

### 4.3 Beschreibung der Umsetzungs-Potenziale

Das Umsetzungspotential hängt weniger vom vorhandenen nutzbaren Energiepotential ab, als vielmehr vom noch akzeptierten Leidensdruck der Bevölkerung. Nach Fukushima würden die von der Atomkatastrophe betroffene Bevölkerung sicherlich überwiegend Kleinwindkraftanlagen Ihrer Nachbarn akzeptieren und damit der dezentralen Energieversorgung beispielsweise durch Kleinwindkraftwerke gegenüber der zentralen Energieversorgung durch Atomkraftwerke den Vorzug geben. Das Gefahrenpotential ausgehend von Atomkraftwerken in Europa ist der Bevölkerung in Europa noch nicht wirklich

bewusst. Anderenfalls würden in Europa dezentrale Energiekonzepte mit ganz anderer Vehemenz angestrebt werden. Wie oben angeführt, stehen auch an Standorten mit geringer mittlerer Windgeschwindigkeit bei entsprechend größer dimensionierten Kleinwindkraftanlagen genügend Energie für das Aufrechterhalten unseres aktuellen Lebensstandards zur Verfügung.

Das tatsächliche Marktpotential für „Kleinwindkraftanlagen für Einfamilienhäuser und Kleinbetriebe“ in unserer heutigen real existierenden Wirtschaft abzuschätzen ist kaum mehr möglich, da durch Spekulation an den Devisenmärkten jegliche Verzerrung der Realwirtschaft möglich ist.

mittlere Windgeschwindigkeit am Standort  [m/s]	Rotorfläche  [m <sup>2</sup> ]	Rotordurch- messer  [m]	Jahresertrag  (kWh)	Gesamterrichtungskosten bei geringen Stückzahl  [EUR]
3	80	10	4000	45.000
3,5	50	8	4000	38.000
4	33	6,5	4000	32.000
4,5	23	5,4	4000	28.000
5	16	4,5	4000	24.000

*Tabelle 9: Gesamterrichtungskosten einer Kleinwindkraftanlage bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten um den Bedarf an elektrischer Energie eines durchschnittlichen Einfamilienhaushalts mit 4000 kWh/anno zu decken*

Im Sinne der Gemeinwohlökonomie ist das Realisierungspotential von Kleinwindkraftanlagen hoch einzuschätzen. Mit einer Kleinwindkraftanlage wird die benötigte Energie für ein Gebäude tatsächlich vor Ort gewonnen. Der Gebäudeinhaber übernimmt selbst die Verantwortung für seine Energieversorgung und kümmert sich um den Erhalt der Kleinwindkraftanlage. Höchstspannungsleitungen als Transitrassen für Energie durch unser Land werden überflüssig. Die dabei eingesparten Gelder stehen dezentralen autarken Energiestrukturen, die auch unabhängig voneinander arbeiten können, zur Verfügung.

Die Kosten für eine Kleinwindkraftanlage sind standortabhängig. An Standorten mit niedriger mittlerer Windgeschwindigkeit sind größere und folglich wesentlich teurere Anlagen nötig.

Ab einer Stückzahl von etwa 20 Stück können die Gesamterrichtungskosten um etwa 20% gesenkt werden. Andererseits entwickeln sich speziell Dauermagnetmaterialien aus Seltenen Erden zu Preistreibern bei der Generatorherstellung.

Die Detailkosten einer Kleinwindkraftanlage lassen sich derzeit wie folgt aufschlüsseln.

<b>Komponente</b>	<b>Prozentanteil an den Gesamterrichtungskosten</b>
Rotor	9%
Generator	9%
Gondel	6%
Mast	19%
Fundament	9%
Sicherheitselektronik	9%
Netzgeführter Wechselrichter	9%
Verkabelung und Montage vor Ort	15%
Behördliche Genehmigung	15%

*Tabelle 10: Detailkosten einer Kleinwindkraftanlage*

## **5 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen**

### **5.1 Erkenntnisse für das Projektteam**

Das Projektteam wurde durch die Ergebnisse bestärkt, dass speziell in Anbetracht der stetig steigenden Energiepreise auch die noch sehr hohen Kosten einer Kleinwindkraftanlage in absehbarer Zeit in einen Bereich einer wirtschaftlich vertretbaren Umsetzung kommen. Je eher sich eine tatsächliche Kostenwahrheit unterschiedlicher Energietechnologien am Markt widerspiegelt, umso größer wird der Erfolg von Kleinwindkraftanlagen sein.

