

Bachelorthesis

Mathes Nagengast

Simulation eines autarken
Energieversorgungssystems basierend auf
erneuerbaren Energien in dezentralen Strukturen

Mathes Nagengast

Simulation eines autarken
Energieversorgungssystems basierend auf
erneuerbaren Energien in dezentralen Strukturen

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Röther

Abgegeben am 02. Juni 2015

Mathes Nagengast

Thema der Bachelorthesis

Simulation eines autarken Energieversorgungssystems basierend auf erneuerbaren Energien in dezentralen Strukturen

Stichworte

Energieversorgungssystem, Netzsimulation, Lastflussanalyse, Erneuerbare Energie, PowerFactory, Photovoltaik, Windenergie, Pellworm

Kurzzusammenfassung

Das Energienetz der Zukunft hängt unmittelbar mit dem stetigen Ausbau erneuerbaren Energien zusammen; ergo steigt der Anteil an fluktuierender Energieerzeugung. Eine Simulation eines Energieversorgungssystems aus Wind- und Solarenergie gibt Aufschluss über die Autarkie und dem Speicheraufwand. Als Referenz der Anlagen- und Siedlungsstruktur dient die nordfriesische Insel Pellworm. Mit diesen Daten lassen sich schließlich grobe Abschätzungen zur Wirtschaftlichkeit eines Einsatzes von Speichersystemen treffen.

Mathes Nagengast

Title of the paper

Simulation of a self-sufficient power supply system based on renewable energies in decentralized structures

Keywords

Power system, power system simulation, load flow analysis, renewable energies, PowerFactory, photovoltaics, wind power, Pellworm

Abstract

The future energy grid is associated with an expansion of renewable energies. Consequently the fluctuation of power generation increases. A power system simulation of wind power and solar energy indicates information about self-sufficiency and required storage utilization. The plant and settlement structures of the North Frisian Island Pellworm sample as reference. These data show an estimate for economics of storage systems.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis und Symbolverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	9
2 Pellworm als Grundlage eines autarken Energieversorgungssystems	11
2.1 Historie	11
2.2 Anlagenstruktur	12
3 Modellierung und Datengrundlage des Energieversorgungssystems	14
3.1 DIgSILENT PowerFactory.....	14
3.2 Dezentrale Energieversorgung, Autarkie und Residuallast.....	17
3.3 Lastprofile von Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft.....	18
3.3.1 Verwendung von Standardlastprofilen	19
3.3.2 Modellierung in PowerFactory	23
3.4 Windenergie und Windkraftanlagen.....	26
3.4.1 Meteorologische Daten.....	26
3.4.2 Anlagenmodell und Leistungsberechnung	27
3.4.3 Modellierung in PowerFactory	32
3.5 Photovoltaik.....	33
3.5.1 Meteorologische Daten.....	33
3.5.2 Anlagenmodell und Leistungsberechnung	36
3.5.3 Modellierung in PowerFactory	37
3.6 Energiespeicher	40

3.6.1 Redox-Flow Batteriesystem	41
3.6.2 Lithium-Ionen Batteriesystem	42
3.6.3 Modellierung in PowerFactory	43
4 Simulation und Lastflussanalyse des Energieversorgungssystems	44
4.1 Die Lastflussanalyse als quasi-dynamische Simulation	45
4.1.1 Leistungsprofil der Energieerzeugung	46
4.1.2 Leistungsprofil des Verbrauchs gegenüber der Erzeugung	48
4.1.3 Leistungsprofil der Residuallast	49
4.2 Auswertung und Ergebnisse	50
4.2.1 Wirtschaftlichkeit eines Lithium-Ionen-Batteriesystems	55
4.2.2 Wirtschaftlichkeit eines Redox-Flow-Batteriesystems	56
4.2.3 Szenario: Netzanschlusskosten im Vergleich zu Speicherkosten.....	57
5 Zusammenfassung und Ausblick	58
Literaturverzeichnis	LXI
Anhang	LXIV

Abkürzungsverzeichnis und Symbolverzeichnis

Abkürzungen

<i>AG</i>	Aktiengesellschaft
<i>BDEW</i>	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.
<i>CO₂</i>	Kohlenstoffdioxid
<i>DSM</i>	Demand-Side-Management (Laststeuerung)
<i>DWD</i>	Deutscher Wetterdienst
<i>e.V.</i>	eingetragener Verein
<i>G0</i>	Standartlastprofil des BDEW für allgemeines Gewerbe
<i>H0</i>	Standartlastprofil des BDEW für Haushalt
<i>L0</i>	Standartlastprofil des BDEW für allgemeinen Landwirtschaftsbetrieb
<i>Li-Ion</i>	Lithium-Ionen Akkumulator (Batterie)
<i>MATLAB</i>	MATrix LABoratory
<i>MPP</i>	Maximum Power Point (Punkt maximaler Leistung)
<i>NHN</i>	Normalhöhennull
<i>NOCT</i>	Zellen-Nennbetriebstemperatur (normal operating cell temperature)
<i>poly-Si</i>	polykristallines Silicium
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>SLP</i>	Standartlastprofil
<i>STC</i>	Standard-Test-Bedingungen
<i>VDE</i>	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
<i>VRFB</i>	Vanadium-Redox-Flow-Batterie
<i>WKA</i>	Windkraftanlage
<i>p. u.</i>	Per-Unit (einheitslose Hilfsmaßeinheit)

Symbolverzeichnis

E_{STD}	Standardstrahlungswert von 1000 W/m^2
$E_{g,pv}$	Globalstrahlung, senkrecht zum Solarkollektors in W/m^2
I_{SC}	Kurzschlussstrom (short circuit)
I_{mpp}	Stromstärke im Punkt maximaler Leistung
P_B	Bezugsleistung (Wirkleistung)
P_{MPP}	Leistung im Maximum Power Point
U_{OC}	Leerlaufspannung (open circuit)
U_{mpp}	Spannung im Punkt maximaler Leistung
η_{Modul}	Relative Effizienz des Solarmoduls
$\eta_{Umrichter}$	Wirkungsgrad des Umrichters
A	Rotorfläche
E	Energie
J	Joule
P	Wirkleistung
P	Wirkleistung
T	Temperatur
V	Volumenstrom
m	Masse
v	Windgeschwindigkeit
ρ	Luftdichte

Abbildungsverzeichnis

3.1: Oberfläche und Datenmanager von PowerFactory	15
3.2: Haushalt (H0) Lastprofile von Sommertagen nach BDEW	19
3.3: Zusammensetzung der H0 Lastprofile in PowerFactory.....	20
3.4: H0 (oben), G0 (Mitte) und L0 (unten) Lastprofil nach BDEW	21
3.5: Windgeschwindigkeiten im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst)	27
3.6: Leistungskurve der Enercon E70 E4 (7)	28
3.7: Erzeugte Windenergieleistung einer Enercon E70 E4 im Jahr 2014	31
3.8: Lufttemperatur im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst).....	34
3.9: Globalstrahlung im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Werte bearbeitet)	35
3.10: Erzeugte Solarenergie der gesamten Photovoltaik im Jahr 2014.....	39
3.11: Schematische Darstellung der Vorgänge innerhalb eines Redox-Flow-Systems (3)..	41
3.12: Prinzip des Lithium-Ionen Akkumulators (14).....	42
4.1: Darstellung des vereinfachten Energieversorgungsystems in PowerFactory	44
4.2: Leistungsprofil der Energieerzeugung im Jahr 2014	46
4.3: Leistungsprofil des Verbrauchs gegenüber der Erzeugung	48
4.4: Leistungsprofil der Residuallast im Jahr 2014.....	49
4.5: Energiemangel und höchste Energiedichte (rot).....	52
4.6: Höchste Energiedichte im November 2014	53

Tabellenverzeichnis

2.1: Standortdaten der nordfriesischen Insel Pellworm	11
3.1: Wetterstation für Windmessung von geeigneten Windgeschwindigkeiten	26
3.2: Wetterstation für Solarberechnung und Temperaturmessung.....	33
3.3: Elektrische Daten - Shell PowerMax Plus 160-C (9)	37
4.1: Simulationsergebnis der Energieerzeugung durch Windkraft im Jahr 2014	47
4.2: Simulationsergebnis der Energieerzeugung durch Photovoltaik im Jahr 2014	47
4.3: Simulationsergebnis der gesamten Energieerzeugung im Jahr 2014.....	47
4.4: Simulationsergebnis des Energieverbrauchs im Jahr 2014.....	48
4.5: Energiemangel und -überschuss im Jahr 2014.....	50
4.6: Übersicht der Speicheranforderung des Energieversorgungssystems.....	53
4.7: Eigenschaften der auf Pellworm bereits installierten Speichersystemen	54

1 Einleitung

Als eine der zentralen Herausforderungen in der heutigen Zeit gilt das Thema der Energie, vielmehr der Energieerzeugung. Gekennzeichnet durch die Endlichkeit fossiler Energieträger, dem steigendem Energiebedarf und der Notwendigkeit der Reduktion des CO₂-Ausstoßes befindet sich die Energiewirtschaft in einer Umbruchphase [1], sodass die Nachfrage an Umweltverträglichkeit, Nachhaltigkeit und zugleich einer preisgünstigen Energie steigt. Für diese Herausforderung gibt es eine klare Antwort, die Klaus-Dieter Schuerle, ehemaliger Staatssekretär im Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, im Januar 2012 wie folgt äußerte: *„Die erneuerbaren Energien sind die tragende Säule für unsere Energieversorgung der Zukunft. Ihr Ausbau ist das zentrale Ziel des Energiekonzeptes der Bundesregierung.“* [2]

Um einen erfolgreichen Ausbau und vor allem eine hohe Effizienz der erneuerbaren Energien verzeichnen zu können, ist es von großer Wichtigkeit, verschiedene Lösungsansätze und Konzepte zu entwickeln und diese zu verstehen. Anhand einer Simulation einer exemplarischen Siedlungsstruktur wird in dieser Arbeit das Potenzial der unterbrechungsfreien Energieversorgung durch Wind- und Sonnenenergie zur Strombedarfsdeckung untersucht. Dabei wird der Aspekt der Autarkie sowie der dezentralen Stromversorgung betrachtet, was mit der Notwendigkeit von Energiespeichern einhergeht, sodass ein Stromimport aus dem Verbundnetz entfällt. Es stellt sich folgende Forschungsfrage:

„Ist es möglich ein zentrales Großspeichersystem für eine ländliche Siedlungsstruktur so auszulegen, dass ein autarkes Energieversorgungssystem mit Hilfe von Sonnen- und Windenergie entsteht?“

Als Beispiel für die Grundlage einer geeigneten Anlagen- und Siedlungsstruktur dient die nordfriesische Insel Pellworm. Die Stromerzeugung ist dort wesentlich höher als der Verbrauch, steht jedoch nicht zu jedem Zeitpunkt am Tag zur Verfügung, sodass ein hybrides Speichersystem entwickelt wurde. Trotz eines bereits vorhandenen Speichersystems und einer überschüssigen Erzeugung ist eine Verbindung zum Festland

vorhanden. Es gilt zu untersuchen, ob diese Verbindung gelöst werden könnte und die Insel autark versorgt werden kann. Dazu wird zu Beginn der Arbeit die Struktur der Energieerzeuger und -verbraucher, wie sie auf Pellworm vorhanden sind, vereinfacht und bilanziell zusammengetragen. Als Fallbeispiel dient das Jahr 2014 mit geeigneten meteorologischen Daten für die Wind- und Sonnenenergieerzeugung. Als Simulationssoftware dient das Programm PowerFactory, entwickelt von der Firma DigSILENT, mit dessen Hilfe ein vereinfachtes Energieversorgungssystem grafisch dargestellt wird und Lastflussberechnungen durchgeführt werden. Als unterstützende Software für Berechnungen und Diagrammerstellungen dient das Programm MATLAB. Die durch eine Lastflussanalyse zusammengetragenen Leistungsprofile fungieren schlussendlich der Auswertung, ob die Möglichkeit besteht, das modellierte Energieversorgungssystem autark fahren lassen zu können. Für diese Auswertung werden ferner grobe Abschätzungen für die Auslegung von Batteriespeichern getroffen und miteinander verglichen. Am Ende der Arbeit wird die Erkenntnis durch eine Zusammenfassung abgerundet sowie ein Ausblick über zukünftige Überlegungen und Konzeptentwicklungen gegeben.

2 Pellworm als Grundlage eines autarken Energieversorgungssystems

Die Insel Pellworm liegt im Norden Deutschlands und gehört zu den nordfriesischen Inseln. In dieser Gemeinde leben knapp 1200 Einwohner in 650 Haushalten. Neben dem Tourismus ist die Landwirtschaft ein wichtiger wirtschaftlicher Zweig. Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft erfordern einen jährlichen Verbrauch von ungefähr 7 GWh. Pellworm ist ein optimaler Standort für die Energiegewinnung aus erneuerbaren, da die geografische Lage ein hohes Potenzial an Wind- und Solarenergie hervorbringt. Dieses Potenzial wurde frühzeitig erkannt, wodurch Pellworm heute eine Art Musterregion für Energiekonzepte darstellt. Somit sind bereits viele wichtigen Daten für eine Simulation und Modellierung eines derartigen Energieversorgungssystems bekannt.

Standort	Fläche	Geo. Breite	Geo. Länge	Höhe	Einwohner
Pellworm	37,44 km ²	54°31'	8°39'	2m über NHN	~1200

Tabelle 2.1: Standortdaten der nordfriesischen Insel Pellworm

2.1 Historie

Bereits seit vielen Jahren ist die Nordseeinsel Pellworm ein interessanter Standort für intelligente und zukunftsweisende Energiekonzepte. 1983 wurde eines der größten Solarkraftwerke errichtet, welches in den folgenden Jahren um Windenergieanlagen ergänzt wurde und zu seiner Zeit zu Europas größtem Hybridkraftwerk ausgebaut worden ist. Im Laufe der Jahre wurden weitere Erweiterungen, Recycling von PV-Anlagen sowie ein Repowering von Windenergieanlagen vorgenommen. Weitere Innovationsstudien und Energiekonzepte führten im Jahr 2012 schließlich zum Projekt „SmartRegion Pellworm“ [3]. Das Ziel dieses interessanten Projektes ist es, ein intelligentes Netz (Smart Grid) zu entwickeln, sowie die Elektrizitätsversorgung auf Basis erneuerbarer Energien mit einem hybriden Speichersystem stabil, kosteneffizient und marktorientiert zu erschaffen. Somit wurde unter anderem das Hybridkraftwerk um ein zentrales Speichersystem ergänzt und 2013 als Gesamtheit in Betrieb genommen. Seit 2014

läuft der offizielle Testbetrieb unter dem Leitsatz: „Die Verknüpfung dezentraler Erzeugungsanlagen mit innovativer Speichertechnik und intelligenten Netzmanagementsystemen macht Pellworm zur Musterregion für die Energiewelt der Zukunft.“ [3]

2.2 Anlagenstruktur

Über zwei 20kV - Seekabel ist die Insel Pellworm an das Festland angeschlossen. Mehr als 50 Ortsnetz-Stationen sorgen für die Energieverteilung in die Netze für Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft. Die gesamte Leistungsfähigkeit der auf der Insel vorhandenen Energieerzeugungsanlagen beträgt in etwa 10 bis 12 MW. Das Hybridkraftwerk liefert dabei einen Anteil von 1 MW und besteht aus einem Solarkraftwerk mit einem Solarmodul-Mix (ca. 700 kW) und einer Windenergieanlage (ca. 300 kW). Der Anteil der restlichen dezentralen Erzeugung besteht zum Großteil aus privaten Anlagen, wie Solaranlagen auf den Dächern der privaten Haushalte, aus weiteren Windenergieanlagen und einen kleinen Windpark von drei Windkraftanlagen. Bilanziell zusammengerechnet entsteht auf Pellworm eine jährliche Elektrizitätserzeugung von ungefähr 22 GWh. Insofern ist die Energieerzeugung knapp dreimal höher als der Energieverbrauch. Neben der Energieerzeugung wurden auf Pellworm in den letzten Jahren innovative Speichertechnologien entwickelt und bereits installiert. Das hybride Speichersystem besteht aus zwei zentralen Großspeichern: Aus der Vanadium-Redox-Flow Batterie, mit einer Kapazität von 1600 kWh und einer Entladeleistung von 200 kW als „Stunden-bis-Tag“-Speicher und der Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion) mit einer Kapazität von 560 kWh und einer Entladeleistung von 1,1 MW als „Minuten-bis-Stunden“-Speicher. Weiterhin sind lokale bzw. dezentrale Speicher, wie Li-Ion-Haushaltsspeicher und Elektrospeicher-Heizungen vorhanden, die in den Haushalten direkt installiert sind. Trotz all dieser Speichertechnologien und der überschüssigen Energieerzeugung importiert und exportiert Pellworm Strom vom Festland, da der Verbrauch und die Produktion von Energie nicht

zeitgleich stattfinden und die gesamte Speicherkapazität bei Überschüssen und Engpässen nicht ausreichend ist.

