

„Steigerung der Anlagenverfügbarkeit & -sicherheit einer Windkraftanlage durch *exportorientierte* Hybridisierung“

STUDIENARBEIT

des Studiengangs

Wirtschaftsingenieurwesen

an der Fachhochschule Heidelberg

von

Stephan Hell

April 2008

Bearbeitungszeitraum 07.01.2008 bis 31.03.2008

Firma Temme AG

54292 Trier

Betrieblicher Betreuer Jörg Temme

Betreuer der Fachhochschule Prof. Dr. Martin Ehinger

Abstract

The world's societies find themselves confronted with a severe energy problem. Fossil fuel sources will run out in a few years, leaving problems such as climate change and air pollution behind. In future we need to base our energy supply on renewable energy resources, like wind turbines, solar cells and many others. State of the art wind turbines are high-tech devices, but there is still a need for improvement. With the help of solar cells this could be achieved. Apart from reducing running-costs by 56% the solar cells help to stabilize and relieve the public electricity grid. Combining wind turbines and solar cells, a so called "wind/photo-voltaic hybrid-energy system", could on the one hand help to secure the world's overall power demand and on the other hand, as an autonomous isolated operating system, bring people without access to power the required electricity. In addition there is a flywheel energy storage-system installed, which is able to pick up unused energy and to release it in a fraction of seconds if there is an energy demand, caused by the wind turbine.

Erklärung an Eides Statt

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Trier, den 04.04.2008

Ort, Datum

Stephan Hell

Unterschrift

Abstract	1
Erklärung an Eides Statt	1
Inhaltsverzeichnis	2
Glossar	3
1. Einleitung	4
2. Aufgabenstellung	4
3. Stand der Technik	5
3.1. Netzqualität	5
3.2. Oberwellenbelastung	6
3.3. Eigenbedarf der Windkraftanlage	7
3.4. Stromnetzabhängiges Akku-Ladegerät als Gefahrenpotential	7
4. Prinzipielle Lösungsvarianten	8
4.1. Dieselstromerzeuger im Pufferbetrieb	8
4.1.1. Komponenten des Dieselstromerzeugers	8
4.1.2. Szenario	9
4.1.3. Wirtschaftliche Betrachtung	11
4.2. Photovoltaikanlage	12
4.2.1. Komponenten der Photovoltaikanlage	12
4.2.2. Wirtschaftliche Betrachtung	13
4.3. Bewertung der einzelnen Varianten	14
4.3.1. Festlegung der Bewertungskriterien	14
4.3.2. Einführung von Bewertungsfaktoren	14
4.3.3. Durchführung der Bewertung durch eine Bewertungsmatrix	15
5. Die Hybridanlage	16
5.1. Photovoltaik	17
5.1.1. Technisches Konzept des photovoltaischen Konzepts	17
5.1.2. Zentral- und Lokalsteuerung	18
5.1.3. Auswirkung der Hybridanlage auf die symbiontische Stromerzeugung	19
5.1.3.1. Kosteneinsparpotential	19
5.1.3.2. Glättungseffekt auf die Stromproduktion durch Hybrideinsatz	20
5.2. MDS-System	21
5.2.1. Worauf kommt es bei einem Energiespeicher an?	21
5.2.2. Lager des MDS	22
5.2.3. Integration des MDS in die Hybridanlage	23
6. Zusammenfassung und Ausblick	24
6.1. Zusammenfassung	24
6.2. Ausblick: Exportmarkt Spanien	25
7. Quellenverzeichnis	27
8. Anhang	28

Glossar

MDS	Magnet-Dynamischer-Speicher: reaktionsschneller, leistungs- und bedarfsregulierender Stromspeicher.
Azimut	dient zur Nachführung der Gondel
Pitch	aktive Blattverstellung zur Leistungsregulierung sowie als primäres Bremssystem der WKA
USV	Unterbrechungsstromversorgung
Degradation	alterungsbedingte Änderung der Parameter von Halbleiterbauteilen- in diesem Fall der Rückgang des Wirkungsgrades von Solarzellen im Laufe ihres Lebens.
Erzeugungspfad	Der gesteuerte Systemweg den die Energie ab ihrem meteorologischem Energieangebot während Ihrer Umwandlung von der mechanischen zur elektrischen Energie (Erzeugung von kWh) in einer bestimmten Zeit bis zum Netzübergabepunkt zurücklegt.
Verbrauchspfad	Der gesteuerte Systemweg den die elektrische Energie ab dem Netzübergabepunkt während Ihrer Umwandlung von der elektrischen zur mechanischen Energie in einer bestimmten Zeit bis zum Verbraucher in der W/P- HyEA zurücklegt
Oberwellen/Oberschwingungen	Sinusförmige Schwingungen, deren Frequenz ein ganzzahliges Vielfaches der Netzfrequenz sind.
Redundanz	Einfügen von Reserveelementen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit technischer Systeme
Hybrid	[lat.] von zweierlei Herkunft
Dotiert	Beimengung von Fremdstoffen zur Beeinflussung der elektrischen Eigenschaften von Halbleitern.
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz; dt. Bundesgesetz seit 01. April 2000 in Kraft zur Förderung von regenerativen Energieerzeugungsanlagen
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz; dt. Bundesgesetz seit 01. April 2002 in Kraft zur Minderung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen unter Verwendung der Kraft-Wärme-Kopplung
Induktive Sensoren	Der Sensor sendet ein elektromagnetisches Feld aus, welches in einem vorbeigeführten elektrisch leitenden Material Wirbelströme hervorruft. Ein Oszillator merkt die Veränderung des Magnetfeldes und der Sensor schaltet.
W/P-HyEA	Abk.: Wind/Photovoltaik-Hybrid Energie Anlage

1. Einleitung

Die Europäische Kommission hat 2008 einen Gesetzesentwurf für ein neues Energie- und Klimaprogramm vorgelegt, welches ambitioniert die Reduzierung der Kohlenstoffdioxid-Emissionen sowie die Erhöhung des Anteils an der Stromerzeugung durch Erneuerbare Energien auf einen Anteil von 20% im Jahre 2020 verfolgt. Mit Blick auf eventuell eintretende Sanktionen bei Nichterreichen der EU-Ziele ist es daher essentiell wichtig, den Erneuerbare Energien-Sektor weiter auszubauen.

Da 85% der heimischen Produktion von Windkraftanlagen (nachfolgend „WKA“ genannt) exportiert werden [1] und die Zukunftsmärkte für WKA zunehmend in Regionen liegen, in denen die Netzstabilität deutlich geringer ist als in Deutschland, so muss es die Aufgabe der deutschen Wirtschaft als Exportweltmeister sein, kundenorientierte Produkte in Exportländern mit niedrigem Anteil an Erneuerbaren Energien anzubieten.

Insbesondere wenn WKA in untereinander nur labil verbundenen regionalen Inselnetzen betrieben werden spielt die Erzeugungskontinuität eine deutlich größere Rolle als in Deutschland. Dies gilt umso mehr, wenn die WKA einen sehr hohen Anteil an der gesamten Erzeugungskapazität stellen. Deshalb müssen, um die gesetzten Ziele zu erreichen, die bereits installierten Anlagen so effizient wie möglich betrieben werden.

Diese Arbeit handelt von einem Konzept, welches es Anlagenbetreibern ermöglicht die Produktivität, Effizienz und Wirtschaftlichkeit ihrer Anlagen mit Hilfe von Hybridisierung zu steigern.

2. Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens ist das technische Optimum einer WKA in den wertbestimmenden Charakteristika: Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, Planbarkeit, Kosten, Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit herzustellen.

Die Anlage muss folgende Aufgaben erfüllen können:

- exportorientierter Ansatz
- Netzqualität verbessern & Abschaltungen der WKA vermeiden
- Reduktion der Oberwellen & Spannungsschwankungen reduzieren
- Fremdbezug der WKA minimieren
- Anlagensicherheit signifikant erhöhen

Das Anwendungsfeld dieser Anlage soll aus folgenden Gebieten bestehen:

1. Netzparallelbetrieb zur Nutzungsförderung und Schaffung von neuen Erschließungsoptionen für WKA an netztechnisch kritischen Standorten.
2. Netzstabilisierend in Regionen mit schwachen Lokalnetzen
3. Inselnetzbetriebseinheit in netzfernen Regionen

3. Stand der Technik

(alle Angaben beziehen sich auf eine Nordex N80 mit einer Nennleistung von 2,5 MW)

3.1. Netzqualität

Elektrische Netze können nur eine begrenzte Anzahl von WKA verkraften. Um die Sicherheit der Netzqualität zu gewährleisten werden die WKA gezielt ausgeschaltet [ErzMan-Konzept der Eon Ag], wenn die Gefahr besteht, dass sich die Netzqualität verschlechtert.

In Deutschland sind nach der DIN EN 50160 längere Unterbrechungen von mehr als drei Minuten Dauer unter mehr als 1 % der Normalspannung bis 50 Mal im Jahr innerhalb der Normen [2]. Dies ist für WKA suboptimal.

Bereits ein Stromausfall von Sekundenbruchteilen kann die WKA- Produktion zum Erliegen bringen und materielle Schäden und Wartungseinsätze verursachen. Wenn es zu kurzzeitigen Netztrennungen (KU- Abschaltungen) kommt, trennt der Leistungsschalter die Anlage vom Netz und die WKA fährt in den Nothalt [3]. Der Generator erzeugt aber weiter Energie, kann diese aufgrund der Netztrennung jedoch nicht mehr ins Netz einspeisen und treibt somit die Zwischenkreisspannung hoch [4].

Um die beteiligten Komponenten zu schützen, zündet der Umrichter die Crowbar (Thyristoren) und schließt über Widerstände den Rotorkreis kurz [5].

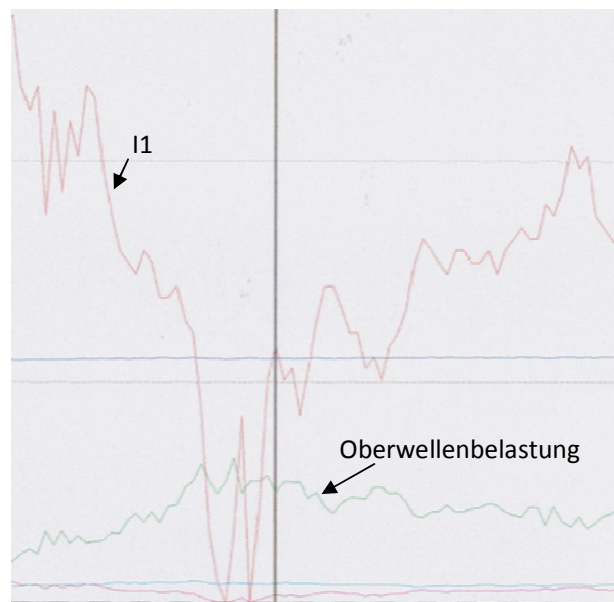
Durch schwache Netze in den Exportmärkten ist es zudem eine erhebliche Belastung, wenn die WKA bei geringem Windangebot und deshalb geringer Leistungsstufe in einem Bereich fahren, in dem die WKA zwischen Energiebezug und Erzeugung beständig binnen Sekunden schwankt.