Speziell an windschwachen Standorten muss eine Kleinwindkraftanlage sehr effizient arbeiten und dies ist wiederum nur mit hochqualitativen Komponenten (Rotor und Generator samt Dämpfungselemente und Wechselrichter) und deren genauer Abstimmung aufeinander möglich.

### **5.2 Perspektive für das Projektteam**

Das Projektteam hat Ende 2008 ein neuartiges Kleinwasserkraftwerk behördlich eingereicht. Nach dessen Fertigstellung soll mit der vom Wasserkraftwerk erzeugten Energie eine zügige Fertigung von Kleinwindkraftanlagen erfolgen. Das Projektteam ist derzeit weiterhin bemüht der Behörde eine Anlagengenehmigung abzurufen. Unterstützung gibt es jedenfalls von der niederösterreichischen Landesregierung und von Seiten der Marktgemeinde Obergrafendorf.

In der Zwischenzeit wird der Teststandort<sup>1</sup> weiterhin genutzt, um mit einem verlängerten Mast, einem vergrößertem und weiter optimierten Rotor den Jahresenergieertrag weiter zu steigern. Damit soll gezeigt werden, dass auch an weniger gut geeigneten Kleinwindkraftstandorten ausreichend Energie produziert werden kann.

Neben der Entwicklung von Kleinwindkraftanlagen mit größeren Rotordurchmessern steigt die Nachfrage nach energieautarken Systemen wie zum Beispiel Kleinwindkraftanlagen mit Energiezwischenspeicher.

### **5.3 Relevanz bzw. zukünftige Nutzung der Projektergebnisse**

Zielgruppe sind Privatpersonen, Kleinbetriebe, Landwirte, Architekten, Energieberater, politisch Verantwortliche im Energiebereich sowie Förderstellen für regenerative Energien. Im Wesentlichen sollen die Zielgruppe mit den vorliegenden Projektergebnissen die Möglichkeit haben das Potential der Kleinwindkraft im Vergleich zu oder in Kombination mit anderen regenerativen Energien richtig einschätzen zu können. Konkret kann mit einer

Windgeschwindigkeitsmessung an einem zukünftigen Standort über einen Zeitraum von nur etwa 2 bis 3 Monate festgestellt werden, welche Größe einer Kleinwindkraftanlage nötig ist, um einen gewissen Energiebedarf vor Ort decken zu können. Falls es Probleme mit der Einspeisung von elektrischer Energie in das öffentliche Stromnetz geben sollte, muss keinesfalls auf die Nutzung der Kleinwindkraft verzichtet werden. Über dezentrale Energiespeichersysteme (Akkumulatoren und Leistungselektronik) kann überschüssige Energie dann verfügbar gemacht werden, wenn vorübergehend keine Windenergie zur Verfügung steht.

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Grundsätzlich bietet die Nutzung der Kleinwindkraft den Vorteil rasch ein dezentrales und auch unabhängiges Energieversorgungssystem in unterschiedlichsten Regionen aufbauen zu können. Dort können mit energieeffizienten Technologien (LED, Wärmepumpe und gut wärmegeämmte Gebäude, ...) die wesentlichsten Grundbedürfnisse wie die Beleuchtung, die Wasserversorgung und die Klimatisierung von Räumen sichergestellt werden.

Speziell dann, wenn es in Zukunft tatsächlich zu Energieengpässen kommen sollte, bietet die Kleinwindkraft speziell in windexponierten Lagen eine hervorragende Alternative zu zentralen Energieversorgungssystemen.