Die Anlagenstruktur auf Pellworm liefert viele wichtige Daten, die für eine Lastflussanalyse notwendig sind und eine Simulation eines Energieversorgungssystems ermöglicht. Jedoch ist der Anteil an privaten Projekten und Anlagen sehr hoch, wodurch aus Datenschutzgründen auf eine Vielfalt verschiedenster Anlagentypen für die Simulation abgesehen wird. Für die Untersuchung und Simulation dieser Arbeit wird die Anlagenstruktur vereinfacht dargestellt, indem alle dezentralen Anlagen und das Hybridkraftwerk bilanziell zusammengefasst werden und der Fokus auf die Erzeuger und Verbraucher gelegt wird.

3 Modellierung und Datengrundlage des Energieversorgungssystems

Auf Grundlage der beschriebenen Siedlungs- und Anlagenstruktur Pellworms, werden in diesem Kapitel alle wichtigen Komponenten für eine geeignete Simulation modelliert. In erster Linie wird eine Lastflussanalyse zwischen Energieverbrauch und -erzeugung durchgeführt, um anschließend Rückschlüsse auf den Einsatz von elektrischen Speichern ziehen zu können. Da das zu gestaltende Energieversorgungssystem rein auf erneuerbare Energie basiert, sprich einer Erzeugung aus Solar- und Windenergie, ist es notwendig, den Charakter des Versorgungsmodells mit fluktuierender Energieerzeugung zu prägen. Dafür werden die kostenfrei zur Verfügung stehenden meteorologische Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) vom Jahr 2014 verwendet. Weiterhin werden für eine geeignete Konfiguration der Komponenten Daten aus Leistungskurven und Datenblättern von einzelnen Herstellern genutzt. Für den Verbrauch werden Standardlastprofile (SLP) des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) konsultiert, da Lastgänge der privaten Haushalte oder Landwirtschaftsbetriebe nicht vorliegen.

Es kommt darauf an diese Komponenten für den Einsatz der Software PowerFactory zu vereinfachen und mit geeigneten Daten für eine Lastflussanalyse zu konfigurieren. Durch Einschränkungen der Funktionalität der Software, bedingt durch die Benutzerlizenz, wird die Software MATLAB (MATrix LABoratory), entwickelt von der Firma The MathWorks, als Unterstützung für Berechnungen sowie zur grafischen Darstellung herangezogen.

3.1 DIgSILENT PowerFactory

PowerFactory ist ein Berechnungsprogramm, welches von der Firma DIgSILENT ("Digital Simulation and Electrical Network calculation program") entwickelt wurde. Es dient als Software zum Analysieren, Entwickeln und Planen von Energieversorgungssystemen, Verteiler- und Übertragungsnetzen. Mit einer grafischen Benutzeroberfläche und einem umfangreichen Spektrum an Funktionen erfüllt PowerFactory alle Anforderungen einer statischen und dynamischen Analyse und Optimierung von Energieversorgungssystemen.

Darüber hinaus sind Stabilitätsberechnungen, Zuverlässigkeitsanalysen, Rentabilitätsberechnungen u.v.m. möglich, wobei im Rahmen dieser Arbeit die Lastflussanalyse bzw. quasi-dynamische Simulation verwendet werden. Die Funktionsweise bzw. ein besonderes Konzept von PowerFactory ist, dass es auf einer hierarchischen, objektorientierten Datenbank basiert. Daher werden alle Daten, seien es Elemente eines Energieversorgungssystems, Betriebsfälle, Netzgrafiken, Programmeinstellungen, usw. als Objekte deklariert. Diese Objekte werden wiederum in Gruppen zusammengefasst und in der PowerFactory-Umgebung klassifiziert. Ein integrierter Datenbankmanager organisiert all diese Daten, Definitionen, Bibliotheken und Einstellungen für das Betreiben der Software.

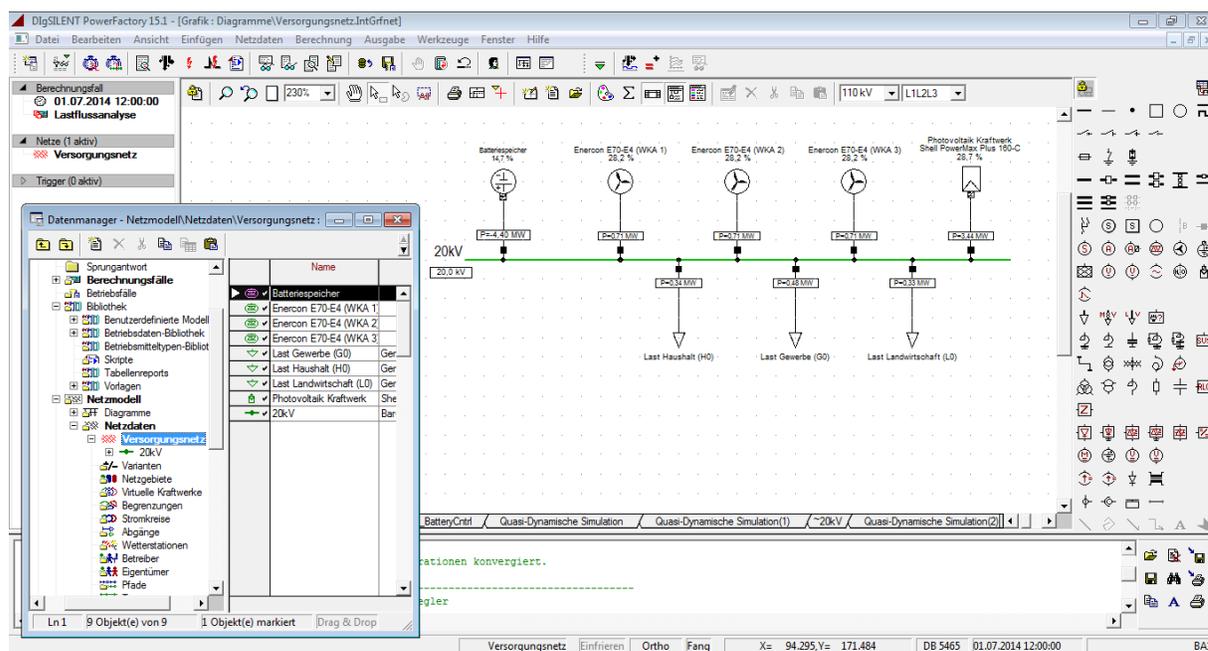


Abbildung 3.1: Oberfläche und Datenmanager von PowerFactory

Die Firma DIGSILENT stellt Studenten für die Bearbeitung einer Abschlussarbeit eine kostenfreie Lizenz zur Verfügung, welche zeitlich begrenzt ist. In der Benutzerlizenz dieser Arbeit, sind das Basispaket, Überstromzeitschutz, Kabeldimensionierung und 50 Knoten zum Anschluss von Elementen/Komponenten enthalten. Durch diese Einschränkungen in

der Benutzerlizenz der Software, wurden die Anlagen und die Struktur teilweise vereinfacht dargestellt. Es ist bspw. nicht möglich gewesen, eine Leistungsberechnung für Windkraftanlagen durchzuführen, da hierfür das Funktionspaket einer Erzeugungszuverlässigkeit nötig ist. Weiterhin sind durch die Einschränkungen transiente Betrachtungen, wie das Laden und Entladen einer Batterie, nicht möglich, wodurch die Komponente des elektrischen Speichers stark vereinfacht wurde. Dementsprechend konzentriert sich die Simulation des Energieversorgungssystems durch PowerFactory auf eine Reihe von Lastflussanalysen im stationären Betrieb.

3.2 Dezentrale Energieversorgung, Autarkie und Residuallast

Der Begriff der dezentralen Energieversorgung beschreibt die verbrauchernahe Energieerzeugung in kleinen, in der Fläche verteilten Anlagen. Beispielsweise Photovoltaikanlagen, die auf den Dächern von privaten Haushalten installiert sind. Zu den dezentralen Stromerzeugungsanlagen gehören sowohl Anlagen, die in ein öffentliches Verteilernetz einspeisen, als auch Anlagen, die zur Eigenversorgung dienen. Daher zählen Inselnetze, die sich durch eine Eigenversorgung auszeichnen in Form einer lokalen „Insel“-Autarkie [4] ebenfalls dazu. Gemäß Dipl.-Ing. (FH) Stefan Peter geht die lokale „Insel“-Autarkie von „Energieinseln aus, Gemeinden oder Stadtteilen also, die keinen Anschluss an ein überregionales Stromverbundnetz haben. Da in einem solchen Falle aufgrund des fluktuierenden Charakters insbesondere der Wind- und Solarenergie die lokale Last nicht zu jedem Zeitpunkt aus den vor Ort vorhandenen erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden kann, müssen Speichersysteme vorgehalten werden. Diese gilt es so zu dimensionieren, dass die Versorgungssicherheit zu jedem Zeitpunkt gewährleistet ist: Die elektrische Energie, die zu manchen Zeiten nicht verbraucht werden kann (negative Residuallast), muss für die Zeiten zwischengespeichert werden, in denen die Einspeisung aus erneuerbaren Quellen nicht zur Lastdeckung ausreicht (positive Residuallast).“ [4]

In diesem Sinne geht der Begriff der Autarkie mit dem Begriff der dezentralen Energieversorgung einher. Das bedeutet, dass im Rahmen dieser Arbeit der Begriff der dezentralen Energieversorgung als autarkes Inselnetz anzusehen ist. Die Anlagen sind nicht als verteilte Kleinanlagen anzusehen, sondern werden bilanziell zu einer gesamten Lastflussanalyse zusammengefasst. Die genannte Residuallast stellt den Energiemangel bzw. den Energieüberschuss dar, der zwischen Erzeugung und Verbrauch entsteht und ist für die Auslegung von elektrischen Speichern eine wichtige Kenngröße.

3.3 Lastprofile von Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft

Ein Lastprofil oder auch Lastgang bezeichnet den zeitlichen Verlauf des Verbrauchs bzw. der abgenommenen Leistung über eine zeitliche Periode. Jede Verbrauchergruppe (Haushalt, Gewerbe, Landwirtschaft etc.) und jeder einzelne Verbraucher haben einen individuellen Leistungsbezug, sodass es ohne messtechnische Verfahren nicht möglich ist, spezifische Lastprofile zu erstellen. Daher werden für die Simulation des Verbrauchs Standardlastprofile (SLP) verwendet, welche den durchschnittlichen Energieverbrauch der jeweiligen Verbrauchergruppe bilanzieren. Häufig finden die Standardlastprofile des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) Anwendung. So auch für die Lastflussanalyse dieser Arbeit, da PowerFactory bereits vorgefertigte Lastprofile des BDEW zur Verfügung stellt. Lastprofile unterliegen starken tageszeitlichen Schwankungen und sind von den Typtagen (Wochentag, Samstag, Sonntag) sowie von den Jahreszeiten (Sommer, Winter, Übergang) her sehr unterschiedlich. Insgesamt gibt es daher neun verschiedene Standardlastprofile für die jeweiligen Verbrauchergruppen. Folgende Verbrauchergruppen werden im Rahmen dieser Arbeit verwendet:

- H0: Haushalt
- G0: Gewerbe allgemein
- L0: Landwirtschaftsbetriebe allgemein

Die Daten dieser Lastprofile liegen in stündlicher Auflösung, als relativer Verbrauch der Leistung, in der PowerFactory-Bibliothek bereit.

3.3.1 Verwendung von Standardlastprofilen

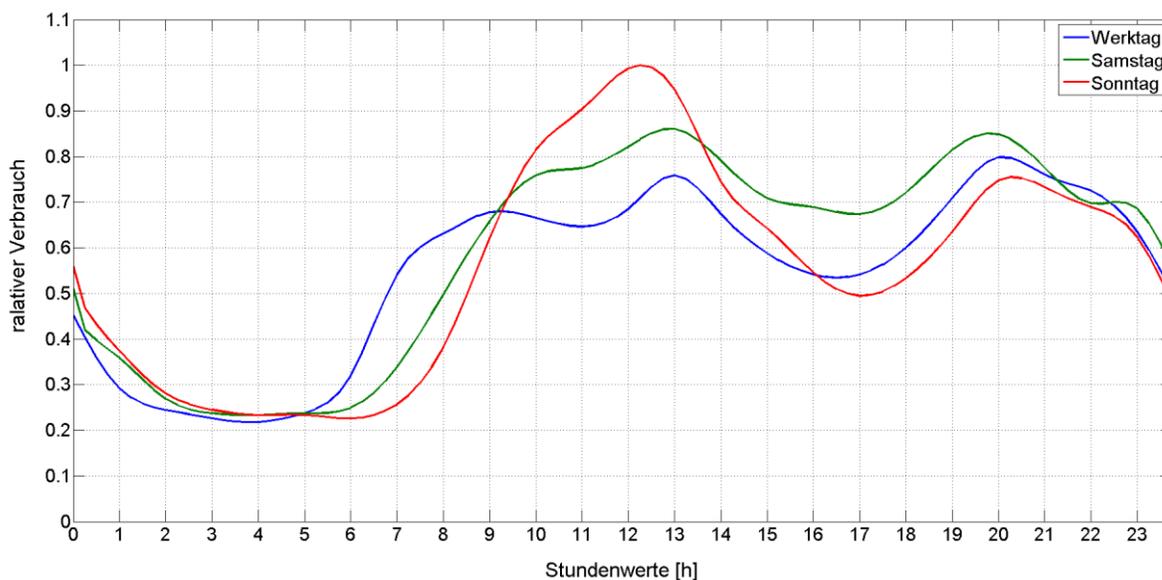


Abbildung 3.2: Haushalt (H0) Lastprofile von Sommertagen nach BDEW

Das beispielhafte Lastprofil aus der Abbildung 3.2 zeigt das typische Verbrauchsverhalten von einem Haushalt an verschiedenen Wochentagen im Sommer. Während der Nachtruhe wird wenig Energie verbraucht, während zur Mittagszeit der Verbrauch bis zu 1 *p.u.* (relativer und einheitsloser Wert) in der Spitze erreicht. Zu erkennen ist ebenfalls, dass eine Grundlast von mindestens 0,2 *p.u.* vorhanden ist, bspw. durch den Dauerbetrieb eines Kühlschranks. Durch den relativ hohen Verbrauch in den Abendstunden (20:00 - 23:00 Uhr), lässt sich bereits ein kritischer Punkt abzeichnen, da die Energieerzeugung durch Solarenergie hier nur noch schwach bis gar nicht mehr vorhanden ist. Das durchschnittliche Verbrauchsverhalten eines gesamten Jahres ist weiterhin abhängig von jahreszeitlichen Schwankungen, welche von den BDEW-Standardlastprofilen in Sommer-, Winter- und Übergangsjahreszeit eingeteilt wird. Somit entsteht eine zusammengesetzte Charakteristik aus den einzelnen Lastprofilen. Die Software PowerFactory stellt diese zusammengesetzte BDEW-Zeitcharakteristiken, wie in der nachfolgenden Abbildung 3.3 dargestellt, für jede Verbrauchergruppe zur Verfügung.