Diese Schwankung kann von einigen kW des Bezugs bis zu einigen 10 kW der Produktion reichen. Die bisher gewählte Form der Abschaltung (um den Bezug der WKA zu vermeiden) bedeutet in der Folge, dass auch das Erzeugungspotential verloren geht, welches deutlich höher ist als das Bezugsrisiko.

3.2. Oberwellenbelastung

Oberwellen belasten die Netze. WKA, genauer deren elektronischen Bauteile, beeinflussen durch Oberwellen das Netz negativ und werden wiederum von diesen negativ beeinflusst. Je schwächer das Netz, desto elementarer ist das Bestreben Oberschwingungen zu vermeiden.

Der Verlauf von I1 Strom [A] ist zu beachten. Sinkt die Stromproduktion der WKA ist der Verlauf von Oberwellen beachtenswert. Er erreicht sein Maximum, wenn die Stromproduktion am geringsten ist. D.h. sinkt die Stromproduktion ab, steigt die Oberwellenbelastung an [6].



Auszug Messprotokoll WP Sefferweich (Kreis Daun)

Das Problem der Bauteilschäden (insbesondere sog. „ausgebrannte“ Kondensatoren) und die nachfolgenden Stillstände sind ein allgemeines Problem aller WKA am Netz. Diese Schädigungen haben auch Einfluss auf die Betriebssicherheit. In Regionen mit höherer WKA Dichte werden rund 10% der Ausfälle der WKA durch Netzfrequenzfehler und damit in der Hauptursache durch Oberwellen verursacht [7]. Die nachfolgenden Wartungseinsätze führen zu weiteren Stillständen der Anlagen.

3.3. Eigenbedarf der WKA

Der Leistungsbedarf der Windkraftanlage im Stand-by-Betrieb setzt sich aus den Einzelverbräuchen folgender Komponenten zusammen [8]:

- Steuerung (Betriebsführungsrechner und Umrichter)
- Azimutantriebe (horizontale Gondelverstellung)
- Hydraulikpumpe
- Getriebe- & Schaltschrankheizung
- Ladegerät für die Akku's
- Blattverstellantriebe bei Selbsttest und Anlauf
- Motorische Leistung bei Abschaltwind

Der Leistungsbedarf beträgt maximal 21 kW, wenn alle Verbraucher gleichzeitig arbeiten würden. Der Jahresenergiebedarf ist sehr stark standortabhängig und sollte spezifisch bestimmt werden [9].

3.4. Stromnetzabhängiges Akku-Ladegerät als Gefahrenpotential

Die Stromversorgung der Blattverstellantriebe ist ein äußerst sicherheitsrelevanter Aspekt, da die Einzelblattverstellung das primäre Bremssystem der WKA darstellt.

„Die Blattverstellung ist für jedes Rotorblatt einzeln und unabhängig ausgeführt. Die Stellbewegungen werden elektronisch synchronisiert. Bei Sicherheitsabschaltungen (z.B. Netzausfall) trennt sich die WKA direkt vom Netz und Pufferbatterien werden auf die Blattverstellungs-Gleichstrommotoren geschaltet.

Somit dient die Einzelblattverstellung neben der Leistungsregelung zugleich als primäres Bremssystem der WKA“ [10].

Sind die Akku's entladen erfolgt die Aufladung über ein stromnetzabhängiges Akku-Ladegerät, was wiederum zur Folge hat, dass sich hier ein Gefahrenpotential für die Anlage und Umgebung bildet, weil während der Netztrennung keine Ladung der Akku's erfolgen kann. Akku's haben eine begrenzte Kapazität, welche zudem abhängig ist von Umwelteinflüssen (Temperatur) und eine mit den Ladezyklen und dem Alter abnehmenden Leistungsfähigkeit.

Außerdem müssen Akku-Unterbrechungsstromversorgungen (USV) einem wöchentlichen Selbsttest unterzogen werden- in dieser Zeit steht die WKA aus Sicherheitsgründen still, weil eine USV im Falle einer Netztrennung nicht existent wäre.

4. Prinzipielle Lösungsvarianten

Unter den zwei grundlegenden Gesichtspunkten der Fremdbezugsvermeidung und der Bedarfsdeckung bei Netzausfall/Stillstand, wird im ersten Szenario die Versorgung der WKA mit Strom am Standort Zilsdorf (Kreis Daun) von einem Dieselstromerzeuger übernommen.

Die zweite Variante, um die vorher beschriebenen Probleme zu mildern bzw. zu beseitigen, ist die Installation einer Photovoltaikanlage. Die technische Beschreibung folgt im Anschluss an die Ausführung des DSE.

Beide Varianten nutzen symbiontisch die bereits bestehende Infrastruktur, d.h. Zuwegung, Netzanschluss und Grundstück der WKA.

4.1 Diesel im Pufferbetrieb

4.1.1. Komponenten des Dieselstromerzeugers (DSE)[11]

- Wassergekühlter, wartungsfreundlicher, besonders laufruhiger und geräuscharmer Industriedieselmotor mit einer Leistung von 32 kW
- Verbrauch 9 Liter / Stunde
- Interner Unterflurtank mit 110 Liter Fassungsvermögen
- Bürstenloser, selbstregelnder und ventilatorgekühlter Drehstromsynchrongenerator
- zwei 20-Fuß Container (ein Aggregate- und ein doppelwandiger Lagertankcontainer [s.Anh.1])
- Fassungsvermögen Lagertankcontainer: 20.000 Liter Diesel/Biodiesel/Pflanzenöle

Der Diesel fungiert zum Einen als Notstromversorgung und zum Anderen als Versorgungsquelle für den Eigenbedarf der WKA.

Sobald die WKA vom Netz getrennt wird (ErzMan-Konzept oder Netzausfälle), wird die WKA über die Akku-USV, welche neben dem Bedienen des Pitch-Systems auch den Betrieb der Steuerung, der Hydraulikventile und der Telekommunikationsanlage (DFÜ-Verbindung) sichert [12], in den Nothalt gefahren, woraufhin im Anschluss der Diesel als Notstromversorgung anspringt und es den Sicherheitssystemen ermöglicht über einen längeren Zeitraum aktiv zu bleiben.

Wie die Übersicht der Netzausfälle zeigt [s. Anh. 7], sind diese im Durchschnitt 160 Minuten lang, was die Akkus der Pitchmotoren, als primäres Sicherheitssystem essentiell wichtig, nicht bewältigen können, da sie je nach zu bewältigendem Drehmoment zur Blattverstellung nach einer Dauer von 15 Minuten leer sind. Außerdem lässt sich die aktive Windnachführung der Gondel auf Grund des hohen Energiebedarfs nicht über Akkus realisieren, was wiederum ein Vorteil der Diesel-Notstromversorgung darstellt, da sie genug Leistung zur Verfügung stellt. Die Gondelverstellung ist neben dem Pitchvorgang ein nicht zu vernachlässigender Sicherheitsaspekt, was sich am besten in einem Szenario verdeutlichen lässt.

4.1.2. Szenario

Fall 1: Bild 1

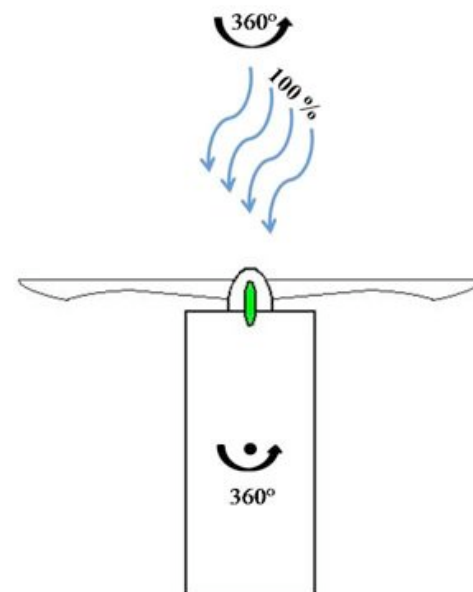
Der Wind weht innerhalb des WKA-spezifischen Erzeugungsfensters (zwischen 3 und 25 m/s) und kann seine Windrichtung meteorologisch bedingt um 360° während der Erzeugung ändern. Um eine optimale Energieausbeute zu erreichen, sind die WKA mit einer Windnachführung ausgerüstet, die über 2 Asynchronmotoren die Gondel kontinuierlich dem Wind nachführen [13]. In der Betriebsphase halten am Turm befestigte hydraulische Scheibenbremsen die Gondel in Position und werden je nach Bedarf gelöst, um über die oben genannten Asynchronmotoren die Gondel zu verstellen [14].

Wenn es zu einem durch Netzausfall bedingtem Nothalt kommt, werden die einzelnen Rotorblätter über die Pitch-Motoren um 90° aus dem Wind gedreht [15]. Der Wind weht weiterhin in Nabenrichtung, die Blätter werden jedoch nicht mehr angeströmt und die WKA kommt zum Stehen.

Um ein unkontrollierbares Trudeln der Rotorblätter während dieser Position zu vermeiden wird eine als federbelastete Scheibenbremse ausgeführte Feststellbremse aktiviert [16], die die Rotorwelle vor Bewegung hindert.

Schlussendlich ist der Rotor bewegungsunfähig, die Gondel kann jedoch nicht mehr auf Grund der Nichtversorgung mit Strom nachgeführt werden. Hierbei kommt es zu einem enormen Gefahrenpotential für die Anlage, wie in Fall 2 erläutert.

Bild 1



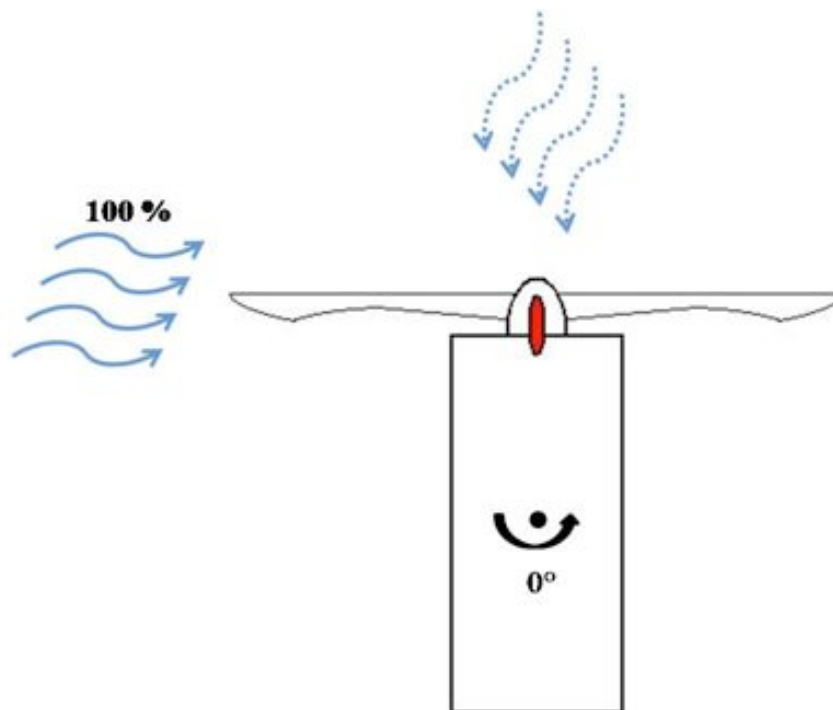
Fall 2: Bild 2

Wie im oben genannten Fall 1 angenommen, gehen wir von einem durch einen Netzausfall hervorgerufenen Nothalt aus.