Weiters ist es durchaus überlegenswert, etwa auf die Rotorfläche bezogen, überdimensionierte Kleinwindkraftanlagen zu installieren, um damit die Energiezwischenspeichersysteme kleiner konzipieren zu können und kontinuierlich elektrische Energie zur Verfügung stellen zu können.

In fernerer Zukunft können dann ähnlich wie bei Großwindkraftanlagen kleine ältere Kleinwindkraftanlagen durch etwas größere und noch effizientere Anlagen ersetzt werden, um den Energiebedarf mehr und mehr vor Ort zu decken.

Im Bereich der Werkstoffentwicklung sind Anstrengungen nötig, um die erforderlichen Dauermagneten für moderne Windkraftgeneratoren eventuell in naher Zukunft synthetisch herstellen zu können.

## 7 Literatur-/ Abbildungs- / Tabellenverzeichnis

### 7.1 Literaturverzeichnis

Jungbauer A., Windenergienutzung in einem regenerativen Energiesystem, Diplomarbeit TU Graz, Graz 1998

Homepage der IG Windkraft, [www.igwindkraft.at](http://www.igwindkraft.at)

### 7.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: *Gemessener Windgeschwindigkeitsanstieg in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche an Teststandort-1 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 3,6 m/s in 10 m Höhe*

Abb. 2: *Grundsätzliche Situation der getesteten Kleinwindkraftkonzepte samt Windgeschwindigkeitsmeßsystem mit mehreren Schalenkreuz-Anemometer auf eigenem Mast*

Abb. 3: *H-Rotor (3,5 m<sup>2</sup>) mit Flügelblattprofil mit großer Flügeltiefe - Selbstanlauf bei 1,9m/s*

Abb. 4: *Zweiblatt-Propellerrotor (16 m<sup>2</sup>) mit elektronischer Drehzahlbegrenzung – Selbstanlauf bei 1,3 m/s*

Abb. 5: *Dreiblatt-Propellerrotor (4,5 m Rotordurchmesser) mit elektronischer Drehzahlbegrenzung*

Abb. 6: *Teststandort-1 im Garten eines Einfamilienhauses in Siedlungsrandlage*

Abb. 7: *Prototypenanlage am Teststandort-2*

Abb. 8: *Teststandort-2 im Garten eines Einfamilienhauses in leicht hügeliger Streusiedlungslage*

Abb. 9: *Teststandort-3 am Bergrücken in der Nähe eines landwirtschaftlichen Betriebs*

Abb. 10: *Installation der Prototypenanlage am Teststandort*

Abb. 11: *Installation der Prototypenanlage mit verbessertem Rotor für eine Serienfertigung*

### **7.3 Tabellenverzeichnis**

*Tabelle 1: Stromerträge der getesteten Kleinwindkraftkonzepte*

*Tabelle 2: Technische Daten der Prototypenanlage*

*Tabelle 3: Theoretische und in der Praxis erreichte Energieerträge an den Teststandorten*

*Tabelle 4: Theoretisch erreichbare Jahresarbeitsvermögen an den drei Teststandorten*

*Tabelle 5: Energieverbrauch und Energiegewinnung an Teststandort-1*

*Tabelle 6: Betriebsdauer und elektrische Leistung von Kleinwindkraftanlage und Wärmepumpe*

*Tabelle 7: Technische Daten von netzgeführten Wechselrichtern für Kleinwindkraftanlagen von namhaften Herstellern*

*Tabelle 8: Notwendige Rotorgröße einer Kleinwindkraftanlage um den Bedarf an elektrischer Energie eines durchschnittlichen Einfamilienhaushalts mit 4000 kWh/anno zu decken*

*Tabelle 9: Gesamterrichtungskosten einer Kleinwindkraftanlage bei unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten um den Bedarf an elektrischer Energie eines durchschnittlichen Einfamilienhaushalts mit 4000 kWh/anno zu decken*

*Tabelle 10: Detailkosten einer Kleinwindkraftanlage*