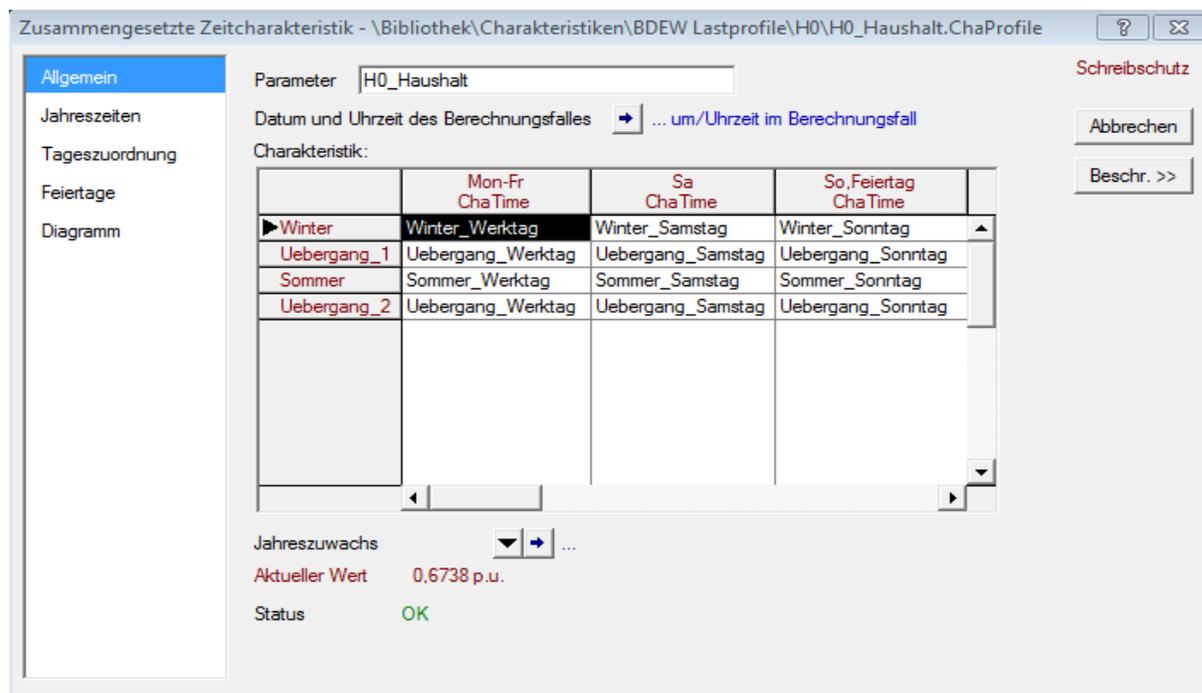


Abbildung 3.3: Zusammensetzung der H0 Lastprofile in PowerFactory

Das gesamte im Jahr vorhandene Lastprofil ist eine Zusammensetzung aus den einzelnen Standardlastprofilen des BDEW. Dabei können die Jahreszeiten auf den Tag und Monat genau zugeordnet, sowie Feiertage hinzugefügt werden, sodass sich darüber hinaus auch mehrere Jahre darstellen lassen. Diese Form der zusammengesetzten Charakteristik findet sich für alle Verbrauchergruppen wieder. Die Lastprofile für die Zusammensetzung des Jahres 2014 der Verbrauchergruppen Haushalt (H0), Gewerbe (G0) und der Landwirtschaft (L0) sind in den folgenden drei Grafiken dargestellt.

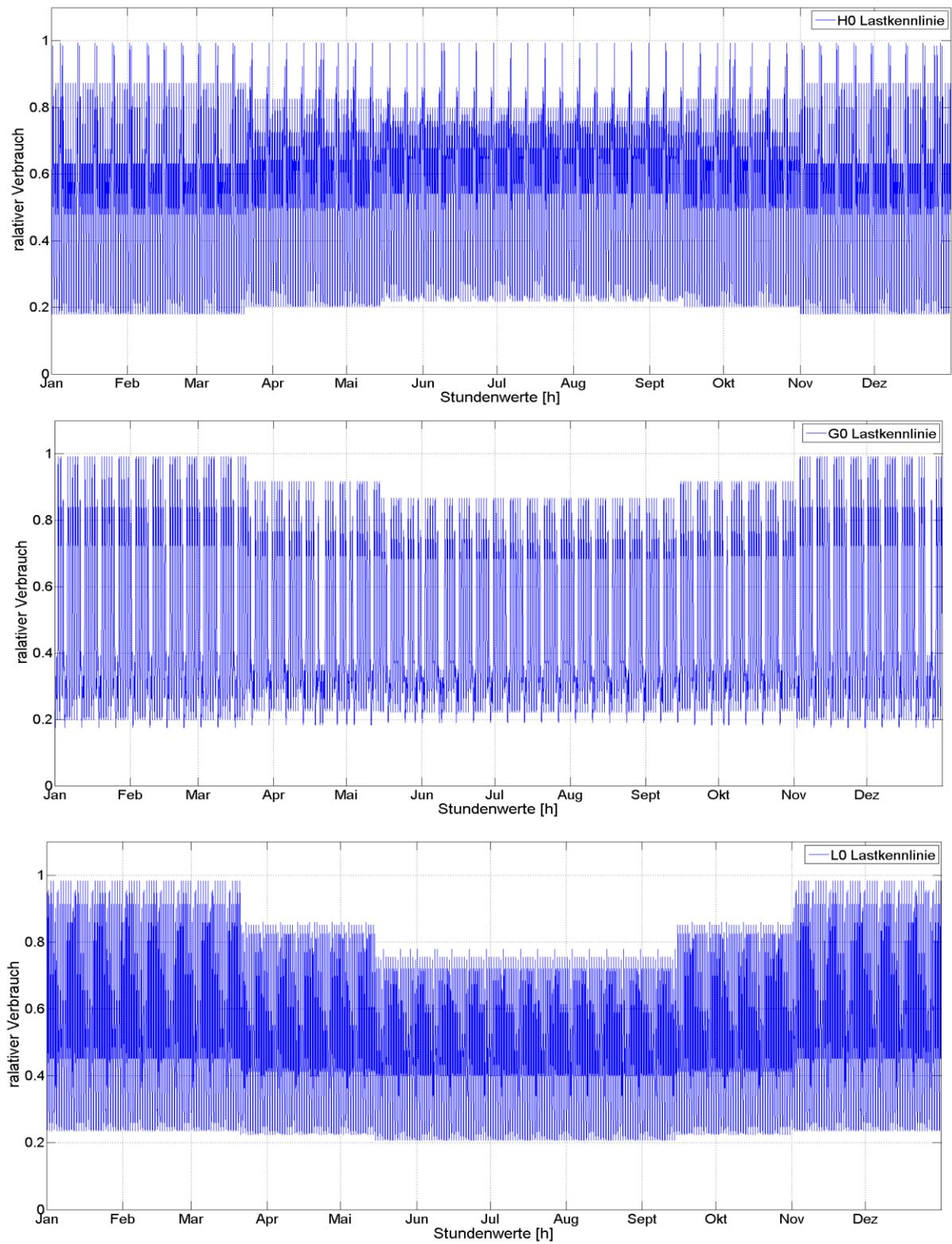


Abbildung 3.4: H0 (oben), G0 (Mitte) und L0 (unten) Lastprofil nach BDEW

Aus den drei Grafiken der Abbildung 3.4 ist der Verbrauch der entsprechenden Jahreszeit stets zu erkennen. Im Winter sind die Tage kurz, sodass wesentlich mehr Beleuchtung notwendig ist. Daher sind die Spitzen in den Wintertagen allgemein höher als im Sommer. Auffällig sind, wie bereits in Abbildung 3.2 erörtert, die Spitzen im Haushalt, die während der Sonntage auftreten. Im Gegensatz zu den kurzen Spitzen im Haushalt, ist der Verbrauch beim Gewerbe relativ kontinuierlich. Hier befinden sich Lücken während der Sonntage, da das Gewerbe dort meist geschlossen hat. Die Grundlasten von Haushalt und Gewerbe sind jedoch recht ähnlich. Dieses ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Kühlleistungen im Sommer steigen. In dem Profil der Landwirtschaft verhält es sich ein wenig anders. Dort sind kontinuierliche Lasten erkennbar, ohne kurze Spitzen oder Lücken. Zurückzuführen ist dies bspw. durch die Viehzucht, da Ställe im Winter stärker belüftet werden müssen. Auffallend ist bei allen drei Verbrauchergruppen, dass der Verbrauch in den Wintermonaten höher ist. Damit ist ein weiterer kritischer Punkt entstanden, da in den Wintertagen der Ertrag durch die Photovoltaikanlagen, aufgrund geringerer Globalstrahlungswerte, niedriger ausfällt.

Anhand des Projektes „SmartRegion Pellworm“ [3] ist bekannt, dass der durchschnittliche Verbrauch der Insel Pellworm $E_{Gesamt} = 7000 \text{ MWh}$ im Jahr beträgt. Da die genaue Struktur von Landwirtschaft, Gewerbe und Haushalt unbekannt ist, werden die Lasten gleichermaßen aufgeteilt und es entsteht folgender Jahresdurchschnitt für die einzelnen Verbrauchergruppen:

$$E_{H0} = E_{G0} = E_{L0} = \frac{1}{3} E_{Gesamt} = \frac{1}{3} \cdot 7000 \text{ MWh} \approx 2333 \text{ MWh} \quad (3.1)$$

Die Anzahl der Haushalte auf Pellworm beträgt $Anzahl_{Haushalte} = 650$. Der Jahresverbrauch der Verbrauchergruppe H0, dividiert durch diese Anzahl, ergibt:

$$E_{Haushalt} = \frac{E_{H0}}{Anzahl_{Haushalte}} = \frac{2333}{650} MWh \approx 3590 kWh \quad (3.2)$$

Dieser jährliche Verbrauch von $E_{Haushalt} = 3590 kWh$ entspricht im Durchschnitt laut dem Stromspiegel für Deutschland 2014 [5] in etwa dem eines Zwei- bis Dreipersonenhaushaltes in einem Ein- oder Zweifamilienhaus und liegt somit der Realität sehr nahe.

3.3.2 Modellierung in PowerFactory

Die Verbrauchergruppen H0, G0 und L0 werden schließlich für die Lastflussanalyse in PowerFactory konfiguriert. Dazu steht das Objekt einer Allgemeinen Last (.ElmLod) in der Software zur Verfügung, welche sich auf die Eingabe von Leistungswerten beschränkt. Um tages- und jahreszeitliche Schwankungen in der Last darzustellen, ist es möglich, dem Lastmodell eine Charakteristik mit Werten zu übergeben. Diese Charakteristiken stehen, wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, bereits als zusammengesetzte BDEW-Zeitcharakteristiken für jede Verbrauchergruppe zur Verfügung. Da die Werte der Charakteristiken jedoch als relativer Verbrauch in *p.u.* vorliegen, ist es notwendig, die Bezugsleistung P_B zu ermitteln, um den jährlichen Verbrauch der Verbrauchergruppen von $2333 MWh$ zu gewährleisten. Folgende Vorgehensweise führt zur Ermittlung der Bezugsleistung P_B .

Im Allgemeinen ist die elektrische Energie, ob erzeugte oder verbrauchte Energie, die Leistung über einen bestimmten Zeitraum. D.h. $1 kWh$ (Kilowattstunde) ist die Energie, die bei einer Leistung von $1 kW$ innerhalb einer Stunde umgesetzt wird. Nun beträgt die jährlich verbrauchte Energie der Verbrauchergruppen $E_{H0,G0,L0} = 2333 MWh$ und stellt daher die Integration der Leistung über ein gesamtes Jahr in stündlicher Auflösung dar.

Entsprechend dazu wird die jeweilige Charakteristik des relativen Verbrauches über ein Jahr integriert, wodurch sich folgender relativer Energiegehalt der Verbrauchergruppen bildet:

$$E_{H0,pu} = 4674,41 \text{ [h]} \quad (3.3)$$

$$E_{G0,pu} = 4182,95 \text{ [h]} \quad (3.4)$$

$$E_{L0,pu} = 4160,20 \text{ [h]} \quad (3.5)$$

Weiterhin ist der relative Verbrauch definiert als das Verhältnis zwischen tatsächlicher Leistung P und Bezugsleistung P_B . Die Bezugsleistung gilt es zu ermitteln:

$$P_{pu} = \frac{P}{P_B} \rightarrow P_B = \frac{P}{P_{pu}} \quad (3.6)$$

Die Gleichung dient der Berechnung des unbekanntes Bezugswertes der Leistung P_B . Wenn der relative Verbrauch $P_{pu} = 1$ beträgt, ist der Bezugswert $P_B = P$. Mit Hilfe des Energiegehaltes der Standardlastprofile und der Verbrauchergruppen gilt folgendes Verhältnis:

$$\frac{E_{pu}}{E} = \frac{P_{pu}}{P} \xrightarrow{\text{Dreisatz}} P = \frac{E \cdot P_{pu}}{E_{pu}} \quad (3.7)$$

Unter Verwendung des Energiegehaltes der Charakteristiken von den Verbrauchergruppen und $P_B = P$ bei $P_{pu} = 1$ ist es nun möglich die Bezugsleistungen zu berechnen, die für die Simulation der Lastflussanalyse für Haushalt($P_{B,H0}$), Gewerbe($P_{B,G0}$) und Landwirtschaft($P_{B,L0}$), benötigt wird.

$$P = P_{B,H0} = \frac{E_{H0} \cdot P_{pu}}{E_{H0,pu}} = \frac{2333 \text{ MWh} \cdot 1}{4674,41 \text{ h}} = 499,10 \text{ kW} \quad (3.8)$$

$$P = P_{B,G0} = \frac{E_{G0} \cdot P_{pu}}{E_{G0,pu}} = \frac{2333 \text{ MWh} \cdot 1}{4182,95 \text{ h}} = 557,74 \text{ kW} \quad (3.9)$$

$$P = P_{B,L0} = \frac{E_{L0} \cdot P_{pu}}{E_{L0,pu}} = \frac{2333 \text{ MWh} \cdot 1}{4160,20 \text{ h}} = 560,79 \text{ kW} \quad (3.10)$$

Mit der Eingabe dieser Werte und der Übergabe der zusammengesetzten Zeitcharakteristiken ist die Konfiguration der Lasten in PowerFactory abgeschlossen.

3.4 Windenergie und Windkraftanlagen

Das Energieversorgungssystem besteht bisher aus Energieverbrauchern bzw. den Lasten. Damit ein Verbrauch stattfinden kann, muss dementsprechend Energie erzeugt werden. Die Energie, die in den bewegten Luftmassen der Atmosphäre steckt, ist eine der erneuerbaren Energiequellen, die für die Simulation des Versorgungsmodelles genutzt wird. Schon früher wurden die Winde genutzt, um Segelschiffe voranzutreiben oder um Windmühlen zu betreiben. In der heutigen Zeit ist die wichtigste Nutzung der Windenergie das Antreiben von Generatoren, um elektrische Energie zu erzeugen. Dies geschieht durch Windkraftanlagen (WKA), welche die Energie der Luftbewegung auf eine rotierende Achse, zumeist dreiflügelige Rotoren, übertragen. An der rotierenden Achse ist ein Generator angeschlossen und erzeugt elektrische Energie. Nennleistungen von mehreren Megawatt sind mittlerweile der Standard, wobei die Windkraftanlagen auf dem Land (onshore) oder auf dem Meer (offshore) errichtet werden können. Die Insel Pellworm ist im Besitz von Onshore-Windkraftanlagen und durch die relativ hohen Windgeschwindigkeiten in dieser Gegend für die Windenergienutzung sehr gut geeignet.