Die WKA kann keinen Strom mehr aus dem Netz beziehen, was wiederum zur Folge hat, dass alle stromabhängigen Bauteile funktionslos sind. So auch die hydraulische Windnachführung.

Während eines Netzausfalls kann die Gondel nicht bewegt werden, was die WKA dem Wind ausliefert. Die Gondel ist bewegungsunfähig- sie hält sich unveränderbar durch ihr enormes Gewicht von ca. 105t in Position [17].

Bild 2



Ändert sich das meteorologische Windangebot und es kommt zu Seitenwinden, so werden die Rotorblätter, welche zuvor zum Schutz der WKA aus dem Wind gedreht wurden, wieder angeströmt. Durch die Feststellbremse kann sich der Rotor jedoch nicht bewegen-daraus resultieren enorme radiale Belastungen in den Wellen-, Generator- und Getriebelegern [18], die zur Beschädigung der selbigen führen.

Aus den oben genannten Gründen ist es deshalb von essentieller Notwendigkeit, der WKA eine Möglichkeit zu geben, auch bei Netzausfall Strom beziehen zu können um die Erhaltung der sicherheitsrelevanten Systeme gewährleisten zu können.

4.1.3. Wirtschaftliche Betrachtung

Die Jahresbezugsmenge einer N80 beträgt am Standort Zilsdorf (Kreis Daun) ca. 14.200 kWh, was einer jährlichen monetären Belastung von ca. 4.720 Euro entspricht. Wie zu erkennen ist belaufen sich die Kosten im ersten Betriebsjahr, die der DSE verursacht, auf 6.514 Euro [s.Anh.5].

Der Berechnung der Stromentstehungskosten pro kWh [s.Anh.5] liegt ein Zeithorizont von 20 Jahren zu Grunde mit der oben genannten jährlichen Bezugsmenge. Daraus ergibt sich mit der installierten Leistung von 32 kW eine Anzahl von gerundet 444 Betriebsstunden pro Jahr. Die Kernlebensdauer des DSE liegt bei 5.200 Stunden, was mit den angenommenen Betriebsstunden pro Jahr ca. 12 Betriebsjahren entspricht. Folglich muss die Motortechnik im 13. Betriebsjahr gewechselt werden. Ab dem 3. Betriebsjahr fallen Reparatur- und Instandhaltungskosten i.H.v. 2,5% der Gesamtkosten an. Ausgehend von diesen technischen ergeben sich folgende wirtschaftliche Rahmenbedingungen:

Die Gesamtkosten der technischen Anschaffungen belaufen sich auf 18.955,00 €, welche durch eine 35%-ige Eigenkapitalquote, entsprechend 6.634,25 €, realisiert werden sowie einer Fremdfinanzierung des Restbetrags, entsprechend 12.320,75 €.

Ab dem 2. Betriebsjahr beginnt die lineare Tilgung über einen 10 Jahres Zeitraum zum marktgängigen Zinssatz von 5,75%.

Der treibende Faktor in dieser Berechnung ist die jährliche Preissteigerung der Betriebsstoffe, sprich Diesel und Schmierstoffe. Ausgehend von den ermittelten Durchschnittswerten [19] im Zeitraum Anfang 2000 bis Ende 2007 lassen sich durchschnittliche Preisanstiege von 8,44% für Diesel und 7,05% für Schmierstoffe pro Jahr annehmen.

Summa summarum ergeben sich hierdurch im ersten Betriebsjahr Kosten von 6.754 € und ein über 20 Jahre gemittelter Preis von 0,9687 € pro kWh aus dieselbasierter Stromerzeugung.

Nun stellt sich die Frage, warum dem DSE den Vorzug geben, obwohl er mehr Kosten pro Betriebsjahr im Vergleich zum Strombezug aus dem Netz verursacht?

Dazu muss man berücksichtigen, dass der DSE einen erweiterten Funktionsumfang besitzt, als nur den Fremdbezug zu verhindern, sondern dass er zusätzlich durch seine Notstrom-Funktion nötige Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten reduziert, die durch ungewollte Stillstände der WKA verursacht werden.

Kommt es zu einer längeren Abschaltung der WKA, d.h. wird der Hauptschalter umgelegt, wird ein Service-Einsatz (Team bestehend aus zwei Technikern) [20] notwendig, um die WKA wieder an das Netz zu bringen. Da diese Art der Abschaltung gehäuft auftreten, entstehen hierdurch weit höhere Kosten als die ca. 2000 Euro Mehrkosten des DSE [s. Anh.7].

Im Anschluss eine Aufstellung über die Kostenzusammensetzung für einen Service-Einsatz [21]:

Bezeichnung	Preis
Anfahrtpauschale	250,00 €
Arbeitsmannstunde à 49,50 €	99 €
Spesepauschale/Mann à 8 €/h	16,00 €/h
Summe	365,00 €
x 12 Einsätze	4.380,00 €

4.2. Photovoltaikanlage

Die zweite Variante sieht eine Photovoltaikanlage vor, die auf einem sich um den WKA-Turm drehenden, 45° geneigten Modulträger befestigt wird, der helligkeitsnachgeführt die Anlage dem hellsten Punkt am Himmel nachführt.

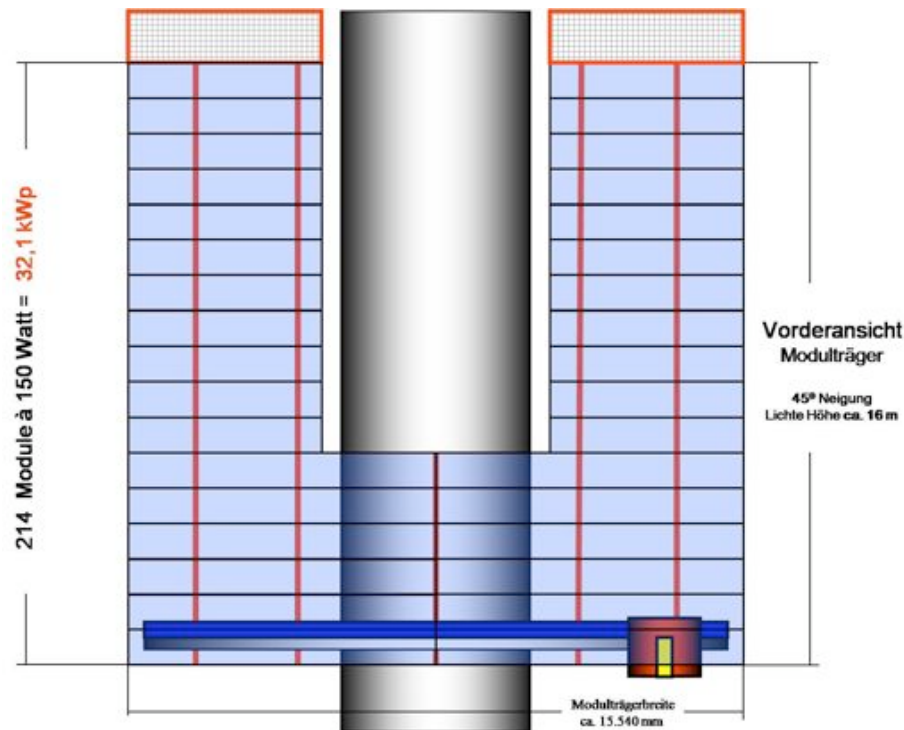
Eine Helligkeitsnachführung bietet den Vorteil, dass sie einen Mehrertrag von ca.28-35% pro Jahr [22] gegenüber einer stationären Anlage bietet.

Kommt vor dem Hintergrund, dass bei den gängigen Siliziumzellen der Leistungsabfall pro °C rund 0,4% beträgt, die vorgesehene Luftkühlung zum Einsatz, kann von einem zusätzlichen Ertragszuschlag von 2,25% ausgegangen werden [23].

Um die hohe Anzahl der Module aufnehmen zu können, hat der Modulträger eine Höhe von 19,75 m über Geländeoberkante und eine Breite von 15,54 m [s.Anh.2+3].

4.2.1. Komponenten der Photovoltaikanlage

- Monokristalline Siliziumzellen
- Kosten/Modul: 273,11 €
- Benötigte Fläche/Modul: 1,275 m²
- Zentral- und Lokalsteuerung



Vorderansicht Modulträger

4.2.2. Wirtschaftliche Betrachtung

Der Wirtschaftlichkeitsrechnung für die Stromentstehungskosten aus Photovoltaik [s.Anh.6] liegen dieselben Parameter wie der oben genannten zur DSE-Berechnung zu Grunde.

Die einzige Ausnahme stellt der Fremdkapitalzinssatz von 4,5% dar, da diese Variante, als Erneuerbarer Energieträger vom Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) gefördert, zinsgünstig von der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW-Bank) finanziert wird.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass auf Grundlage der Produktionszahlen die PV-Anlage neben der Eigenbedarfsdeckung (Kostensparnis 4.600€) einen Überschuss von 30.054 kWh produziert, der mit einer Vergütung nach EEG von 0,4447 €/kWh [24] Einnahmen in Höhe von 13.365,2 € liefert.

Diese Faktoren führen im ersten Betriebsjahr zu Kosten in Höhe von 2.519 € und ein über 20 Jahre gemittelter Preis von 0,1216 € pro kWh.

4.3. Bewertung der einzelnen Varianten

4.3.1 Festlegung der Bewertungskriterien

Um eine objektive Bewertung der beiden Varianten vornehmen zu können wird eine Bewertungsmatrix eingeführt, die mit folgenden Kriterien die bestmögliche Anlage ermittelt:

- Investitionskosten
- Lebensdauer
- Betriebsmittelkosten
- Wartungs- und Instandhaltungskosten
- Verfügbarkeit
- Redundanz
- Umweltverträglichkeit (Schallwerte, Emissionen, Gefahrenstoffe)
- Sicherheit (Gefährdungspotential)
- Autonomie

4.3.2. Einführung von Bewertungsfaktoren

Die Bewertungsfaktoren ergeben sich wie folgt:

Anforderungen <u>nicht</u> erfüllt	- 1 Punkt
Anforderungen <u>überwiegend</u> erfüllt	+1 Punkt
Anforderungen <u>vollkommen</u> erfüllt	+2 Punkte

4.3.3. Durchführung der Bewertung durch eine Bewertungsmatrix

Kriterium	Fakt	Bewertung	
		DSE	PV
Investitionskosten	DSE: $\frac{1}{4}$ der Gesamtkosten	2	-1
Lebensdauer	PV: Lebensdauer >20 Jahre	-1	2
Betriebsmittelkosten	PV: keine	-1	2
Wartungs- und Instandhaltungskosten	DSE: $\frac{1}{2}$ der Wartungs- und Instandhaltungskosten	2	-1
Verfügbarkeit	PV: auch bei Wartung betriebsbereit	1	2
Redundanz	PV: läuft auch mit verringerter Zellenanzahl	-1	2
Umweltverträglichkeit	PV: keine (Schall)-Emissionen; kein Gefahrgut	-1	2
Sicherheit	PV: Keine beweglichen Teile; keine Gefahrstoffe	1	2
Autonomie	PV: vollkommen autonom DSE: solange autonom bis Betriebsstoffe aufgebraucht	1	2
Summe Punkte		3	12

Obwohl sich die Investitionskosten für die PV-Anlage durch hohe Materialkosten auf knapp 80.950 € belaufen und die hohen Wartungs- und Instandhaltungskosten die Bilanz negativ beeinflussen, sichert sich die Anlage ihren Vorsprung gegenüber der dieselbasierten Variante durch zusätzliche Einnahmen aus dem Verkauf des Produktionsüberhangs sowie der Abkopplung von den Preissteigerungen für fossile Brennstoffe.

Schlussfolgernd kann also gesagt werden, dass die optimale Anlage zur Steigerung der geforderten wertbestimmenden Charakteristika die Kombination von Windenergie und Photovoltaik zu einer Hybridanlage (W/P-HyEA) darstellt.

5. Die Hybridanlage (W/P-HyEA)

„Die vorangestellte Bezeichnung *Hybrid-* betont ein aus unterschiedlichen Arten oder Prozessen zusammengesetztes Ganzes“ [25].

Die Besonderheit liegt darin, dass die zusammengebrachten Elemente für sich schon Lösungen darstellen, durch das Zusammenbringen aber neue erwünschte Eigenschaften entstehen können.

Wie aus dem vorherigen Abschnitt erkennbar wurde, besteht die Hybridanlage aus einer definierten Windkraftanlage sowie einer adaptierten Photovoltaikanlage samt Sekundär-Soft-/Hardware, die wie per Definition gefordert für sich schon Energie erzeugen können, sich aber zusätzlich durch den Zusammenschluss durch Synergieeffekte auszeichnen.

Das grundsätzliche Problem beider Energieerzeugungsanlagen stellt das Nichtvorhandensein einer Speichermöglichkeit des erzeugten Stroms dar. Diese Notwendigkeit besteht jedoch, da Betriebssituationen auftreten können, in denen die Photovoltaikanlage keinen Strom produzieren kann (nachts).

Ein Zurückgreifen auf konventionelle Batterie-Speichersysteme ist nicht sinnvoll, da sie zu viele Nachteile wie z.B. beschränkte Zyklenzahl, enger Temperaturbereich, kurze Wartungsintervalle, erhöhter Raumbedarf und kurze Lebensdauer mit sich bringen.

Um diesen Nachteilen zu entgehen wird die Photovoltaikanlage um ein innovatives MDS-System erweitert.

MDS steht für „magnetdynamischer Speicher“

Es ist ein Vakuumhochleistungsspeicher auf kinetisch-elektrischer Basis mit bislang in der chemisch/elektrischen Energiespeicherung unerreichter Vitalität und Packungsdichte, der ohne „Memory- Effekt“ und ohne thermische Schwankung Energie speichern/abgeben kann.

Der MDS ist ein Schwungradspeicher mit integrierter elektrischer Maschine, die je nach Erfordernis als Motor (Aufladen des Speichers) oder Generator (Entladen des Speichers) arbeitet.

Der Energieträger im MDS ist ein zylindrischer Rotor aus CFK, dessen Rotorachse senkrecht steht und im Inneren platzsparend die Motor-/Generator-Einheit aufnimmt. Um die Lagerreibung zu vermindern wird der Großteil des Rotorgewichts von Magnetkräften getragen.

Eine ausführliche Beschreibung zum MDS folgt im Anschluss an den Themenbereich der Photovoltaik.

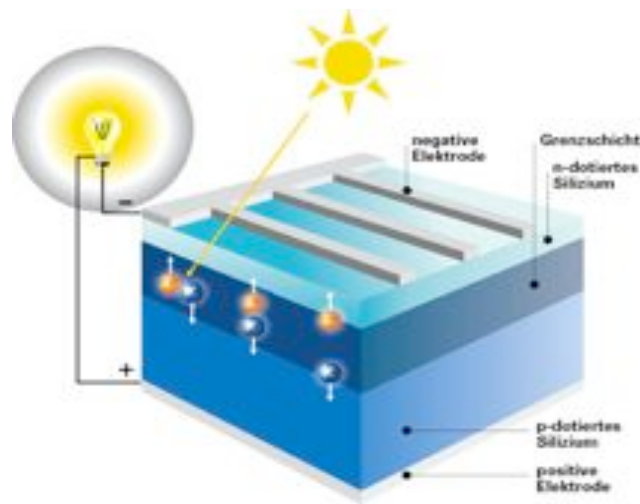
5.1. Photovoltaik

5.1.1. Technisches Konzept des photovoltaischen Effekts

Die Basis eines jeden Solarmoduls bildet der sog. Wafer, der aus dem Halbleiter Silizium besteht und entweder monokristallin oder polykristallin ausgeführt ist. Hierbei liegen die Vorteile beim monokristallinen Wafer, da dieser einen höheren Wirkungsgrad aufweist als sein polykristallines Pendant. Der Wirkungsgrad gibt das Verhältnis zwischen einfallender solarer Leistung und umgewandelter elektrischer Leistung an [26]. Je höher der Wirkungsgrad desto kleiner wird die benötigte Fläche.

Ein Halbleiter ist ein Material, das weder den Isolatoren noch den Leitern zugeordnet werden kann [27] und dessen elektrische Eigenschaften durch die Beimengung von Fremdstoffen (sog. Dotierung) gravierend beeinflusst werden kann [28].

Die Solarzelle besteht aus zwei aneinander grenzenden und mit separaten Metallkontakten versehene Halbleiterschichten, die jeweils so dotiert worden sind, dass eine sog. „n“- Schicht (n= negativ) mit einem Elektronenüberschuss und eine darunter liegende „p“- Schicht (p= positiv) mit einem Elektronenmangel entsteht [29].



Dem Konzentrationsgefälle folgend fließen deshalb Elektronen vom n in das p-Gebiet, so dass sich im Innern dieser Halbleiterstruktur ein elektrisches Feld ausbildet, die sog. „Raumladungszone“ [30] (im Bild „Grenzschicht“ genannt).

Die obere n-Schicht ist so dünn, dass die Photonen des einfallenden Sonnenlichts sie durchdringen können und erst in der Raumladungszone ihre Energie an ein Elektron abgeben [31].

Das so angeregte Elektron folgt dem inneren elektrischen Feld und gelangt so aus der Raumladungszone hinaus zu den Metallkontakten der n-Schicht. Beim Anschluss eines Verbrauchers wird der Stromkreis geschlossen: die Elektronen fließen über den Verbraucher zum Rückseitenkontakt der Solarzelle und schließlich zur Raumladungszone zurück.

5.1.2. Zentral- und Lokalsteuerung

Ausgehend von den Input-Daten der WKA-eigenen Wind-Sensoren für Richtung und Stärke sowie dem Pyranometer (Sensor für Globalstrahlung) steuert die Zentraleinheit den Modulträger ertragsoptimiert nach [s.Anh.4].

Dabei hat die Zentralsteuerung folgende Aufgaben:

- Sonnenkoordinaten und Azimut
- Tabelle Deutschland: Datum, Uhrzeit, Breitengrad
- Senden von Positionsdaten an dezentralen Tower
- Abfragen der erreichten Positionen
- Überwachen der lokalen Steuerungen, Statusmeldungen
- Generierung von Meldungen bei Fehlerzuständen per PC-Schnittstelle oder Modem
- Lebenszeichen für Backup-System
- Dokumentation

Die Lokalsteuerung übernimmt folgende Aufgaben:

- Automatikbetrieb mit Positionsvorgabe (BUS)
- Steuerung von 2 Schneckengetriebe-Motoren R/L
- Handsteuerung Antrieb-Azimut (Drehung)
- Anfahren der Grundstellung - Kalibrieren
- Überwachung der Motordrehung durch Impulsgeber
- Abfrage der Endschalter
- Abfrage der Positionsschalter
- Rückmelden Tower-Positionen an Zentralsteuerung
- Notlaufprogramm bei Ausfall der Zentralsteuerung

5.1.3. Auswirkung der Hybridanlage auf die symbiotische Stromerzeugung

5.1.3.1. Kosteneinsparpotential

Wie schon in Kapitel 4 „Prinzipielle Lösungsvarianten“ angenommen, gehen wir in unserem Fall von einer Nordex N80 am Standort Zilsdorf (Kreis Daun) aus, die eine Jahresbezugsmenge aus dem öffentlichen Netz von 14.200 kWh aufweist. Dabei betrug die gemessene Jahreshöchstleistung 32 kW, was zu folgenden Kosten geführt hat:

Grundsätzlich bezahlt der Windkraftbetreiber einen pauschalen Grundpreis von 1.500 €/kW, falls die Anlage aus dem öffentlichen Netz Strom/Leistung bezieht.

Auf diesen Grundpreis wird ein Jahresleistungspreis addiert, der sich auf 39,60 €/kW beläuft sowie einen Arbeitspreis von 0,06 €/kWh. Somit wird der Windkraftbetreiber mit Kosten von 3619,2€ (vor Zuschlägen) belastet.

Die gesetzestregulierten Zuschläge belaufen sich auf 0,03129 €/kWh, bestehend aus dem EEG- und Kraft-Wärmekopplungs-Gesetz-Zuschlag sowie der Stromsteuer.

Wird nun der Brutto-Strompreis berechnet, bestehend aus allen Zuschlägen plus Mehrwertsteuer, belaufen sich die Gesamtkosten im Jahr auf 4.835,59€ für eine Windkraftanlage.

Art	Preis/Einheit	Faktor		Standort Zilsdorf (Normpreis)	Standort Zilsdorf (Hybrid)
		Normpreis	Hybrid		
Pauschaler Grundpreis	1.500 €/kW	1	1	1.500 €	1.500 €
Jahresleistungspreis	39,60 €/kW	32	5	1267,20 €	198,00 €
Arbeitspreis	0,06 €/kWh	14.200	1.000	852,00 €	60,00 €
EEG-Zuschlag	0,00743 €/kWh	14.200	1.000	105,51 €	7,43 €
KWKG-Zuschlag	0,00336 €/kWh	14.200	1.000	47,71 €	3,36 €
Stromsteuer	0,0205 €/kWh	14.200	1.000	291,10 €	20,05 €
Mehrwertsteuersatz	19%	1,19	1,19		
Gesamtkosten				4.835,59 €	2.128,72 €
Kostenreduktion					2.706,87 €

[32]

Das Potential, welche die Hybridanlage hier bietet, zielt auf die Senkung der Jahreshöchstleistung ab.