3.4.1 Meteorologische Daten

Für die Einspeisung durch Windenergie werden Windgeschwindigkeiten benötigt, um der Realität der Erzeugung ein wenig näher zu kommen. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) [6] stellt geeignete Messdaten von Windgeschwindigkeiten aus dem Jahr 2014 zur Verfügung. Um die Wetterdaten möglichst genau der geografischen Lage Pellworms zuzuordnen, wurde die nächstliegende Wetterstation, welche kostenfreie Daten liefert, ausgewählt.

Wetterstation	Geo. Breite	Geo. Länge	Messhöhe	Gerätetyp
Hallig Hooge (ID: 1963)	54°57'	8°51'	14m über NHN	Ultraschallanemometer

Tabelle 3.1: Wetterstation für Windmessung von geeigneten Windgeschwindigkeiten

Diese Daten liegen als stündliche Messwerte in Meter pro Sekunde (m/s) vor und sehen in der grafischen Darstellung wie folgt aus:

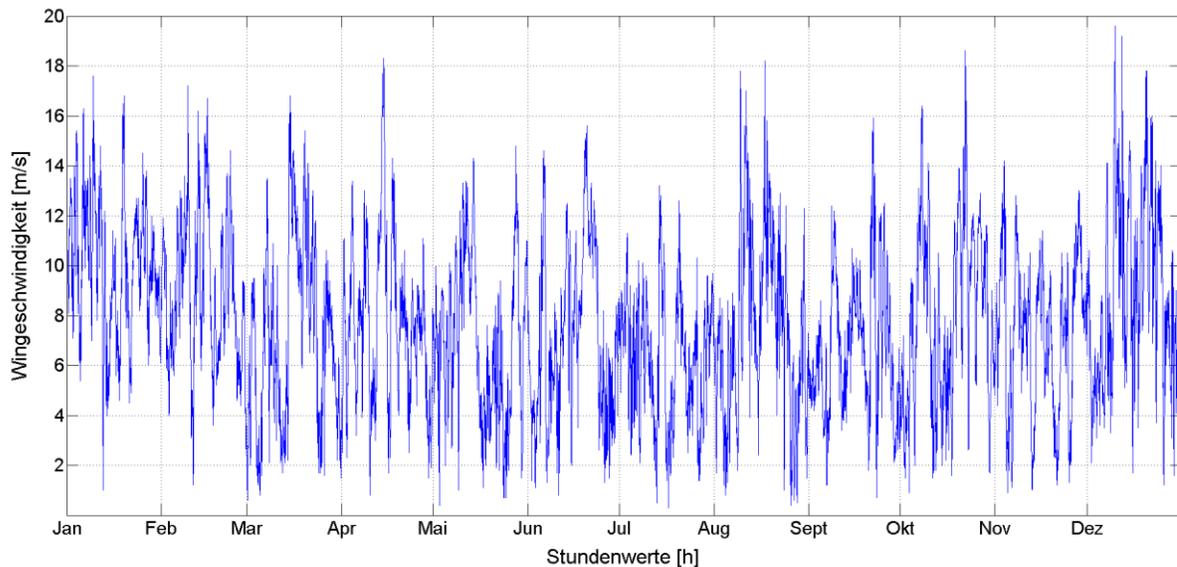


Abbildung 3.5: Windgeschwindigkeiten im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst)

Im Vergleich der Messdaten anderer Wetterdienste, liefert der Deutsche Wetterdienst (DWD) [6] lückenlose Messungen. Weiterhin gab es keine Möglichkeit, Messdaten in stündlicher oder gar feinerer Auflösung zu finden, welche für die Forschung kostenfrei genutzt werden dürfen.

3.4.2 Anlagenmodell und Leistungsberechnung

Für die Einspeisung durch Windenergie gibt es heutzutage viele geeignete Windkraftanlagen (WKA) von diversen Firmen, wie z.B. Vestas, Siemens, Enercon, u.v.m. Die Insel Pellworm ist im Besitz von ungefähr sieben Anlagen der Firma Enercon. Durch die vielen Projekte für erneuerbare Energiekonzepte und vor allem durch das Projekt „SmartRegion Pellworm“ [3] sind Windenergieanlagen in verschiedenen Ausführungen erbaut worden, deren genaue Anzahl und Verteilung jedoch unbekannt ist. Für die

Simulation wird daher das Anlagenmodell der Enercon E70 E4 [7] genutzt. Mit einer Nennleistung von 2300 kW ist das Anlagenmodell sehr gut geeignet um den Großteil der erzeugten Leistung im Jahr gerecht zu werden. Da es sich um eine sehr große Anlage handelt, die viel Energie erzeugt, werden lediglich drei dieser Anlagen simuliert.

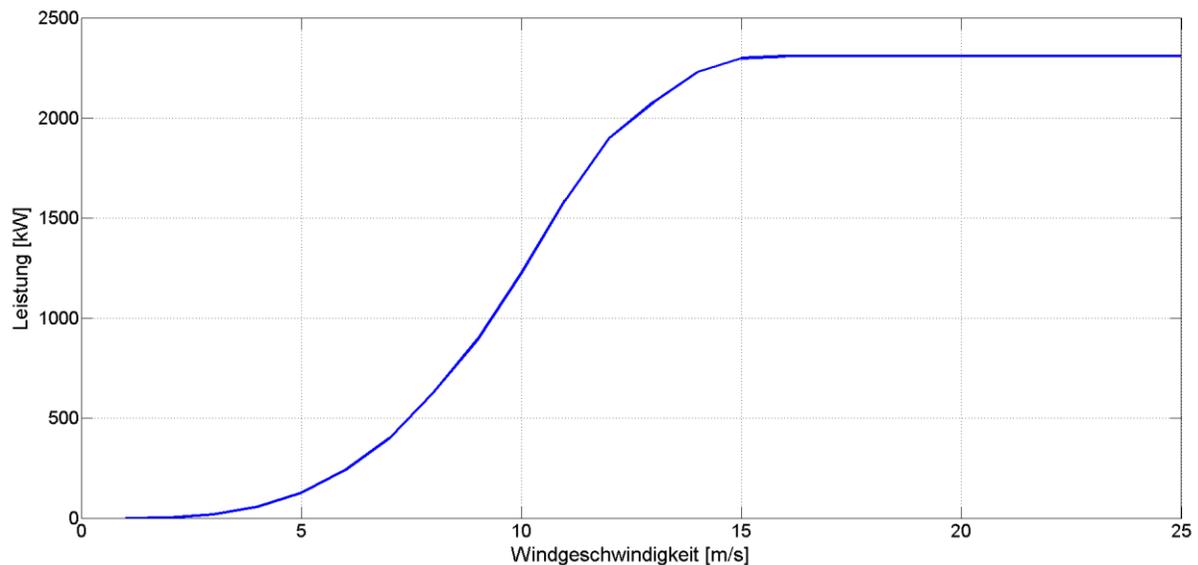


Abbildung 3.6: Leistungskurve der Enercon E70 E4 [7]

Die Abbildung 3.6 verdeutlicht die Leistungskurve des verwendeten Anlagenmodelles der Enercon E70 E4 [7]. Wichtig zu beachten ist hierbei, dass es sich bei der Leistungskurve um Werte der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe handelt und die Luftdichte einen Standardwert von $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ beträgt. Die berechneten Werte werden teilweise sehr stark von der Realität abweichen, sodass die erzeugte Leistung nur grob abgebildet werden kann. Gründe dafür sind bspw. die Auflösung der Windgeschwindigkeiten in Stunden, wobei lediglich der stündliche Durchschnittswert verwendet wird und somit Turbulenzen etc. vollkommen außer Betracht gelassen werden. Wie in Abbildung 3.6 zu erkennen ist, hängt die Erzeugung der elektrischen Energie stark von den Windgeschwindigkeiten ab. Die Produktion beginnt ab einer Mindestwindgeschwindigkeit von etwa 2 m/s (Einschaltwindgeschwindigkeit). Im linearen Bereich ist die erzeugte elektrische Leistung

im Wesentlichen proportional zur dritten Potenz der Windgeschwindigkeit; ergo ergibt sich bei einer Verdoppelung der Windgeschwindigkeit die achtfache Windleistung. Dies ist auf die physikalischen Grundlagen der Windleistungsberechnung zurückzuführen; sprich die allgemeine Formel der kinetischen Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \text{ (Translation)} \quad (3.11)$$

Wobei sich die Masse m des Windes aus der Multiplikation der Luftdichte ρ und dem Volumenstrom V zusammensetzt. Der Volumenstrom V bildet sich aus der Fläche A des Rotors und der Windgeschwindigkeit v , sodass sich folgende Formel zur Windleistungsberechnung ergibt:

$$P_{Windenergie} = E_{kin,Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.12)$$

Ab einer Windgeschwindigkeit von 15 m/s erreicht die dargestellte Windkraftanlage ihr Maximum bzw. die Nennleistung. Ab höheren Windgeschwindigkeiten, die größer als 25 m/s (Abschaltwindgeschwindigkeit) betragen, wird die Anlage abgeschaltet, um Beschädigungen zu vermeiden.

Mit Hilfe der Windleistungskurve (Abbildung 3.6: Leistungskurve der Enercon E70) und der Windmessdaten des DWD des Jahres 2014 (Abbildung 3.5: Windgeschwindigkeiten im Jahr 2014) kann die erzeugte Leistung ermittelt werden. Die Werte der Leistungskurve der Windenergieanlage liegen in ganzzahliger Einheit (z.B. 12 m/s) vor. Die Werte der Windgeschwindigkeiten des Jahres 2014 liegen jedoch in höherer Auflösung mit einer Nachkommastelle (z.B. $14,6 \text{ m/s}$) vor. Damit die Leistungswerte der Leistungskurve exakt den Windgeschwindigkeiten aus 2014 zugeordnet werden können, müssen die Werte der Leistungskurve interpoliert werden, um eine höhere Auflösung dieser Messwerte zu erreichen. Dazu wird das Verfahren der linearen Interpolation angewendet, sodass zwischen

zwei gegebene Datenpunkten (x_0, y_0) und (x_1, y_1) eine Strecke gebildet wird. Auf dieser Strecke befinden sich die gewünschten Datenpunkte, weshalb folgende Formel gilt:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} (x - x_0) \quad (3.13)$$

Die lineare Interpolation und die anschließende Zuordnung der Leistungswerte zu den Windgeschwindigkeiten im Jahr 2014 erfolgt mit Hilfe der Software MATLAB. Das MATLAB Script-File „Leistungsberechnung_Wind_2014.m“ beinhaltet weitere Kommentare zur Erklärung.

```
%% Leistungsberechnung aus winddaten %%

% - windgeschwindigkeiten im Jahr 2014
% - Leistungskurve: Enercon E70 E4 - 2MW

load('windgeschwindigkeit.csv') % windgeschwindigkeit (Quelle: DWD)
load('Enercon_E70_E4.csv') % Leistungskurve Enercon_E70 (Quelle: Enercon)

% lineare Interpolation der werte
x = 0:1:26; %Messwerte
xq = 0:0.1:26; %Bezugswerte für feinere Auflösung
P_Interp = interp1(x, Enercon_E70_E4, xq, 'linear'); %Funktion interp1()
P_Interp = round(P_Interp.*100)/100; %werte für Vergleich runden

A = zeros(8760,1); %Hilfsmatrix
P_wind = zeros(8760,1); %Definition finaler Matrix

% Suchalgorithmus um den interpolierten Leistungen den entsprechenden
% windgeschwindigkeiten zuzuordnen.
for i = 1:length(Windgeschwindigkeit(:,1))
    A(i,1) = find(P_Interp(:,1) == Windgeschwindigkeit(i,1));
    P_wind(i,1) = P_Interp(A(i,1),2);
end
```

Der entwickelte Programmcode importiert zunächst die Daten der Windgeschwindigkeiten aus dem Jahr 2014 und die Leistungskurve der Enercon E70 E4 [7]. Durch die lineare Interpolation werden die Daten der Leistungskurve verfeinert. Anschließend werden mit Hilfe eines Suchalgorithmus die Daten verglichen; d.h. in den Matrizen werden Übereinstimmungen der Windgeschwindigkeiten gesucht und den entsprechenden Leistungswerten der Leistungskurve zugeordnet. Dies ermöglicht die Darstellung der erzeugten Leistung einer Enercon E70 E4 [7] Windkraftanlage im Jahr 2014.

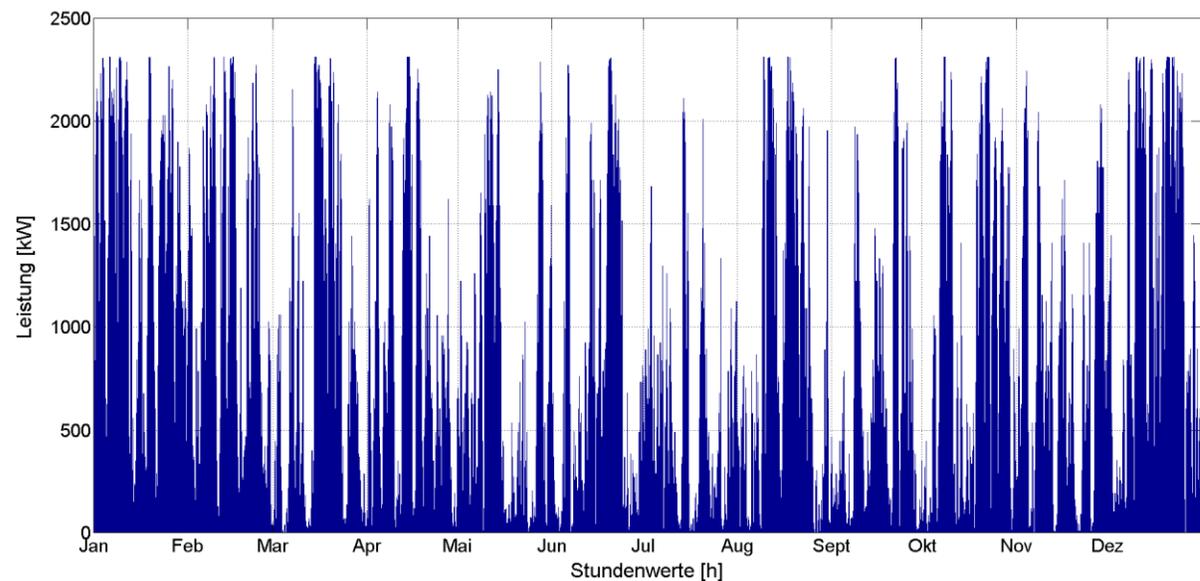


Abbildung 3.7: Erzeugte Windenergieleistung einer Enercon E70 E4 im Jahr 2014

Die Abbildung 3.7 zeigt den typischen Verlauf einer Stromerzeugung durch Windenergie. In den Wintertagen ist die Erzeugung wesentlich stärker und kontinuierlicher, da hier mehrere Spitzen auftauchen und die Dichte größer ist. Das ist durch die Winde bedingt, die zu dieser Jahreszeit stärker wehen. Dies liegt daran, dass die Luftdruckunterschiede, durch die höhere Temperaturunterschiede auf der Erde, größer ausfallen. Im Gegensatz dazu treten die Lücken im Sommer wesentlich häufiger auf. Die Summe der erzeugten Leistung pro Windkraftanlage ergibt $6,46 \text{ GWh}$. Diese Leistungsberechnung stellt nachfolgend die zu übergebene Charakteristik dar, welche für das Modell der Windkraftanlage in der Simulation mittels PowerFactory genutzt wird.

3.4.3 Modellierung in PowerFactory

Das Modell der Windkraftanlage ist im Rahmen dieser Arbeit ein sehr einfaches Modell, da lediglich eine Charakteristik für die Wirkleistung übergeben wird, die im Kapitel 3.4.2 berechnet wurde. Die mit Hilfe von MATLAB erstellte Leistungsberechnung (Abbildung 3.7: Erzeugte Windenergieleistung einer Enercon E70 E4 im Jahr 2014) aus den Windgeschwindigkeiten des Jahres 2014 und einer Leistungskurve der Windkraftanlage Enercon E70 E4 [7] wird der Simulation des Energieversorgungsnetzes übergeben und in Form von Wirkleistung charakterisiert. Die Windkraftanlage basiert auf dem Objekt eines statischen Generators (.ElmGenstat) und kann als Windkraftanlage spezialisiert werden. Normalerweise sind durch die spezialisierte Form des statischen Generators als Windkraftanlage Möglichkeiten gegeben, eine Erzeugungszuverlässigkeits-Simulation zu starten, welche mit stochastischen Modellen und Leistungskurven arbeitet. Durch die stochastischen Modelle, der Übergabe der Windgeschwindigkeiten und der Leistungskurve der Enercon E70 E4 [7] könnten dadurch wesentlich genauere Ergebnisse erzielt werden. Leider ist diese Funktionalität nicht in der Benutzerlizenz vorhanden.

3.5 Photovoltaik

Die zweite Komponente, die für die elektrische Energieerzeugung des Energieversorgungssystems zuständig ist, ist die Erzeugung durch Solarenergie. Mit der Photovoltaik beschreibt man ein technisches Verfahren, um mit Hilfe von Solarzellen die Strahlungsenergie der Sonne in elektrische Energie umzuwandeln. Die einzelnen Solarzellen werden in Solarmodulen zusammengefasst, welche eine Gleichstromquelle darstellen und beliebig skalierbar sind. Es gibt Photovoltaikanlagen in verschiedenen Größen, von einfachen Handyladegeräten mit einigen Watt (W) bis hin zu Solarkraftwerken mit mehreren Megawatt (MW). Die aus den Solarmodulen erzeugte Gleichspannung wird mit Hilfe von Wechselrichtern in eine Wechselspannung gerichtet. Das ist notwendig, um eine Einspeisung der erneuerbaren Energie in ein Stromnetz zu gewährleisten und auch den Betrieb von üblichen Haushaltsgeräten zu ermöglichen.

Eine der wichtigsten Kenngrößen für die Auslegung und Wirtschaftlichkeit von Photovoltaikanlagen ist die die Globalstrahlung. Die Globalstrahlung ist die Strahlung, die bezogen auf eine bestimmte Fläche auf dem Boden ankommt und setzt sich aus der direkten und diffusen Strahlung zusammen. Die direkte Strahlung ist die Solarstrahlung, welche auf direktem Weg auf dem Boden auftrifft. Die diffuse Strahlung ist der Anteil, welcher durch Reflexionen durch z.B. Wolken und Streuungen der Solarstrahlung auf dem Boden ankommt.

3.5.1 Meteorologische Daten

Die zu Pellworm nächstgelegene Wetterstation des DWD, welche kostenfreie Daten für die Solarberechnung in stündlicher Auflösung liefert, befindet sich auf Sylt.

Wetterstation	Geo. Breite	Geo. Länge	Messhöhe	Gerätetyp
List auf Sylt (ID: 3032)	55°01'	8°41'	2m über NHN	Lufttemperatursensor & Pyranometer

Tabelle 3.2: Wetterstation für Solarberechnung und Temperaturmessung

Die zur Verfügung gestellten Daten sind die stündlichen Werte der Lufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$ und die Stundensummen der Globalstrahlungen in J/cm^2 für das Jahr 2014.

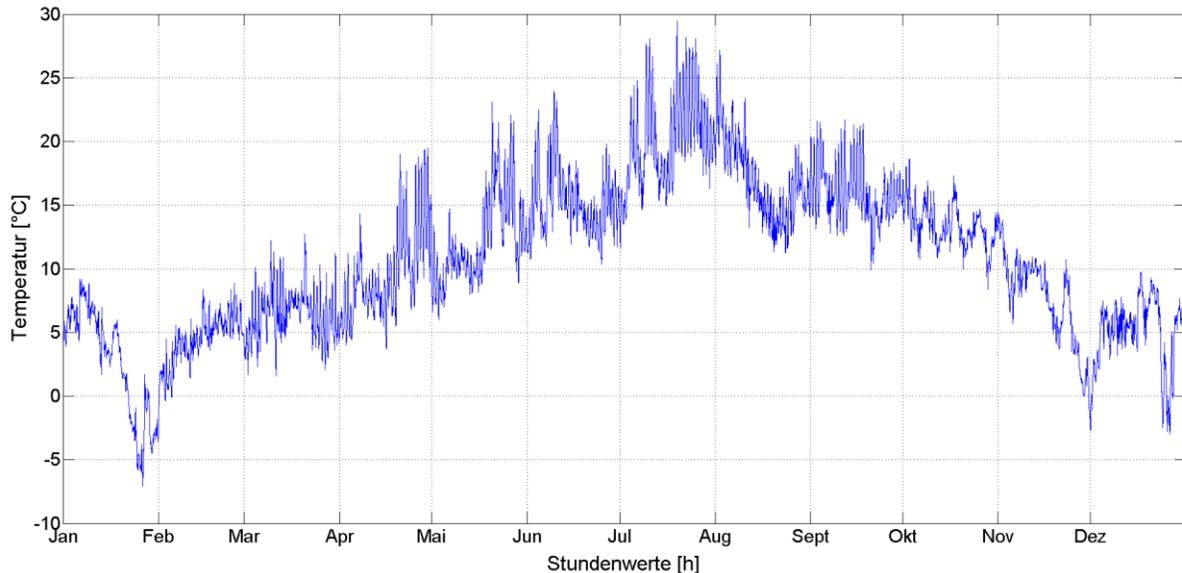


Abbildung 3.8: Lufttemperatur im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst)

Die Messdaten der Lufttemperatur/Umgebungstemperatur entsprechen den zu erwartenden Werten. In den Wintermonaten ist es kalt, bis zu -8°C , während in den Sommermonaten warme Temperaturen bis zu knapp 30°C vorhanden sind. Die Umgebungstemperatur wird als Charakteristik mit in die Simulation einfließen, da bei erhöhter Temperatur der Wirkungsgrad der Solarzelle bzw. des Solarmoduls sinkt und somit die reproduzierte Erzeugung verfeinert wird. Weitere Messdaten, die verwendet werden, sind die Stundensummen der globalen Strahlung im Jahr 2014. Die Daten liegen in der Einheit J/cm^2 vor und werden folgendermaßen umgerechnet:

$$1 \frac{\text{J}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^2} = 1 \frac{\frac{1}{3600} \text{Wh}}{\left(\frac{1}{100^2}\right) \text{m}^2} \approx 2,7778 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \quad (3.14)$$

Die gegebenen Messdaten in J/cm^2 werden mit dem Faktor 2,7778 multipliziert, sodass die Werte in der Einheit Wh/m^2 vorliegen. Es ergeben sich folgende Globalstrahlungswerte für das Jahr 2014:

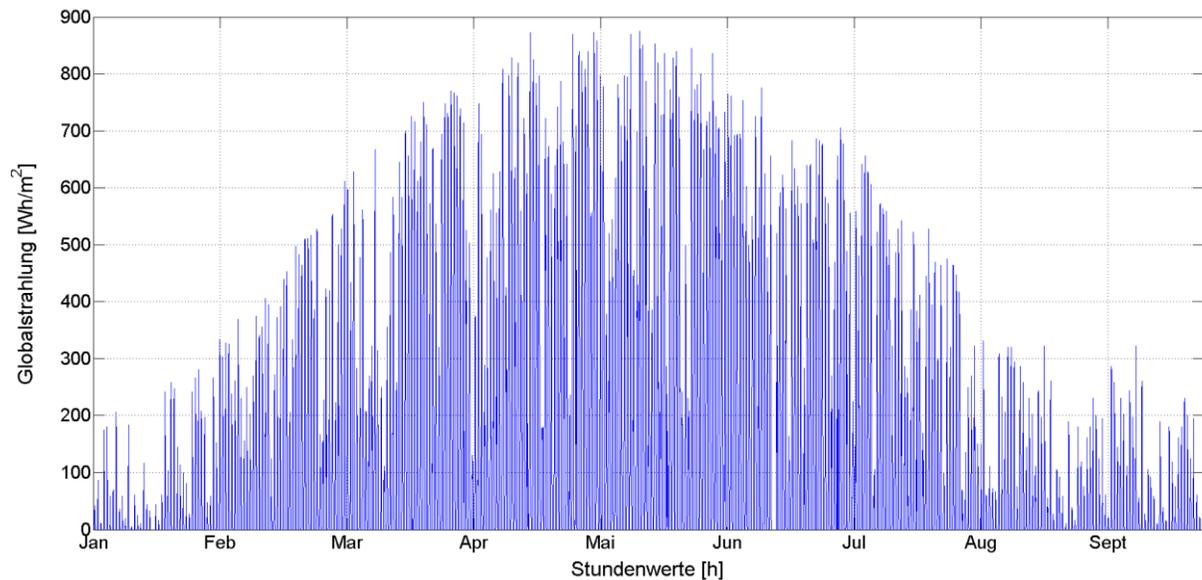


Abbildung 3.9: Globalstrahlung im Jahr 2014 (Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Werte bearbeitet)

Die Abbildung 3.9: Globalstrahlung im Jahr 2014 zeigt einen typischen Verlauf. Die Werte bilden einen Berg, der seine Spitze in der Mitte des Jahres erreicht, da hier zum einen die Sonne wesentlich öfters scheint, zum anderen der Weg von der Atmosphäre zur Erde hin wesentlich kürzer ist, da die Sonne weitaus dichter dem Zenit steht. In den Wintermonaten fallen die Werte eher flach aus, was eine stärkere Bewölkung zu Grunde hat und durch den Stand der Sonne der diffuse Anteil stärker ausgeprägt ist.

Die Jahressumme der Messdaten ergibt $1040 kWh/m^2$. Dies gleicht dem Mittelwert statistischer Werte und liegt sehr gut im Vergleich zur Veröffentlichung der Jahressumme der Globalstrahlung 2014 in der Bundesrepublik Deutschland [8].

3.5.2 Anlagenmodell und Leistungsberechnung

Wie bei den Windenergieanlagen sind die Photovoltaikanlagen ebenfalls sehr vielfältig. Im Laufe der letzten Jahrzehnte haben sich viele Solarmodultypen weiterentwickelt und wurden stets effizienter. Auch die Wechselrichter wurden weiterentwickelt und für Photovoltaikanlagen spezifiziert, bspw. durch „Maximum-Power-Point-Tracker“ (MPP-Tracker). Auch auf Pellworm wird diese Vielfalt durch die verschiedensten Projekte, welche seit den 1980er Jahren entstanden sind, ersichtlich. Durch den stetigen Ausbau des Hybridkraftwerkes sind nämlich vier verschiedene Typen von Solarmodulen mit einer geschätzten Gesamtanzahl von ca. 5000 Modulen installiert worden. Hinzu kommen diverse Installationen der Privathaushalte, welche zur Gesamterzeugung auf der Insel beitragen. Die genaue Anzahl an Modulen sowie der Solarmodul-Typen auf Pellworm ist somit unbekannt. Daher wird angenommen, dass jedes Haus im Besitz einer PV-Anlage mit ca. 35-40 Solarmodulen auf dem Dach ist. Somit beträgt die Gesamtanzahl der installierten Solarmodule der 650 Haushalte ungefähr 25000 Stück. Für die Simulation dieser Arbeit wird ausschließlich die erzeugte Leistung untersucht, wodurch Faktoren, wie die Blindleistungsbereitstellung oder Kurzschlussfestigkeit entfallen, also der Wechselrichter als ideal angenommen wird und für die entsprechende gesamte Scheinleistung der Photovoltaikanlagen ausgelegt ist.

Die Berechnung für die elektrische Energieerzeugung durch Sonnenenergie erfordert den Umgang mit den elektrischen Daten von Solarmodulen. Einer der installierten Solarmodul-Typen des Hybridkraftwerkes ist der Typ „Shell PowerMax Plus SE-160C“ [9]. Diese Art von Solarmodul ist für heutige Zeiten ein altes Exemplar, aber in der Stückzahl auf Pellworm häufig vertreten, weshalb dieser im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird. Die für die Simulation wichtigen elektrischen Daten des Solarmoduls, unter Standard-Test-Bedingungen (STC), können der nachfolgenden Tabelle 3.3 entnommen werden. Das Material der Solarzellen besteht aus polykristallinem Silicium (poly-Si). Alle weiteren Informationen sind dem Datenblatt „Shell PowerMax Plus SE-160C“ [9] zu entnehmen. Die Solarberechnung der Leistung und Regelung des Maximum Power Point (MPP)

übernimmt das Programm PowerFactory. In der Software steht ein komplexes Photovoltaik-System zur Verfügung.

Shell PowerMax Plus 160-C [9]	
Spitzenleistung P_{mpp}	160 W_p
Spannung im MPP (Nennspannung) U_{mpp}	34 V
Stromstärke im MPP (Nennstrom) I_{mpp}	4,71 A
Leerlaufspannung U_{OC}	43,1 V
Kurzschlussstrom I_{SC}	5,2 A
Temperaturkoeffizient αP_{mpp}	-0,5 $\%/^{\circ}C$
Temperatur T_{NOCT}	44 $^{\circ}C$

Tabelle 3.3: Elektrische Daten - Shell PowerMax Plus 160-C [9]

Laut der elektrischen Daten, beträgt die Spitzenleistung des verwendeten Solarmodules 160 W_p (Watt-Peak). Bei einer Anzahl von 30000 Modulen, multipliziert mit der Spitzenleistung, beträgt die für die Simulation geschätzte, auf der Insel Pellworm installierten Leistung der Photovoltaikanlagen 4,8 MW_{peak} (Spitzennennleistung).

3.5.3 Modellierung in PowerFactory

Die Simulation zur Erzeugung von elektrischer Energie durch Photovoltaik erfolgt durch ein in PowerFactory gegebenes Photovoltaik-System (.ElmPvsys). Das Besondere an diesem Objekt ist, dass durch das Hinzufügen von Solarmodul-Typen (.TypPvpanel) die Berechnung der Leistung mit den spezifischen Werten von Solarmodulen durchgeführt wird. Zusammen mit den Eigenschaften des Solarmodul-Typs basiert das Model ebenfalls auf dem Objekt eines statischen Generators (.ElmGenstat). Eine Leistungsberechnung wird durchgeführt. Dazu nutzt das System die geografische Lage, das Datum und die Tageszeit, um beispielsweise den Einfallswinkel zwischen den Sonnenstrahlen und der Senkrechten auf der Oberfläche des Sonnenkollektors zu definieren. Dieser Einfallswinkel der

Sonnenstrahlen wird in dem Photovoltaik-System mit $v(\beta, \alpha)$ beschrieben, wobei α der Ausrichtungswinkel und β der Neigungswinkel des Sonnenkollektors ist. Die genaue Berechnung des Einfallswinkels ist in der technischen Referenz des Photovoltaik-Systems [10] beschrieben.