Die Rahmenbedingungen wie der pauschale Grundpreis für den Strom-/Leistungsbezug, der Jahresleistungspreis und die gesetzlichen Zuschläge bleiben identisch, nur die Jahreshöchstleistung reduziert sich durch den Einsatz der Photovoltaikanlage von anfangs 32 kW auf nur noch 5 kW.

Daraus ergibt sich letztendlich eine reduzierte monetäre Belastung von 2.128,72€, was einer Kostenreduktion von 2.706,87€ oder **55,98%** entspricht.

Der Grund für die Reduzierung der Jahresbezugsmenge von anfänglich 14.200 auf 1.000 kWh lässt sich dadurch erklären, dass die vollständige Substitution des Eigenbedarfs durch Photovoltaikstrom ein theoretisches Konstrukt darstellt, praktisch jedoch mit Sonderbetriebszuständen gerechnet werden muss, die einen Fremdbezug nicht ausschließen.

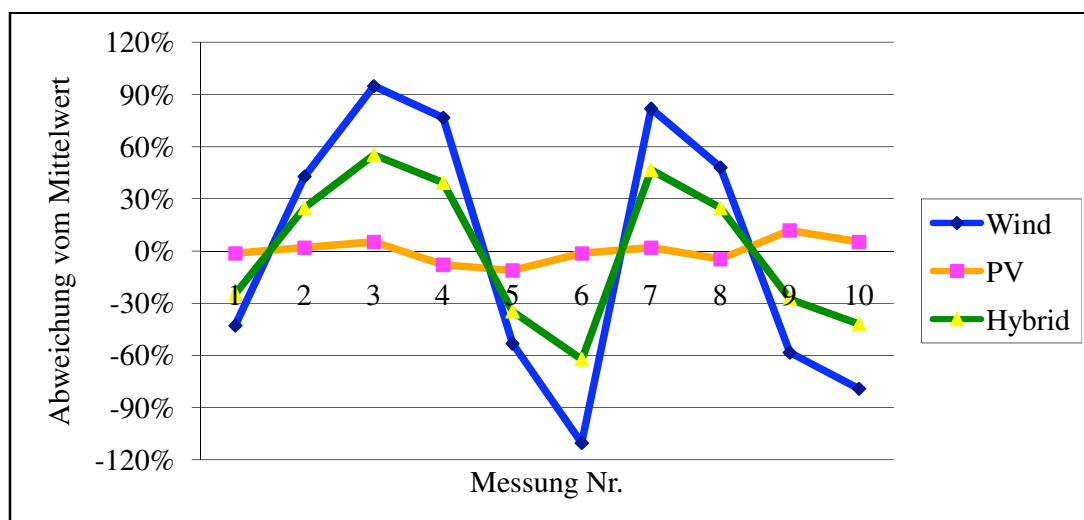
Die im Kapitel 4.2.2. angenommenen Kosteneinsparungen durch Fremdbezugsvermeidung haben hier weiterhin Gültigkeit.

Wenn nun auch der jährlichen Preisanstieg des Stroms hinzugezogen wird (+ 7,87% im Zeitraum Januar 2002 bis Dezember 2007 [33]), wird sich die Abhängigkeit der Windkraftbetreiber von den Stromkonzernen in Zukunft weiter negativ auf die Rentabilität und Effizienz ihrer Anlagen auswirken, da die steigenden Kosten liquide Mittel aufbrauchen, die eigentlich zur Liquidierung der Kredite benötigt werden.

Somit verschiebt sich der Break-Even Point in der 20-Jahresplanung nach hinten und die errechneten Gewinne sowie Kapitalrentabilitäten verzögern sich [34].

5.3.1.2. Glättungseffekt der Stromproduktion durch Hybrideinsatz

Eine weitere positive Auswirkung der Hybridanlage auf die Stromproduktion stellt der oben genannte „Glättungseffekt“ dar. Vor dem Hintergrund der multiplen Erzeugung, d.h. Stromerzeugung unter Verwendung von unterschiedlichen Energieerzeugern, lässt sich in Relation zur mittleren Produktion folgende Glättung erzielen [35]:



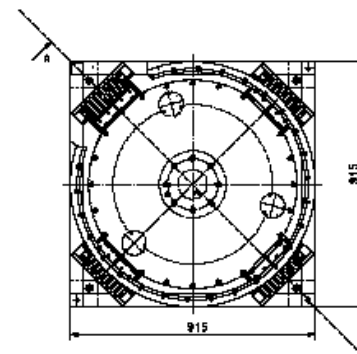
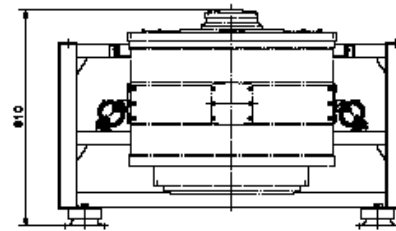
Wie zu erkennen ist besitzt die Stromproduktion der WKA eine große Streubreite gegenüber dem Mittelwert- dem steht die sehr konstante Produktion der Photovoltaikanlage gegenüber, was in Summe zu einer Reduktion der Produktionsschwankung führt.

Diese Glättung unterstützt die Forderung aus der Aufgabenstellung die Oberwellenbelastung sowie Spannungsschwankungen zu reduzieren.

5.2. MDS-System

5.2.1. Worauf kommt es bei einem Energiespeicher an?

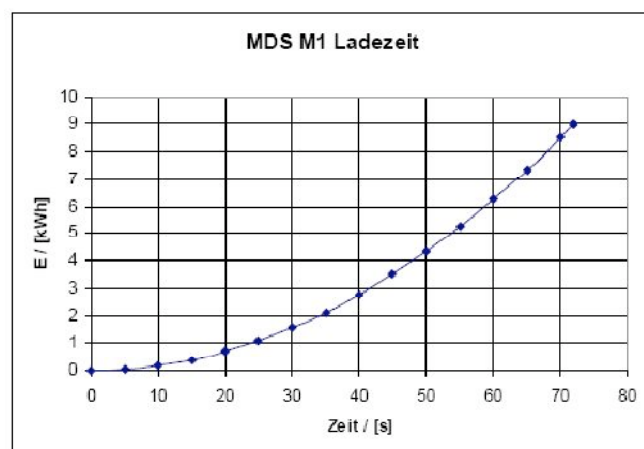
- Geschwindigkeit beim Laden und Entladen
- Lebensdauer in Ladezyklen
- Degradation pro Ladezyklus
- Ladekapazität
- Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen



Während chemische Batterien nach etwa 1000 Lade- und Entladezyklen erschöpft sind, schafft ein Schwungrad problemlos das Tausendfache und kann zum Auffangen kurzfristiger Spannungsschwankungen und Stromausfälle in großräumigen Elektrizitätsnetzen eingesetzt werden [36].

Die folgende Grafik zeigt, nach welcher Ladezeit ein bestimmter Energiezustand erreicht werden kann:

Die Ladezeit des MDS beträgt aus dem Stillstand bis zur maximalen Drehzahl 72 s. Dadurch dass die maximal mögliche Leistung mit der Drehzahl ansteigt, verläuft der Anstieg der gespeicherten Energie über die Zeitachse immer steiler [37].



[38]

5.2.2. Lager des MDS

Um diesen hohen Drehzahlen stand zu halten, kommen Magnetlager zum Einsatz. Magnetlager haben folgende Vorteile gegenüber konventionellen Kugellagern [39]:

- hohe Zuverlässigkeit
- kein Verschleiß oder Abrieb
- fast keine Lagerreibung
- kein Schmiermittel notwendig
- kein erhöhtes Drehmoment nötig, um Rad in Rotation zu versetzen
- größerer nutzbarer Temperaturbereich

Laut Definition in der Mechanik hat ein Körper sechs Freiheitsgrade [40]: je einen Freiheitsgrad durch lineare Bewegung entlang der 3 Koordinatenachsen x, y und z, und je einen Freiheitsgrad durch Rotation um die gleichen Achsen.

Der Vorzug wurde dem zwei-achsig aktiven Lager gegeben, bei dem die Position des Rades in zwei rechtwinklig zueinander stehenden Achsen in radialer Richtung aktiv geregelt wird [41]. Zwei unabhängige Regelschleifen sind dazu erforderlich. Die Achse in axialer Richtung wird mit Hilfe von Permanentmagneten passiv stabilisiert. Dieses Lagerprinzip führt zu einem flachen Aufbau mit weniger Volumen [42].

Permanentmagnete und Spulenmagnete werden im Lager verwendet. Die meisten Freiheitsgrade werden passiv durch Permanentmagnetkräfte kontrolliert, was Vorteile in Bezug auf Zuverlässigkeit und Stromverbrauch hat.

Der Hauptteil des magnetischen Flusses zwischen Rotor und Stator wird von Seltene-Erden Permanentmagneten erzeugt und durch Spulenmagnete moduliert, um das Rad in seiner zentrierten Position zu halten. Kleine Unwuchten des Rades werden so ausgeglichen. Seltene-Erden Permanentmagnete haben zudem durch ihre hohe Energiedichte Vorteile in Bezug auf Gewicht und Volumen [43].

Das Magnetlager erfordert eine aktive Regelung in zwei radiale Richtungen. Vier induktive Sensoren sind auf der Grundplatte montiert, die ständig den Abstand zum Rotor messen. Sie werden in einer Brückenschaltung mit einer Frequenz von 500 kHz betrieben [44].

5.2.3. Integration des MDS in die W/P-HyEA

Es werden zwei MDS-Systeme in spezifizierten Funktionspfaden eingebunden und zwar je in den Erzeugungs-/Einspeise und in den Verbrauchs-/Bezugspfad der Gross- WKA [45].

Die Nutzung des netzparallelen Verbrauchs-/Bezugspfades innerhalb der W/P- HyEA über einen MDS führt zum Ausgleich des Zeitlochs bei einer KU, da der Bezug über die Software im Falle der KU vom Netz zeitlich entkoppelt wird. Aus der „wenn – dann“ Konfiguration (wenn Ausfall, dann Bezug über MDS, wenn die PV nicht ausreichend oder nicht arbeitet) wird die „wenn – dann /und“ Konfiguration.

Während einer KU kann sowohl die etwaige Erzeugung in kWh als auch der etwaige Bezug in kWh für die WKA schonend abgefahren werden, ohne dass sich die schädlichen KU-Auswirkungen in die WKA Systeme übertragen können. Im Normbetrieb wird das Netz wegen der Reduktion ungewollter Spannungsschwankungen geschont und die verbesserte Einbindung der WKA in das Netz gewährleistet und zusätzliche, zuvor aus Sicherheitsgründen gesperrte Kapazitäten werden ohne teure Netzausbauten frei.

Dieses Erzeugungs-/Einspeise- Management innerhalb der W/P HyEA wird möglich, da die PC geführte Steuerung die Zeitdifferenz zwischen meteorologischem Energieangebot und mechanischer sowie deren elektrischer Energieumwandlung durch den schnell ansprechenden MDS überbrücken kann.

Beide MDS werden im speicherabhängigen Takt –Pendel auf den jeweils anderen Pfad geschaltet [46], sobald die gespeicherte Energie in einem MDS 50% der maximal zu speichernden Energiemenge erreicht hat.

Unter Ausnutzung der letzten Mittelwertdaten des abgelaufenen Zeitraumes, je nach Schwankung des Windangebotes zwischen 1 Minute und 15 Minuten, wird ein für den kommenden Zeitraum gewünschter Bereich um den Mittelwert der Erzeugung angestrebt [47]. Um einen Übermäßigen Einsatz der MDS zu unterbinden wird aber ein Toleranzbereich um den Mittelwert [48] geduldet. Die Einspeisung der verfügbaren Erzeugungsquellen regelt den MDS- Einsatz. Überschüsse werden in das MDS- System auf dem Bezugspfad zur Speicherung eingespeist, Unterdeckungen aus dem Erzeugungspfad durch das Abrufen ehemaliger Überschüsse gedeckt.

Die PV- Erzeugung bewirkt durch das „Auffüllen“ der in Relation zu den WKA- Erzeugungsspitzen auftretenden „WKA- Erzeugungstäler“, eine Reduzierung des Ausgleichbedarfs seitens der MDS.

Mit dieser Kombination aus regenerativer Energieerzeugung und bedarfsmäßiger Energiespeicherung ist es möglich, die WKA effizienter zu betreiben und zusätzlich die an die Hybridanlage gestellten Anforderungen zu erfüllen.

6. Zusammenfassung und Ausblick

6.1. Zusammenfassung

Am Anfang dieser Arbeit stand die Forderung nach dem Erreichen des technischen Optimums hinsichtlich Verfügbarkeit, Leistungsfähigkeit, Kosten, und für einen regenerativen Energieerzeuger eminent wichtig, Umweltverträglichkeit sowie Nachhaltigkeit.

Die Momentaufnahme der derzeitigen Energieerzeugung auf regenerativer Basis zeigte, dass bestimmte Probleme, seien es netzbedingter- oder konzeptbedingter Natur, die optimale Produktion seitens der WKA behinderten.

Auf der einen Seite haben wir das Problem der verminderten Netzqualität, verursacht durch Spannungs- und Frequenzschwankungen. Hinzu kommt eine variable Oberwellenbelastung, welche die elektrischen WKA-Bauteile negativ beeinflusst was wiederum zu einer Drosselung der Stromproduktion führt. Im Gegenzug steigt jedoch die Oberwellenbelastung mit abnehmender Stromproduktion. Folglich arbeitet die WKA vermindert in ihrem optimalen Produktionsbereich.

Auf der anderen Seite haben wir konzeptbedingte Probleme, die die WKA abhängig vom öffentlichen Netz machen. Der Fremdbezug zur Eigenbedarfdeckung kostet den Windkraftbetreiber nicht nur einige tausend Euro pro Anlage pro Jahr, sondern erzeugt zusätzlich ein Gefahrenpotential bei Netzausfällen oder Störungen.

Von diesen Störfaktoren ausgehend wird eine Anlage gesucht, die die WKA bedarfsgerichtet unterstützt und ihr zu einer Steigerung der Anlagenverfügbarkeit/-sicherheit verhilft. Hier standen zwei Anlagen zur Auswahl:

erstens eine Dieselstromerzeuger und zweitens eine Photovoltaikanlage. Nach technischer und wirtschaftlicher Betrachtung beider Varianten sowie verschiedenster Bewertungskriterien, wie z.B. Investitionskosten, Lebensdauer, Betriebsmittelkosten etc., wurde die Photovoltaikanlage als optimale Anlage identifiziert und im Anschluss daran mit der WKA zur Hybridanlage zusammengeführt.

Vorteile dieser Kombination sind neben der Reduzierung des Fremdbezugs aus dem öffentlichen Netz, einhergehend mit einer Kostenreduktion von 55,98% p.a., auch der Glättungseffekt auf die Gesamtstromproduktion der Hybridanlage. Die harmonischere und konstantere Stromproduktion hat einerseits eine Schonung des Netzes sowie andererseits eine reduzierte Belastung der WKA-Bauteilkomponenten zur Folge.

Dies wird durch das MDS-System weiter unterstützt, indem es bei netzbedingten Störungen kurzzeitig Strom aufnehmen/abgeben kann und hiermit aktiv zur Entlastung der Stromnetze beiträgt.

Zusammenfassend kann also gesagt werden, dass die Hybridanlage einen aktiven Beitrag zur Effizienzsteigerung der regenerativen Energien leistet und hilft klimapolitische Ziele, sei es auf nationaler oder internationaler Ebene, zu erreichen.

6.2. Ausblick

Exportmarkt Spanien

Der spanische Markt für Erneuerbare Energien bietet deutschen Herstellern exzellente Exportchancen, so z.B. im Solarbereich, wo sie 2007 Solartechnik im Wert von 2 Milliarden € exportiert haben, davon zum Großteil nach Spanien [49]. Dies entspricht einer Exportquote von 38%.

Aber nicht nur die Solarbranche kann sich über hohe Exportquoten freuen, die deutsche Windkraftbranche kann eine Exportquote von 85% aufweisen [50]. Tendenz steigend. Diese Fakten begünstigen die Entwicklung von exportorientierten Anlagen, die diese zwei Bereiche strategisch sinnvoll miteinander verknüpfen. Darauf zielt die zuvor beschriebene Hybridanlage ab.

Grundlage des Booms der Erneuerbaren Energien in Spanien ist das spanische Äquivalent zum deutschen EEG, das aktuelle „Real Decreto 661/2007“ [51], welches vom spanischen Ministerium für Industrie, Tourismus und Handel am 25.Mai 2007 erlassen wurde. Es basiert auf der „Real Decreto 436/2004“, welches am 12.März 2004 in Kraft trat.

Dieses Gesetz regelt wie das dt. EEG die Abnahme und Vergütung [52] aller regenerativen Energieträger, wie Windkraft, Solarenergie, Biomasse etc.

In der neusten Novellierung wurden die Regelungen nochmals attraktiver für Investoren. Die bedeutendste Regelung ist die auf 25 Jahre gesetzlich-garantierte Einspeisevergütung von 0,44€/kWh für Photovoltaik sowie 0,0732€ für onshore-Windkraftanlagen [53]. Hierdurch ergibt sich eine höhere Planungssicherheit für getätigte Investitionen und extrem gute Exportchancen aus deutscher Sicht. Desweiteren beeinflusst eine weitere Novellierung die Exportchancen der Hybridanlage, der Fakt dass die zuvor bestehende Mengenbegrenzung für Anlagen < 2MW entfällt [54]. Somit öffnet sich für die 32 kW Hybridanlage ein (fast) unbegrenzter Markt.

Beachtenswert sind die fast identischen Vergütungssätze für Photovoltaikanlagen, welche das „Real Decreto 661/2007“ aktuell vorsieht. Vor dem Hintergrund, dass Spanien bis zu doppelt so viel Sonneneinstrahlung im Vergleich zu Deutschland besitzt [s.Anh.8], stellt die Hybridisierung innerhalb Spaniens ein sehr lukratives Investitionsobjekt dar. Auf der anderen Seite werden durch die hohe Sonneneinstrahlung die effizienzsteigernden Faktoren, wie z.B. der Glättungseffekt auf die Gesamtproduktion, nochmals verstärkt woraus der Betreiber zusätzlichen Nutzen ziehen kann.

Solar	D	Sp.		Wind	D	Sp.
Inbetriebnahme	2008	2008			2008	2008
ab 30 kW	0,4448 €	0,4403€				
				onshore	0,087€	0,0732€

Vergleich Vergütung Deutschland-Spanien

[55]

Das zweite Standbein des Booms ist der sog. „Plan de Fomento des las Energias Renovables en Espana“ [56], zu Deutsch „Plan zur Förderung der Erneuerbaren Energien in Spanien“. Dieser hat eine Laufzeit von 2000-2010 und wurde vom „Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia“, kurz „ IDAE“ (Institut für Diversifikation und Energieeinsparung) erarbeitet.

Der „Plan de Fomento“ gibt einen Abriss über die spanische Energiewirtschaft, den Verbrauch der Energie und die Herkunft der produzierten Energie wieder. Ziel des Planes ist es, den Anteil der Erneuerbaren Energien am Gesamtenergieverbrauch in Spanien bis zum Jahr 2010 auf einen Anteil von 12% zu erhöhen um der Abhängigkeit Spaniens vom Import bei der Energieversorgung entgegenzuwirken.

Um diese Ziele zu erreichen, baut Spanien massiv seinen regenerativen Energiesektor aus. So wurden im ersten Quartal 2008 200MW an photovoltaischer Leistung installiert, bis Jahresende sollen es 700MW [57] sein.

Laut IDAE lagen die Windkapazitäten Ende 2006 nur bei 58% des zitierten Ziels aus dem „Plan de Fomento“, d.h. um das Ziel erreichen zu können werden in kommender Zeit vermehrt neue Windkraftanlagen installiert, was der Hybridanlage erweiterte Adaptionmöglichkeiten bietet.

Hier bietet sich mit der Hybridanlage eine Chance, im schnell expandierenden Markt Spaniens Fuß zu fassen mit ähnlich guten Ausgangsmöglichkeiten (Vergütungsgarantie, Planungssicherheit > 20 Jahre, staatliche Förderung Erneuerbarer Energien etc.) wie es hierzu Lande möglich wäre. Es könnten auf der einen Seite bestehende WKAs nachgerüstet werden (ähnlich großes Potential wie in Deutschland) oder man nutzt die Notwendigkeit des Kapazitätsausbaus, um am Aufbau der zur Erfüllung des „Plan de Fomento“ erforderlichen Anlagen teilzuhaben.