Weiterhin ist die Hauptformel zur Berechnung der Leistung eines Solarmoduls in PowerFactory gegeben durch:

$$P_{Modul} = \frac{E_{g,pv} \cdot P_{mpp} \cdot \eta_{rel} \cdot \eta_{Umrichter}}{E_{STD}} \quad (3.15)$$

Dabei ist P_{mpp} der Wert der Spitzenleistung des Modules, $\eta_{Umrichter}$ ist der Wirkungsgrad des Umrichters, η_{rel} ist die relative Effizienz des Modules, $E_{g,pv}$ ist die Globalstrahlung, die auf das ausgerichtete Modul auftrifft und E_{STD} stellt einen Standardwert einer Strahlungsstärke von 1000 W/m^2 dar. Die Spitzenleistung und der Wirkungsgrad des Umrichters sind Werte, welche direkt als Zahlenwert eingegeben werden. Die auftreffende Globalstrahlung auf dem Modul $E_{g,pv}$ und die relative Effizienz des Moduls η_{rel} werden dahingehend aus einer Reihe vieler Formeln und Werten durch PowerFactory berechnet. Die Globalstrahlung die auf dem Modul auftrifft, wird beispielsweise mit Hilfe der Werte der Globalstrahlung 2014 (Abbildung 3.9) und des Einfallswinkels der Sonne $v(\beta, \alpha)$ berechnet. Die relative Effizienz des Moduls nutzt unter anderem die Daten der Umgebungstemperatur 2014 (Abbildung 3.8). Die beiden Charakteristiken und die Daten aus der Tabelle 3.3 sind die wichtigsten Werte zur Berechnung der Photovoltaik-Leistung. Die genaue Berechnung umfasst viele einzelne Schritte und kann der technischen Referenz des Photovoltaik-Systems [10] entnommen werden.

Die quasi-dynamische Simulation berechnet nun mit den gegebenen Werten und Charakteristiken die stündlichen Werte der Leistung im Jahr 2014. Diese 8760 Datenpunkte ergeben folgende Darstellung der Leistung durch Photovoltaik im Jahr 2014:

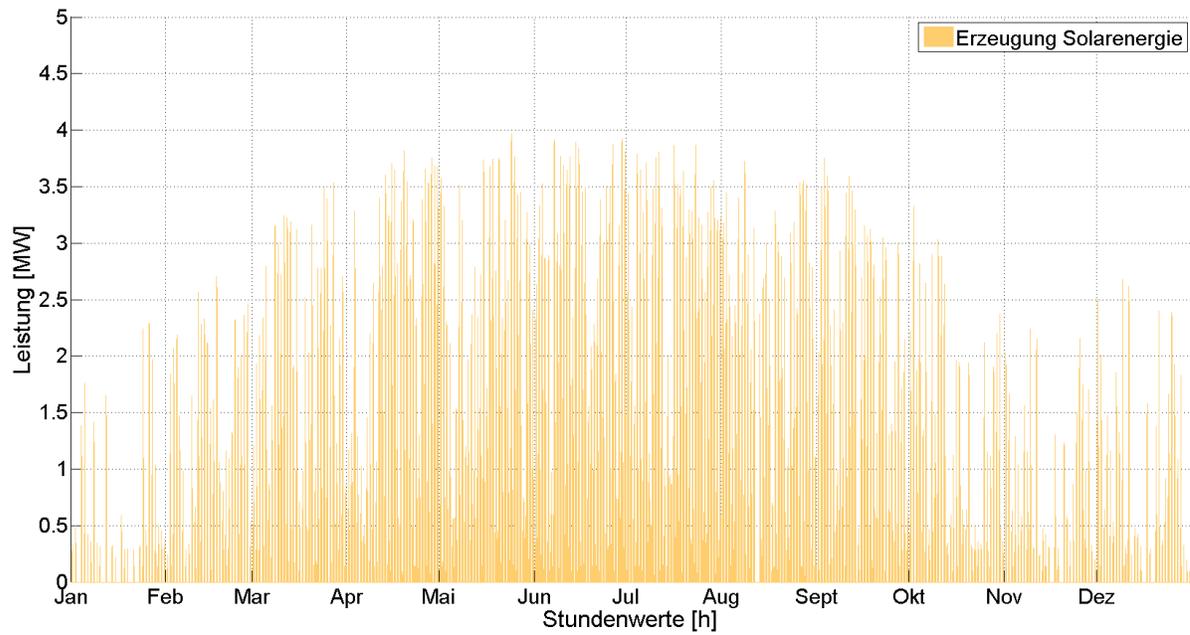


Abbildung 3.10: Erzeugte Solarenergie der gesamten Photovoltaik im Jahr 2014

Die Abbildung 3.10 zeigt ebenfalls ein typisches Verhalten der erzeugten Leistung durch Solarenergie. Wie bereits bei der Globalstrahlung in Abbildung 3.9 beschrieben, ist das Leistungsprofil der Solarenergie auf den steileren Einfallswinkel Sonne im Sommer sowie dem höheren Bewölkungsgrad im Winter zurückzuführen, wodurch eine Bauchförmige Kurve entsteht. Der gesamte Energiegehalt im Jahr beträgt 4928,60 *MWh*.

3.6 Energiespeicher

Erneuerbare Energien in Energieversorgungssystemen stellen einen sehr hohen Anteil an volatiler Erzeugung dar. Dies ist durch starke tageszeitliche und jahreszeitliche Schwankungen von Sonnen- und Windenergie bedingt. Laut dem VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) [11] ist der Bedarf einer Energiespeicherung erst ab einem Anteil von 40% an erneuerbaren Energien signifikant, um eine unterbrechungsfreie und stabile Stromversorgung gewährleisten zu können. Damit ein ausgewogener Ausgleich zwischen Verbrauch und Erzeugung stattfinden kann, werden Kurzzeitspeicher für kurzfristige Lastspitzen, z.B. Mittagszeit in Haushalten, und Langzeitspeicher für langfristige Ausfälle, z.B. durch die Wartung von Windkraftanlagen, benötigt. Es gibt diverse Speichertechnologien, wie bspw. die mechanische Speicherung (Pumpspeicherkraftwerke oder Druckluftspeicher) oder die chemischen Stromspeicher (Redox-Flow-Batterie oder Blei-Säure-Akkumulator). Viele Technologien haben sich bereits auf dem Markt etabliert, sind jedoch in deren Wirkungsgraden, Kosten und Platzbedarf sehr unterschiedlich, sodass noch ein hohes Maß an Forschung und Entwicklung notwendig ist.

Das Energieversorgungssystem dieser Arbeit beinhaltet ausschließlich erneuerbare Energieerzeugung durch Photovoltaik und Windkraft, welche mit einem Einsatz von Energiespeichern einhergehen. Für die angestrebte Simulation des gesamten Jahres 2014 ist die Form der Langzeitspeicherung von hohem Interesse und wird genauer untersucht. Damit der Verbrauch der Siedlungsstruktur mit der Energieerzeugung auf Pellworm in Einklang steht, wird der entsprechende Speicheraufwand geprüft. Auf der Insel Pellworm sind bereits zwei solcher Langzeitspeicher installiert worden: die Technologie der Redox-Flow-Batterie und der Lithium-Ionen-Batterie. Diese beiden Varianten werden genauer untersucht, da deren Forschung [12] stets voranschreitet und viele Großprojekte, wie ein Batteriespeichersystem in Schwerin [13] oder in China [12] bereits entstanden sind. Es ist ideal diese beiden Batterien miteinander zu vergleichen, da sie in ihren Eigenschaften sehr unterschiedlich sind.

3.6.1 Redox-Flow Batteriesystem

Die Redox-Flow-Batterie (RFB) ist ein Akkumulator, der elektrische Energie in chemischen Verbindungen speichert. Bekannt auch als Nasszelle oder Flüssigbatterie zirkulieren zwei Elektrolyte in zwei verschiedenen Kreisläufen. Zwischen diesen Kreisläufen befindet sich eine galvanische Zelle, die eine Membran enthält, wodurch ein Ionenaustausch zwischen den beiden Lösungsmitteln stattfinden kann. Durch die chemische Reduktion (Elektronenaufnahme) bzw. Oxidation (Elektronenabgabe) wird schließlich Energie freigegeben. Das Besondere dieser Form einer Batterie ist, dass die Elektrolyte außerhalb der Zelle in Tanks gespeichert werden. Dadurch ist es möglich die Energiemenge/Kapazität durch die Tanks und die Lade-/Entladeleistung durch die Größe der Membran der Zelle getrennt zu skalieren. Der Aufbau gestaltet sich durch die Separation der Tanks jedoch etwas aufwendiger, da Rohrleitungen und Pumpen benötigt werden. Ferner muss eine Kontroll- und Steuereinrichtung vorhanden sein. Wiederum ist dadurch ein modularer Aufbau möglich und die mit dem Elektrolyt gefüllten Tanks können einfach ausgetauscht werden. Das Redox-Flow-Batteriesystem auf Pellworm verwendet Vanadium-Oxid als Elektrolyt. Die Energiedichte dieser Art beträgt etwa 25 Wh/l .

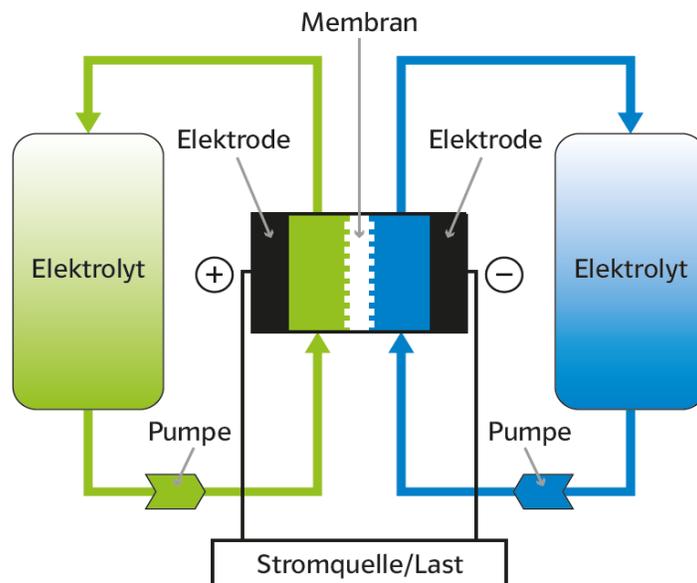


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Vorgänge innerhalb eines Redox-Flow-Systems [3]

3.6.2 Lithium-Ionen Batteriesystem

Die Lithium-Ionen-Batterie (Li-Ion) ist ebenfalls ein chemischer Akkumulator. In ionisierter Form wandert Lithium beim Laden von der Kathode über einen Separator zur Anode. Findet ein Entladen statt, kehrt sich die Bewegungsrichtung um. Die positive Elektrode besteht aus Metalloxiden, die negative Elektrode aus Graphit. Der Separator lässt Ionen hindurch, aber keine Elektronen. Im Gegensatz zu vielen anderen Akkumulatoren weist diese Form eine sehr hohe Energiedichte von etwa $250 - 500 \text{ Wh/l}$ auf. Einer der Nachteile gegenüber der Redox-Flow Technologie ist, dass keine Tiefentladung stattfinden darf, da hierdurch Brücken im Material und daher Kurzschlüsse entstehen. Die Lithium-Ionen Batterie ist weit verbreitet und als Speicherkraftwerk gut geeignet. In China ging im Jahr 2011 ein Lithium-Ionen-Batteriesystem mit einer Kapazität von 36 MWh [12] ans Netz und speichert Solar- und Windenergie. Weiterhin sind bereits Auslieferungen in Form von Containern möglich, die Kapazitäten von $1,5 \text{ MWh}$ [13] ermöglichen.

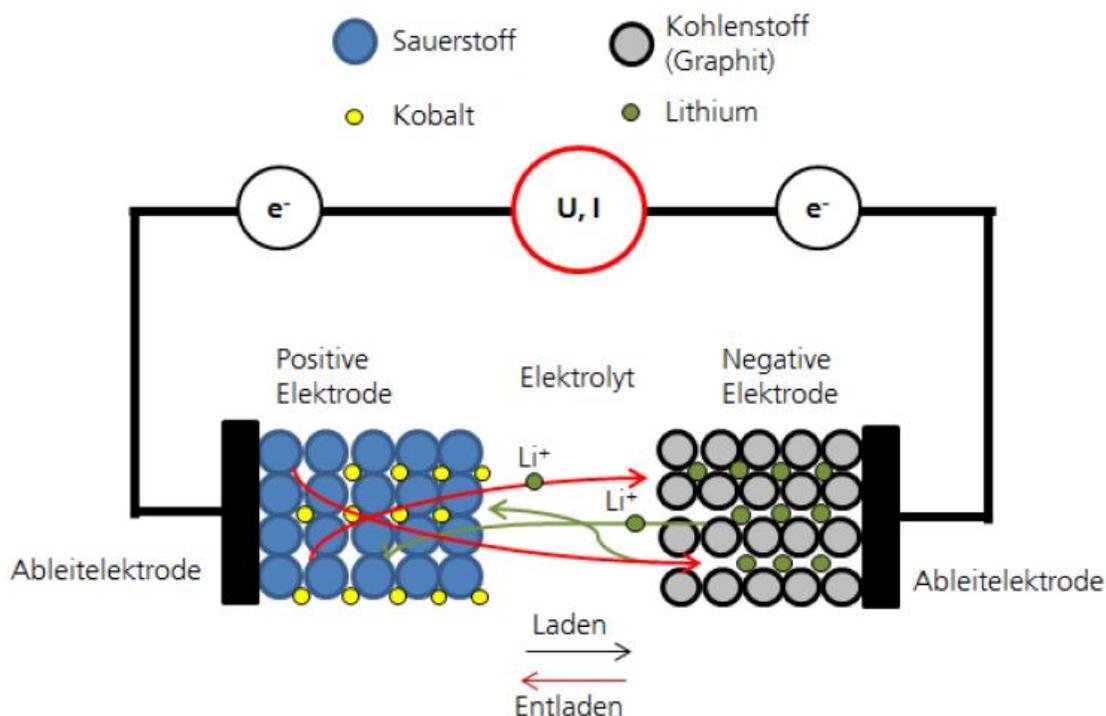


Abbildung 3.12: Prinzip des Lithium-Ionen Akkumulators [14]

3.6.3 Modellierung in PowerFactory

Die Modellierung eines Speichersystems in PowerFactory ist im Rahmen dieser Arbeit, bedingt durch die Einschränkungen der Benutzerlizenz, nicht möglich. Es können keine transienten Vorgänge simuliert werden, wodurch es nicht möglich ist, Lade- und Entladevorgänge zu betrachten. Die Lastflussanalyse bezieht sich auf stationäre Werte, weshalb das Batteriespeichersystem im Versorgungsmodell rein symbolisch dargestellt ist. Das Objekt des Speichers ist ein statischer Generator (.ElmGenstat), der in diesem Fall als Referenzmaschine dient. Die Referenzmaschine gleicht die Leistungsunterschiede zwischen Energieverbrauch und Energieerzeugung aus und stellt demnach die Residuallast dar.

4 Simulation und Lastflussanalyse des Energieversorgungssystems

Das Energieversorgungssystem setzt sich aus den Komponenten einer Sammelschiene, drei Windkraftanlagen, ein Photovoltaik-System bzw. ein Photovoltaik-Kraftwerk, den drei Verbrauchergruppen (H0, G0, L0) als Lasten und einem Batteriespeichersystem, zusammen.

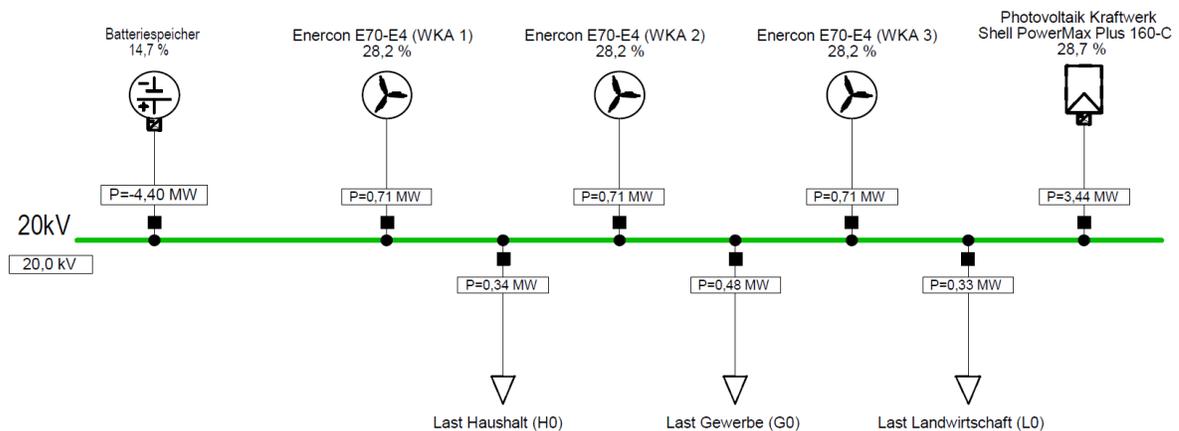


Abbildung 4.1: Darstellung des vereinfachten Energieversorgungssystems in PowerFactory

Im Allgemeinen bietet PowerFactory Sammelschienen in diversen Ausführungen an, von dem „Einfachsammelschienensystem“ bis hin zu „Doppelsammelschienensystem mit Längstrennung und Umgebungssammelschiene“, welche beliebig miteinander zu verknüpfen sind. Die Systeme sind von der Niederspannung bis zur Höchstspannung definierbar und beinhalten dementsprechende Leistungs-/Last-/Trenn- oder Lasttrennschalter. Die Sammelschienensysteme stellen eine Schaltanlage dar, bei der jedes Zweigelement, wie z.B. Lasten oder Transformatoren, mit einer Leistungsschalter-Konfiguration (Leistungsschalter und Trennschalter) versehen werden. Das Sammelschienensystem der Pellworm-Simulation ist jedoch eine einfache Klemmleiste, um die Komponenten miteinander zu verknüpfen und um einen gemeinsamen Leistungsfluss zu generieren. Somit ist jedes Zweigelement über einen einfachen Leistungsschalter an der Sammelschiene angeschlossen.

4.1 Die Lastflussanalyse als quasi-dynamische Simulation

Eine quasi-dynamische Simulation ist eine Simulation für Lastflussberechnungen über eine längere Zeit. Es geht hauptsächlich darum, das Verhalten des Netzes im Stunden- oder Minutenbereich zu betrachten, wodurch sich die Lastflussbedingungen im stationären Betrieb befinden. Dadurch entfallen einige Effekte und Variationen in kleinen Zeiträumen, wie z.B. Schwankungen durch Ein- und Ausschalten oder den un stetigen Verbrauch von Geräten. Daher wird die Simulation „quasidynamisch“ durchgeführt. Die zu untersuchenden Lastflüsse beschränken sich auf die Wirkleistung.

Um eine möglichst aussagekräftige Simulation eines autarken Energieversorgungssystems durch fluktuierende Energieerzeugung zu erhalten, wird ein gesamtes Jahr (2014) untersucht. Die Lastflüsse werden in stündlicher Auflösung simuliert, da dies für eine Betrachtung von Energien im Jahr ausreichend ist und der Energiegehalt in Form von Kilowattstunden usw. leichter berechnet werden kann. Dadurch können Aussagen zu Schwankungen von Wind- und Solarenergie über Tage oder Wochen, aber auch in Abhängigkeit der Jahreszeiten, getroffen werden. Signifikante Stellen gilt es näher auf den Einsatz von Speichermöglichkeiten zu untersuchen. Diese Untersuchung findet schließlich außerhalb der PowerFactory Umgebung statt. Dazu werden die Daten der Lastflussanalyse exportiert (Lastflussanalyse_Daten_2014.csv) und mit MATLAB dargestellt.

Eine andere Variante der Analyse durch PowerFactory zum Auslegen von Speichern wären Kurzschlussberechnungen. Durch das Ausprobieren verschiedener Konfigurationen von den gegebenen Modellen und Betriebsfällen, können die Systeme ausgereizt werden, bis sie ihre Grenzen erreichen und Kurzschlüsse erzeugen. Daraus folgt ein Ausfall und ein Zusammenbruch des Energieversorgungssystems. Durch eine Art „Versuch-Irrtum“-Methode wird eine geeignete Konfiguration der Energiebereitstellung durch den Speicher gesucht. Diese Vorgehensweise ist nicht geeignet, um analytisch zu arbeiten, daher wird die quasi-dynamische-Simulation verwendet.

4.1.1 Leistungsprofil der Energieerzeugung

Das Leistungsprofil für die Energieerzeugung ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Es besteht aus den drei Windkraftanlagen (blau) und dem Photovoltaik-System (gelb) mit insgesamt 30000 Modulen. Die gesamte Energieerzeugung (grün) im Jahr 2014 berechnet sich aus deren Addition.

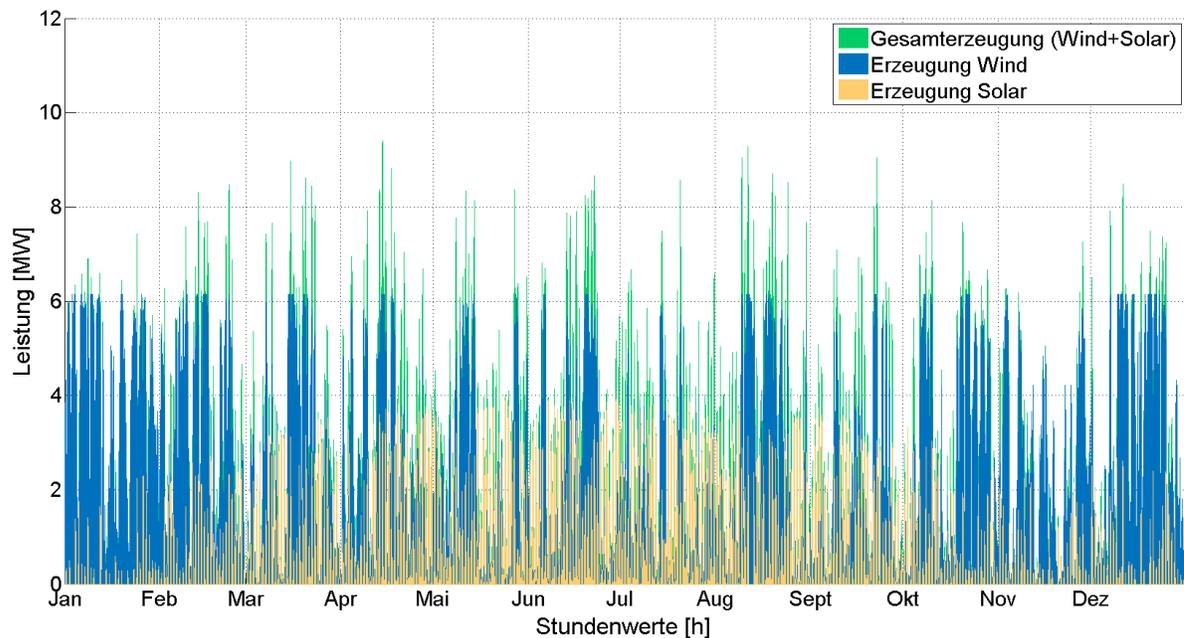


Abbildung 4.2: Leistungsprofil der Energieerzeugung im Jahr 2014

Die Energiedichten stellen die ausgefüllten Flächen des Leistungsprofils dar und lassen sich durch eine Integration über die Zeit berechnen. Dazu wird der Befehl *trapz()* in MATLAB verwendet, welcher eine numerische Integration eines Vektors durchführt. Die Durchschnittswerte der Messdaten werden mit dem Befehl *mean()*, die Maxima durch *max()* und die Minima durch *min()* berechnet.

Bezeichnung	Energie [MWh]	Durchschnitt [MW]	Maximum [MW]	Minimum [MW]
Enercon E70-E4 (WKA 1)	6460,00	0,7374367	2,05	0
Enercon E70-E4 (WKA 2)	6460,00	0,7374367	2,05	0
Enercon E70-E4 (WKA 3)	6460,00	0,7374367	2,05	0
Summe	19380,00	2,2123101	6,15	0

Tabelle 4.1: Simulationsergebnis der Energieerzeugung durch Windkraft im Jahr 2014

Bezeichnung	Energie [MWh]	Durchschnitt [MW]	Maximum [MW]	Minimum [MW]
Photovoltaik Kraftwerk	4928,598	0,5626253	3,968189	0

Tabelle 4.2: Simulationsergebnis der Energieerzeugung durch Photovoltaik im Jahr 2014

Bezeichnung	Energie [MWh]	Durchschnitt [MW]	Maximum [MW]	Minimum [MW]
Gesamterzeugung	24308,598	2,7749	9,3955	0

Tabelle 4.3: Simulationsergebnis der gesamten Energieerzeugung im Jahr 2014

Die Übersicht in den Tabelle 4.1 bis Tabelle 4.3 stellen die ermittelten Werte dar. Das simulierte Energieversorgungssystem weist eine Gesamterzeugung von rund 24,31 GWh auf. Dabei hat die Stromerzeugung durch Windenergie einen Anteil von knapp 80%. Das Leistungsmaximum innerhalb einer Stunde im Jahr beträgt 9,4 MW. Das Leistungsminimum beträgt 0 MW und bedeutet, dass es im Jahr durchaus Zeitpunkte ohne Stromerzeugung gibt.

4.1.2 Leistungsprofil des Verbrauchs gegenüber der Erzeugung

Das Leistungsprofil der Verbraucher verdeutlicht sich durch den Vergleich mit der Gesamterzeugung (grün) und ist der Abbildung 4.3. zu entnehmen. Der Gesamtverbrauch (rot) setzt sich aus den Profilen Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft zusammen, indem die Werte der einzelnen Profile addiert wurden.

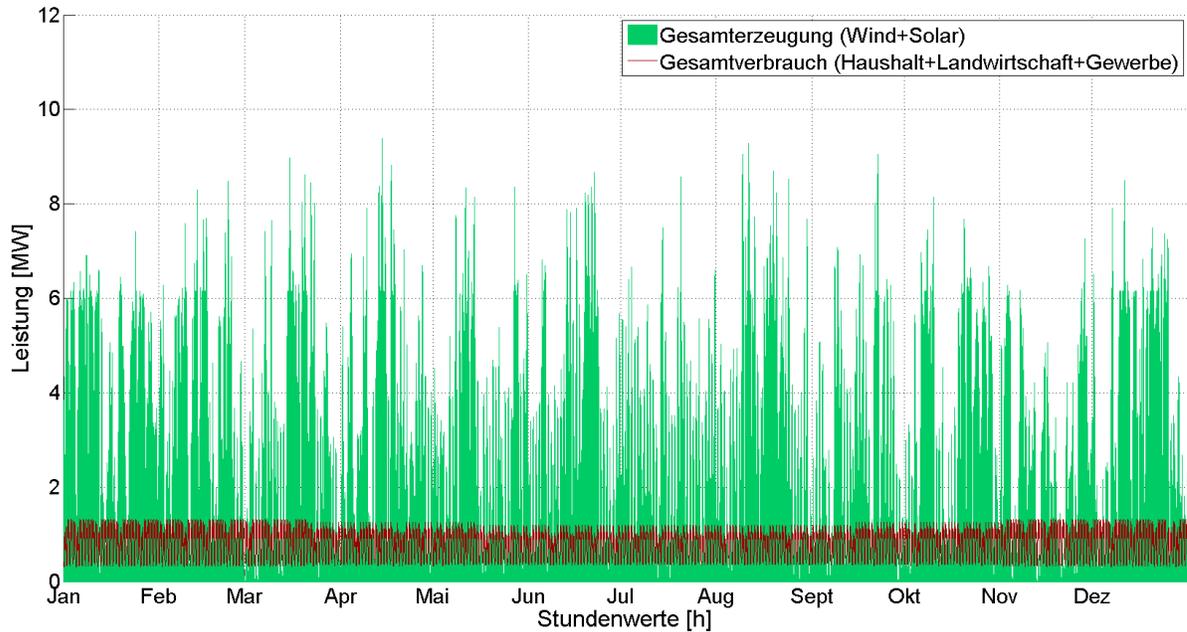


Abbildung 4.3: Leistungsprofil des Verbrauchs gegenüber der Erzeugung

Deutlich zu erkennen ist der erhebliche Überschuss an erzeugter Energie. Kleine Lücken unterhalb der Verbraucherkennlinie deuten auf einen Energiemangel hin.

Lastbezeichnung	Energie [MWh]	Durchschnitt [MW]	Maximum [MW]	Minimum [MW]
Gewerbe (G0)	2332,769	0,2662958	0,5528876	0,09743718
Haushalt (H0)	2332,908	0,2663093	0,4956063	0,08943871
Landwirtschaft (L0)	2333,064	0,2663286	0,5509762	0,1166443
Gesamtlast	6998,741	0,7989337	1,3203	0,3208

Tabelle 4.4: Simulationsergebnis des Energieverbrauchs im Jahr 2014

Die Tabelle 4.4 beinhaltet weiterführende Werte zu den Lasten. Die insgesamt verbrauchte Energie im Jahr 2014 beträgt rund 7 GWh. Dies ist der zu erwartende Wert, da die Lastmodelle im Kapitel 3.3 dementsprechend modelliert wurden. Das Minimum von 0,32 MW bedeutet, dass es zu jedem Zeitpunkt im Jahr einen Verbrauch gibt. Insofern muss das Energieversorgungssystem im gesamten Jahr 2014 Leistung bereitstellen können.

4.1.3 Leistungsprofil der Residuallast

Anhand der Residuallast lässt sich der Energiemangel und -überschuss gut erkennen. Das Leistungsprofil der Residuallast ist für die Untersuchung des Speicheraufwandes maßgeblich.

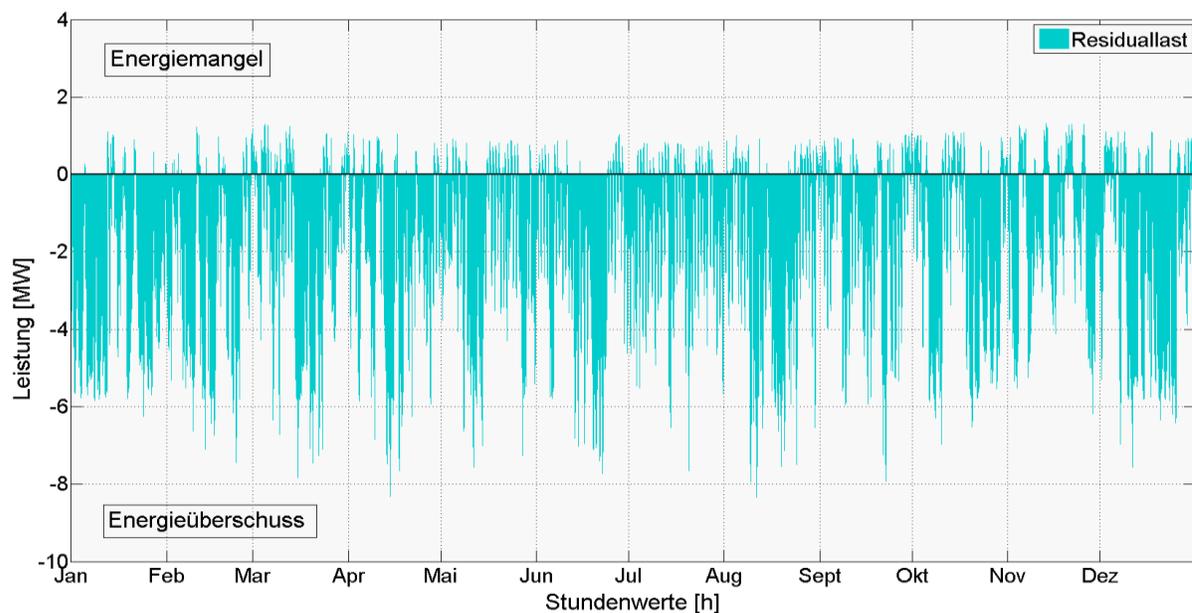


Abbildung 4.4: Leistungsprofil der Residuallast im Jahr 2014

Dabei ist der stark ausgeprägte Energieüberschuss auffällig, welcher durch die negativen Leistungen zu erkennen ist. Die Energieerzeugung übersteigt den Verbrauch auf der Insel Pellworm um knapp das Dreifache, sodass die Residuallast für das Jahr 2014 in etwa der Realität entspricht.