Gesetz	„Real Decreto 661/2007“	„Plan de Fomento“
In Kraft seit	25.Mai 2007	1999
dt. Äquivalent	Erneuerbare-Energien Gesetz	-
Ziele	-Regelung der Abnahme und Vergütung von Strom aus regenerativen Energieträgern - Ausbau des regenerativen Sektors	- bis 2010 sollen 12% des Gesamtenergieverbrauchs durch regenerative Energien gedeckt werden
für dt. Export nutzbar?	- gibt Planungssicherheit - sichere Investitionen - sehr gute Exportchancen	- klar definierte Ziele forcieren den Kapazitätsaufbau

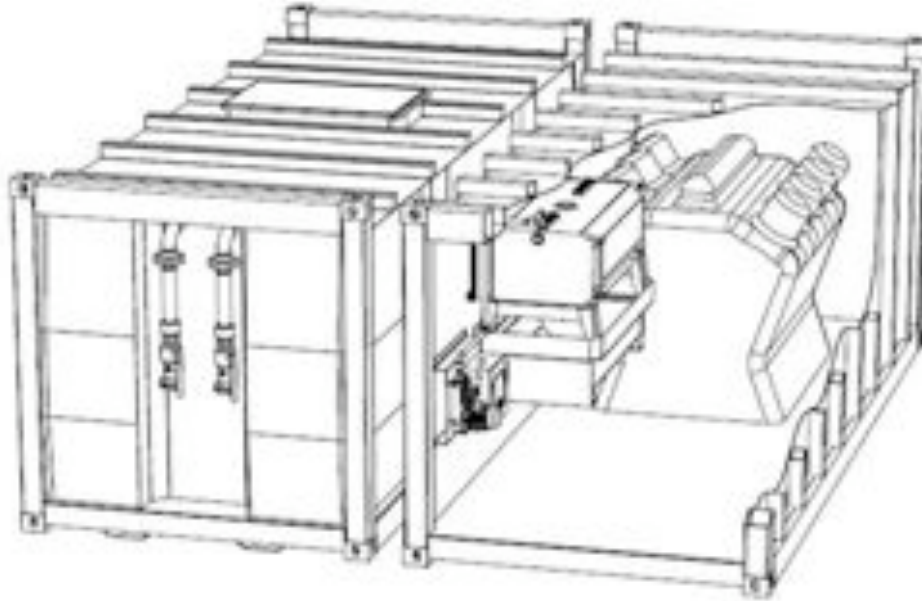
Zusammenfassung „Real Decreto“ und „Plan de Fomento“

8. Quellenverzeichnis

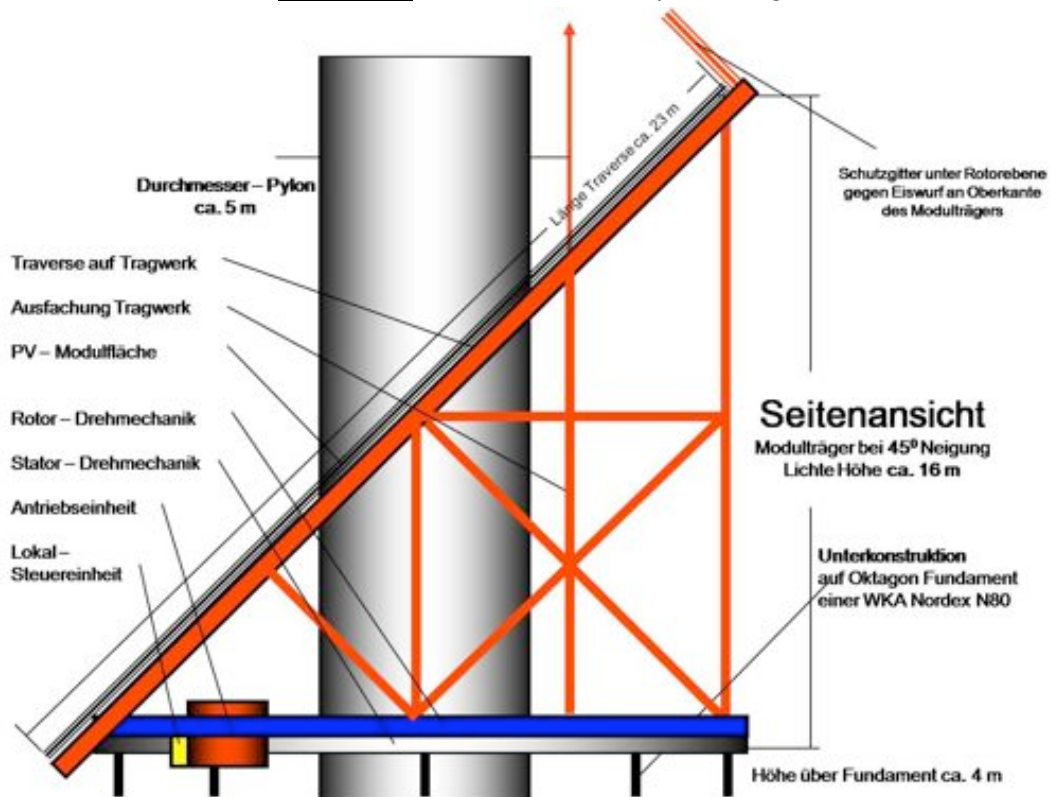
Quelle	Verweis-Nr.
VDMA (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.) in: „Windkraftbranche geht die Puste aus“	1, 50
DIN EN 50160; „Merkmale der Spannung in öffentlichen Energieversorgungsnetzen“	2
Bundesverband Solarwirtschaft	49
Planungsordner der Fa. Nordex AG (http://sales.nordex-online.com/Index1-de.pdf)	3, 4, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 20
BverwG Karlsruhe: Aktenzeichen 4 C 17.07	6, 7, 11, 17, 18, 32, 34, 35, 45, 46, 47, 48
OVG Koblenz: Aktenzeichen 8 A 10670/07.OVG	22, 23, 32, Bild PV-Zelle, Solarstrahlungskarte Europa
OVG Koblenz: Aktenzeichen 8 A 10669/07.OVG	5, 21, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 44
Volker Quaschnig: „Regenerative Energiesysteme“; Kap.5.1, 5.3	28, 29, 30, 31,54,57
Statistisches Bundesamt, Lange Reihe vom 21.01.2008, Artikelnr.: 5612401071125	19, 33
Heinz-Josef Bauckholt: „Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik; S.143	26
Martin Mayr: „Technische Mechanik“; S.123	40
§ 11 Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)	24
Meyers online Lexikon	25, 27
BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe: „Kinetische Speicherung von Elektrizität“	36
spanisches Ministerium für Industrie, Tourismus & Handel (www.mma.es)	51
„Real Decreto 661/2007; Artikel 2b; Kategorie b	52
„Real Decreto 661/2007; Artikel 36; Tabelle 3	53, 55
„Instituto para la Diversificacion y Ahorro de la Energia-IDAE“; (www.idae.es)	56

8. Anhang

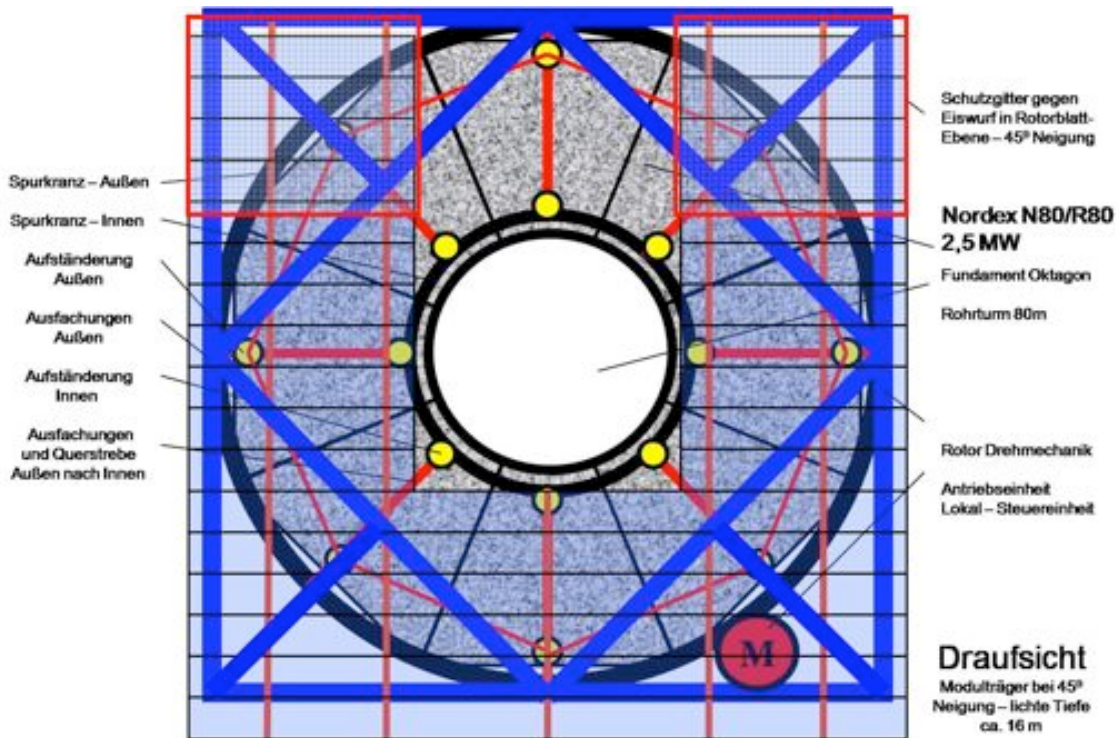
Anhang 1: 20-Fuss-Lagertankcontainer+Dieselstromerzeuger



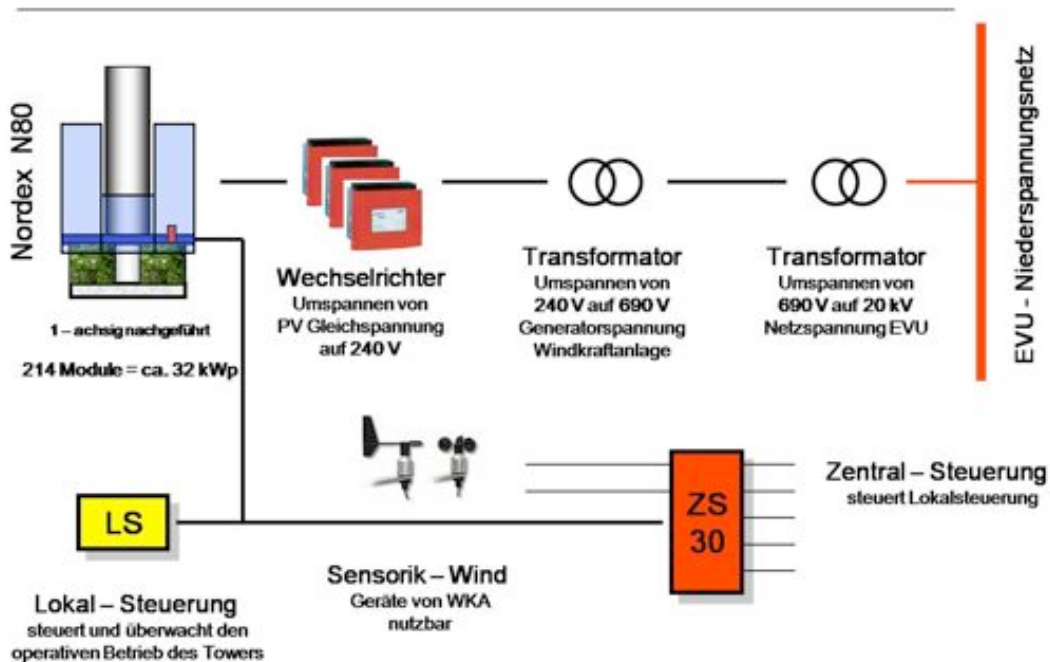
Anhang 2: Seitenansicht der Hybridanlage



Anhang 3: Draufsicht der Hybridanlage



Anhang 4: Lokal-/ und Zentralsteuerung + Sensorik



Anhang 5: Berechnung Stromentstehungskosten Dieselstromerzeuger

Dieselstromerzeuger 32 KW

Technische Grundlagen			
Basisdaten			
installierte Leistung in kW		32,00	
Erzeugung kWh pro Jahr		14.200,00	
Betriebsstunden / Jahr		443,75	
Verbrauch / std.			
	Diesel	9,000	Liter /std
	Schmierstoff	0,018	Liter /std
Logistik und Transport		3,00	€ / std.
Kernlebensdauer		5.200,00	Std
Betriebsjahre		11,72	
	gerundet	12	

Wirtschaftliche Grundlagen			
Anschaffung			
Motortechnik	7.500,00		
DSE und Tankeinheit	17.000,00		
Sekundär- Hardware	1.955,00		
Netzanschluss	0		
Gesamtkosten in €	18.955,00		
Eigenkapitalquote	35,00%		
Fremdfinanzierung	65,00%		
Eigenkapital in €	6.634,25		
Fremdkapital in €	12.320,75		
Zinssatz	5,75%		
Tilgungsart	linear		
Tilgungszeitraum in Jahren	10		
ab 2. BJ Tilgung / a	1.232,08		
<u>in Betriebsphase</u>		€/ 1.Jahr	
Pacht		-	
Versicherung	2,00%	379,10	
Netzanschluss / a		-	
Zins		708,44	
2000 -2007			
Betriebsstoffe Preis / Liter (Euro exkl. MwSt.)			Ø Anstieg / Jahr
Diesel	0,9955	3.975,78	8,44%
Schmierstoffe	15,00	119,813	7,05%
Personal und Logistik		1.331,25	
Summe der Kosten		6.514,38	

Anhang 5.2: Berechnung Stromentstehungskosten Dieselstromerzeuger

Betriebsjahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Summe	
Ertrag / a in kWh incl. Degradation	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00		
Vermeidung Bezug kWh	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00		
Einspeisung kWh	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
€ aus Bezugsvermeidung	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	-	-	-		
Vergütung EEG	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ertrag in € / a	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	-	-	-		
Betriebskosten																						
Pacht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Versicherung	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	379,10	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	8.529,75
Netzanschluss / a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Instandhaltung ab 3. BJ	0	0	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	592,34	9.714,44
Reparatur ab 3. BJ	0	0	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	473,88	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	604,19	9.832,91
Kraftstoff Diesel	3.975,78	4.311,33	4.675,21	5.069,80	5.497,69	5.961,69	6.464,86	7.010,50	7.602,18	8.243,81	8.939,58	9.694,08	10.512,26	11.399,50	12.361,62	13.404,94	14.536,31	15.763,18	17.093,59	18.536,29		
Schmierstoff	119,81	128,26	137,30	146,98	157,34	168,44	180,31	193,02	206,63	221,20	236,79	253,49	271,36	290,49	310,97	332,89	356,36	381,48	408,38	437,17		
Logistik und Personal	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	1.331,25	
Austausch													7.500,00									
Kapitalkosten																						
Fremdmittel im BJ	12.320,75	12.320,75	11.088,68	9.856,60	8.624,53	7.392,45	6.160,38	4.928,30	3.696,23	2.464,15	1.232,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zins	708,44	708,44	637,60	566,75	495,91	425,07	354,22	283,38	212,53	141,69	70,84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tilgung	0	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	1.232,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Summe Kosten	6.514,38	8.090,46	9.340,29	9.673,71	10.041,12	10.445,37	10.889,57	11.377,07	11.911,52	12.496,87	13.180,95	12.949,23	21.285,28	14.691,65	15.674,24	16.739,49	17.894,33	19.146,32	20.503,63	21.975,12		13.756,03
Darlehen nach Tilgung	12.320,75	11.088,68	9.856,60	8.624,53	7.392,45	6.160,38	4.928,30	3.696,23	2.464,15	1.232,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Liquidität Ende BJ. EEG	- 1.913,58	- 5.403,24	- 10.142,73	- 15.215,64	- 20.655,96	- 26.500,53	- 32.789,30	- 39.565,57	- 46.876,29	- 54.772,35	- 63.652,51	- 72.000,94	- 88.685,42	- 98.776,27	- 109.849,71	- 121.988,40	- 135.281,93	- 154.428,25	- 174.931,88	- 196.907,00		
Kosten / kWh *a	0,4588	0,5698	0,6578	0,6812	0,7071	0,7356	0,7669	0,8012	0,8388	0,8801	0,9494	0,9119	1,4990	1,0346	1,1038	1,1788	1,2602	1,3483	1,4439	1,5475		mittel € / kWh DSE 0,9687

Anhang 6: Berechnung Stromerzeugungskosten aus Photovoltaik

Stromerzeugungskosten pro kWh der PV

Technische Grundlagen		
Basisdaten		
installierte Leistung in kW		32,10
Ertrag/ kW in kWh/ a		955,00
Zuschlag Nachführung	28%	267,40
Zuschlag Luftkühlung PV	2,25%	21,49
Ertrag/kW in kWh/ a real		1.243,89
Ertrag Anlage in kWh/a		39.928,79
Degradation / a in %	0,25%	99,75%
Basisdaten		
Wirkungsgrad	12%	
Abweichung von Basisdaten		
Wirkungsgrad	14%	
Abweichung in %	17%	
Auswirkung Abweichung auf Ertrag in kWh / a	4.325,62	44.254,41
Wirtschaftliche Grundlagen		
Anschaffung		
Ppeak/Modul in kW	0,15	
Anzahl Module	214	
€ / Modul	273,11	
PV-Kosten	58.445,54	
Sekundär- Hardware	22.501,53	
Netzanschluss	0	
Gesamtkosten in €	80.947,07	
in Betriebsphase		
Eigenkapitalquote	35,00%	
Fremdfinanzierung	65,00%	
Eigenkapital in €	20.455,94	
Fremdkapital in €	37.989,60	
Zinssatz	4,50%	
Tilgungsart	linear	
Tilgungszeitraum in Jahren	10	
ab 2. BJ Tilgung / a	3.798,96	
Pacht	-	
Versicherung	809,47	
Netzanschluss / a	-	
Zins	1.709,53	
Summe Kosten	2.519,00	
Summe Einnahmen		13.365,20

Anhang 6.2: Berechnung Stromentstehungskosten aus Photovoltaik

Betriebsjahr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Summe	
Ertrag / € in kWh																						
incl. Degradation	44.254,41	44.143,77	44.033,41	43.923,33	43.813,52	43.703,99	43.594,73	43.485,74	43.377,03	43.268,58	43.160,41	43.052,51	42.944,88	42.837,52	42.730,42	42.623,60	42.517,04	42.410,75	42.304,72	42.198,96	42.098,96	
Vermeidung Bezug kWh	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	14.200,00	
Einspeisung kWh	30.054,41	29.943,77	29.833,41	29.723,33	29.613,52	29.503,99	29.394,73	29.285,74	29.177,03	29.068,58	28.960,41	28.852,51	28.744,88	28.637,52	28.530,42	28.423,60	28.317,04	28.210,75	28.104,72	27.998,96	27.998,96	
€ aus Bezugsvermeidung	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	4.600,80	
Vergütung EEG	13.365,20	13.316,00	13.266,92	13.217,96	13.169,13	13.120,42	13.071,83	13.023,37	12.975,02	12.926,80	12.878,69	12.830,71	12.782,85	12.735,10	12.687,48	12.639,97	12.592,59	12.545,32	12.498,17	12.451,14	12.451,14	
Ertrag in € / a	17.966,00	17.916,80	17.867,72	17.818,76	17.769,93	17.721,22	17.672,63	17.624,17	17.575,82	17.527,60	17.479,49	17.431,51	17.383,65	17.335,90	17.288,28	17.240,77	17.193,39	17.146,12	17.098,97	17.051,94	17.051,94	
Betriebskosten																						
Pacht	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Versicherung	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	809,47	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	1.011,84	18.213,09
Netzanschluss / a	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Instandhaltung	0	0	775,86	775,86	775,86	775,86	775,86	775,86	775,86	775,86	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	969,83	15.905,22
Reparatur ab 6. BJ	0	0	0	0	0	1.247,81	1.247,81	1.247,81	1.247,81	1.247,81	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	1.590,96	22.148,67
Kapitalkosten																						
Fremdmittel im BJ	37.989,60	37.989,60	34.190,64	30.391,68	26.592,72	22.793,76	18.994,80	15.195,84	11.396,88	7.597,92	3.798,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Zins	1.709,53	1.709,53	1.538,58	1.367,63	1.196,67	1.025,72	854,77	683,81	512,86	341,91	170,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Tilgung	0	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	3.798,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Summe Kosten	2.519,00	6.317,96	6.922,87	6.751,92	6.580,97	6.409,97	6.238,97	6.067,97	5.896,97	5.725,97	5.554,97	5.383,97	5.212,97	5.041,97	4.870,97	4.699,97	4.528,97	4.357,97	4.186,97	4.015,97	3.844,97	5.268,43
Darlehen nach Tilgung	37.989,60	34.190,64	30.391,68	26.592,72	22.793,76	18.994,80	15.195,84	11.396,88	7.597,92	3.798,96	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Liquidität Ende BJ. EEG	15.446,99	27.045,82	37.990,67	49.057,51	60.246,48	70.309,67	80.405,63	90.503,88	101.234,74	111.788,32	121.725,27	135.584,16	149.395,17	163.158,45	176.874,10	190.542,24	204.163,00	217.736,49	231.262,82	244.742,13	244.742,13	
Kosten / kWh *a	0,0569	0,1431	0,1572	0,1537	0,1502	0,1467	0,1432	0,1397	0,1362	0,1327	0,1292	0,1257	0,1222	0,1187	0,1152	0,1117	0,1082	0,1047	0,1012	0,0977	0,0942	
																						0,1216

zu „€ aus Bezugsvermeidung“:

dieser Betrag basiert auf dem durchschnittlichen Bezugspreis der RWE AG von 0,324 €/kWh sowie einer Jahresbezugsmenge von 14.200 kWh

Anhang 7: Übersicht Netzausfälle Zilsdorf (2xN80)

Datum	Von	Bis	Was betroffen?	Grund
19.06.2006	19:11	21:33	110 kV-Station; Spannungseinbrüche	Gewitterbedingte Kurzunterbrechungen
19.07.2006	11:42	13:24	110 kV-Station	Isolationsdurchschlag in einem Mittelspannungskabel
27.07.2006	13:33	14:42	110 kV-Station	Gewitter
28.07.2006	13:18	15:26	110 kV-Station	Gewitter
04.11.2006	18:22	19:44	Stromausfall	Frequenzabhängiger Lastabwurf
18.01.2007	15:00		Kurzzeitige Spannungserhöhung	Wetterbedingte Kurzunterbrechungen
19.01.2007		01:00		
02.04.2007	00:32	00:34	Stromausfall 110 kV- Station	Kurzschluss
07.06.2007	19:00	20:30	Mehrere, kurzzeitige Unterbrechungen d. Stromversorgung	Starke Gewitter
09.06.2007	09:39	14:41	Mehrere, kurzzeitige Unterbrechungen d. Stromversorgung	Starke Gewitter
10.06.2007	15:02	20:00		
25.06.2007	00:54	01:15	110 kV-Station	Starke Gewitter
12 Ausfälle	Ø Dauer: 161 Min			

Anhang 8: Solarstrahlungskarte Europa