4.2 Auswertung und Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse bezieht sich auf die Residuallast, da hier die fehlende und überschüssige Energie zur Auslegung von Speichern ersichtlich ist. Für eine bessere Übersicht wird die Residuallast in zwei Leistungsprofile eingeteilt: Der Energiemangel, welcher die positiven Leistungen beinhaltet und der Energieüberschuss, welcher die negativen Leistungswerte beinhaltet. Zum erleichterten Verständnis wird der Energieüberschuss im weiteren Verlauf als positive Leistung betrachtet.

Bezeichnung	Energie [MWh]	Durchschnitt [MW]	Maximum [MW]	Minimum [MW]
Energiemangel	791,82	0,0904	1,3143	0
Energieüberschuss	1809,90	2,0664	8,3398	0

Tabelle 4.5: Energiemangel und -überschuss im Jahr 2014

Mit den oben aufgezeigten Daten in der Tabelle 4.5 lassen sich bereits die ersten Rückschlüsse für die Auslegung eines Batteriesystems führen. Um eine stabile Versorgung gewährleisten zu können, muss der Speicher eine Entladeleistung von min. 1,3143 MW leisten können, da dies der maximale Wert an mangelnder Energie, sprich die Spitzenlast, ist. Bestenfalls beträgt die Ladeleistung min. 8,34 MW, um möglichst keine Energie zu verlieren. Weiterhin muss der elektrische Speicher im Laufe des Jahres eine gesamte Kapazität von 791,82 MWh bereitstellen. Der Anteil an dem erzeugten Energiegehalt wiederum beträgt mehr als das Doppelte. Demnach würde ein Speicher, der für eine derartig unterbrechungsfreie Versorgung ausgelegt ist, niemals die komplette Energie speichern können. Wird der Speicher jedoch für die gesamte zu speichernde Energie ausgelegt, also für eine Kapazität von 1809,90 MWh, dann würde dieser für einen derartigen Verbrauch zu überdimensioniert sein. Das Leistungsspektrum eines solchen Speichers würde niemals ausgereizt werden können.

Eine genauere Untersuchung analysiert den ungünstigsten Zeitraum mit der höchsten Energiedichte aus dem Energiemangel. Diese Energiedichte gilt es mit Hilfe von

gespeicherter Energie abzudecken. Das folgende MATLAB-Script „Energiedichten_Mangel.m“ berechnet alle Energiedichten und die zugehörigen Zeiträume, die im Jahr 2014 auftreten.

```
Energemangel_Kap = zeros(300,3); %Definition der Matrix für die Energiedichten
j = 1; %Hilfsvariable
temp = 0; %Hilfsvariable

for k = 1:1:8760 %For-Schleife mit einer Laufzahl für alle Stunden im Jahr

    %Wird ein wert größer 0 gefunden, wird der entsprechende Zeitpunkt
    %zugeordnet und eine Hilfsvariable gesetzt
    if Energemangel(k,1) > 0
        if Energemangel_Kap(j,1) == 0
            Energemangel_Kap(j,1) = Energemangel(k,2); %Startzeitpunktes
        end
        temp = 1;
    end

    %Durch die gesetzte Hilfsvariable summieren sich die gefunden werte,
    %die größer 0 sind und stellen die Energiedichte dar.
    if temp == 1
        Energemangel_Kap(j,3) = Energemangel_Kap(j,3) + Energemangel(k,1);
        if Energemangel(k,1) == 0
            Energemangel_Kap(j,2) = Energemangel(k-1,2); %Endzeitpunktes
            j = j + 1; %Nächste Zeile zur Berechnung der Energiedichte
        end
    end

    %Nachdem die Energiedichte summiert wurde, schließt die erste gefundene
    %0 die Summierung ab und setzt die Hilfsvariable zurück.
    if Energemangel(k,1) == 0
        temp = 0;
    end
end
```

Das Script liefert eine Übersicht „Energimangel_Kap.mat“ mit einem Start- und Enddatum sowie die in diesem Zeitraum entstandene Energiedichte. Die Analyse zeigt, dass der Speicher in insgesamt 293 verschiedenen Zeiträumen im Jahr 2014 Energie bereitstellen muss, sprich Entladevorgänge durchführt. Der Maximalwert der Energiedichte stellt die benötigte Kapazität des Batteriesystems und gleichzeitig den ungünstigsten Zeitraum dar. Zusammenhänge zwischen diesen Zeiträumen werden dabei außer Betracht gelassen.

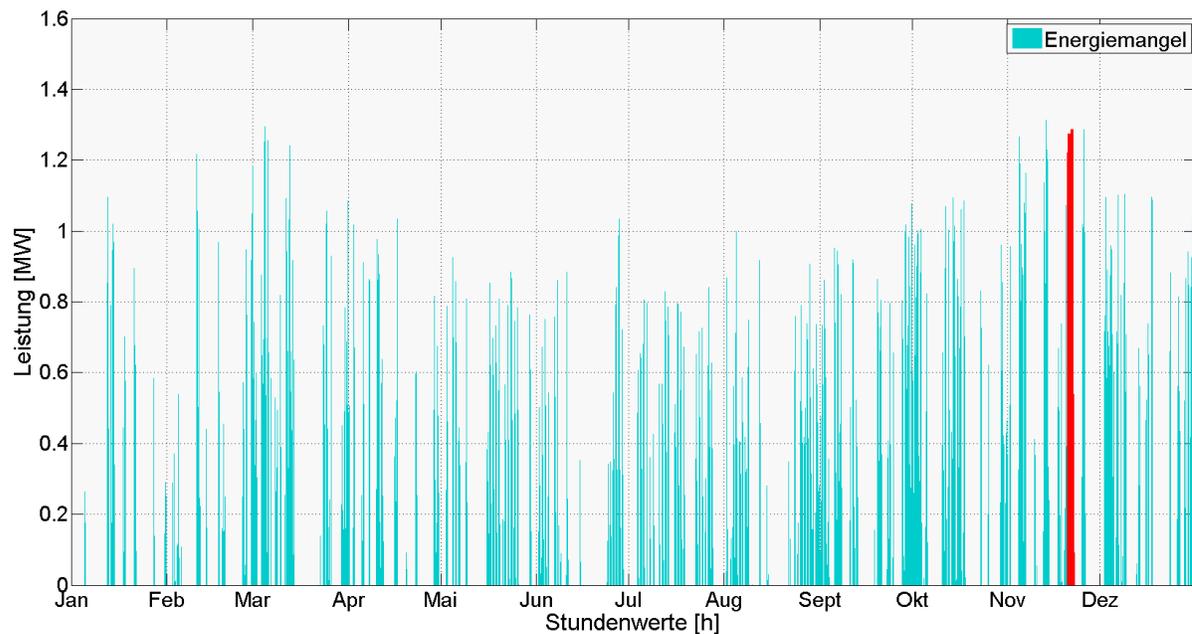


Abbildung 4.5: Energimangel und höchste Energiedichte (rot)

Die Abbildung 4.5 zeigt den Verlauf des Energiemangels und den in rot markierten ungünstigsten Zeitraum mit der höchsten Energiedichte. Die vergrößerte Darstellung des Bereiches ist in der Abbildung 4.6 zu erkennen.

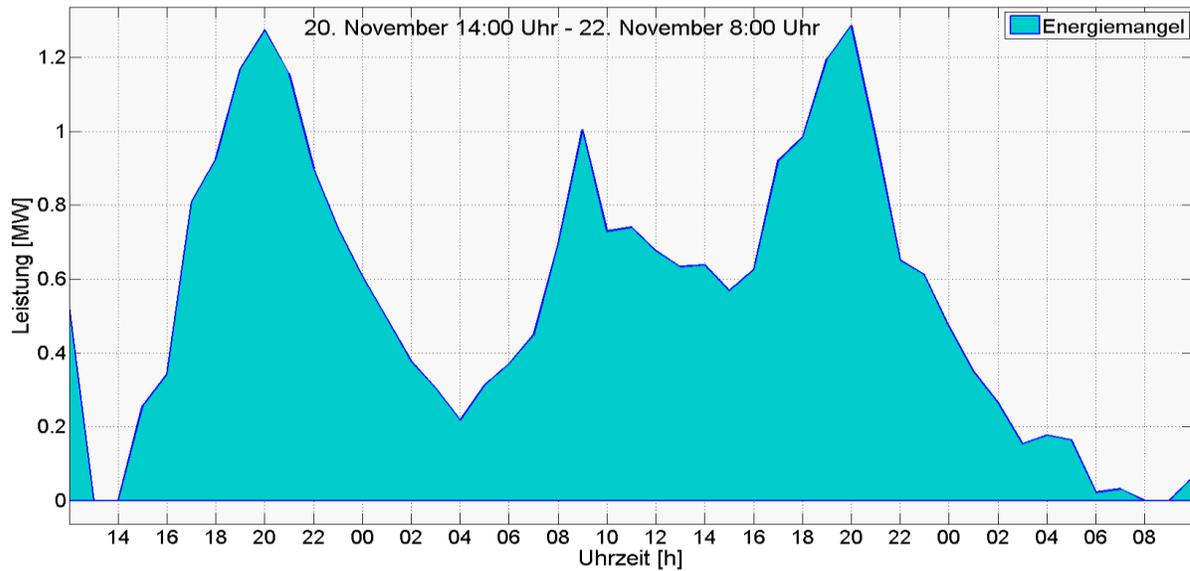


Abbildung 4.6: Höchste Energiedichte im November 2014

Der ungünstigste Zeitraum findet vom 20. November 14:00 Uhr bis 22. November 8:00 Uhr im Jahr 2014 statt. Die Kapazität, die es durch ein Speichersystem bereitzustellen gilt, beträgt $25,28 \text{ MWh}$. Das Maximum der Entladeleistung während dieser Zeit beträgt $1,29 \text{ MW}$. Das Batteriekraftwerk muss also mindestens eine Kapazität von $25,28 \text{ MWh}$, um eine unterbrechungsfreie Stromversorgung gewährleisten zu können. Dies gilt jedoch nur in Anbetracht der stationären Betriebsbedingungen; d.h. Lade- und Entladevorgänge wurden nicht beachtet, sodass keine Aussagen zum derzeitigen Ladestatus getroffen werden können. Infolgedessen ist die Auslegung für die genannten Minimalanforderungen nur im Falle einer komplett aufgeladenen Batterie möglich. Weiterhin gilt Einschränkungen durch Entladetiefen zu beachten. Daher ist die Energiedichte eines solchen Speichers wesentlich größer zu wählen, bspw. durch eine Kapazität von 30 MWh .

Speicheranforderung	Kapazität [MWh]	Ladeleistung [MW]	Entladeleistung [MW]
Minimum	25,28	unbekannt	1,3143
Maximum	830,18	8,3398	unbekannt

Tabelle 4.6: Übersicht der Speicheranforderung des Energieversorgungssystems

Die Tabelle 4.6 stellt die minimalen und maximalen Speichieranforderungen dar. Kapazitäten von ungefähr 30 *MWh* sind bereits Realität, wie das Batteriesystem in China [12] zeigt, ebenso wie Entladeleistungen von 1,31 *MW* für die Spitzenlasten. Eine Speicherkapazität von 830,18 *MWh*, um die gesamte erzeugte Energie speichern zu können, ist für den heutigen Stand der Technik verhältnismäßig aufwendig. Die minimalen Ladeleistungen und die maximalen Entladeleistungen sind unbekannt, da hierfür weiterführende Analysen notwendig sind und der Status der geladenen Batterie bekannt sein muss.

Speicher	Kapazität [MWh]	Ladeleistung [MW]	Entladeleistung [MW]
Redox-Flow	1,60	0,20	0,20
Li-Ion	0,56	1,00	1,10

Tabelle 4.7: Eigenschaften der auf Pellworm bereits installierten Speichersystemen

Die auf Pellworm vorhandenen Langzeitspeicher der Vanadium-Redox-Flow-Batterie und die Lithium-Ionen-Batterie sind demnach nicht ausreichend ausgelegt. Damit das Energieversorgungssystem autark laufen kann, muss ein neues Speichersystem errichtet werden. Dazu wird die Wirtschaftlichkeit der vorgestellten Speichertechnologien im Einzelnen näher betrachtet. Für eine einfach gehaltene Abschätzung wird lediglich der Kostenfaktor für eine Speicherkapazität von 30 *MWh* und einer Entladeleistung von 1,5 *MW* berechnet. Die Investitionskosten und weitere wichtige Eigenschaften der Batteriespeichersysteme gehen aus einer Studie des „Bundesverbandes Erneuerbare Energie e.V.“ [15] und einer Energiespeichertagung der „EnBW Energie Baden-Württemberg AG“ [16] hervor.

Demnach betragen die Investitionskosten der Lithium-Ionen-Batterie in etwa 500 *Euro/kWh* plus 150 *Euro/kW* und der Redox-Flow-Batterie in etwa 500 *Euro/kWh* plus 1250 *Euro/kW*. Allerdings werden bei den genannten Preisen keine weiteren spezifischen Kosten, wie Wartung, Reparatur, Kapitalkosten oder dergleichen mit einberechnet, sodass der endgültige Preis für ein Batteriesystem wesentlich höher liegen kann.

4.2.1 Wirtschaftlichkeit eines Lithium-Ionen-Batteriesystems

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Batteriesystemen gestaltet sich schwierig, da viele komplexe Faktoren, z.B. der Stand der Entwicklung, eine Rolle spielen. Deshalb wird hier eine grobe Abschätzung mit Annahmen vorgenommen. Der Wirkungsgrad eines Lithium-Ionen-Batteriesystems beträgt ca. $\eta = 85 \%$, sodass dieser einen Einfluss auf die gesamte Speicherkapazität nimmt. Der Kostenpunkt für die Investition unter Einbeziehung des Wirkungsgrades berechnet sich wie folgt:

$$\frac{30 \text{ MWh}}{0,85} \cdot 500 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 1,5 \text{ MW} \cdot 150 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 17.872.059 \text{ €} \quad (4.1)$$

Für eine finale Speicherkapazität von $35,29 \text{ MWh}$ und Entladeleistung von $1,5 \text{ MW}$ betragen die Investitionskosten in etwa $17,9 \text{ Mio. Euro}$. Des Weiteren werden die Eigenschaften einer Lithium-Ionen-Batterie auf ca. 3000 Zyklen und einer Lebensdauer von $15 - 20$ Jahren geschätzt. Ein Zyklus bezeichnet das vollständige Laden und Entladen einer Batterie. Die vorangegangene Analyse der Residuallast von 2014 gibt weitere Aufschlüsse über die Anzahl der Zyklen. Es treten 293 Zeitpunkte im Jahr auf, in denen Energie bereitgestellt werden muss und 294 Zeitpunkte, in denen die Batterie durch einen Energieüberschuss geladen wird. Dies entspricht in etwa 300 Zyklen im Jahr, wobei nicht jeder dieser Zeitpunkte den Speicher komplett ausreizen. Werden also nur die Zeitpunkte betrachtet, welche eine Kapazität von mindestens 5 MWh benötigen, beträgt die Anzahl der geschätzten Volllastzyklen knapp 100 . Diese Anzahl geht aus der Analyse der berechneten Energiedichten hervor, indem nur diejenigen Zeiträume gezählt wurden, welche größer 5 MWh sind. Ist die Batterie für eine Anzahl von 3000 Zyklen ausgelegt worden, so müsste die Lebensdauer demnach 30 Jahre betragen.

Anhand der Lebensdauer lässt sich ein Vergleich der Kosten zwischen dem Stromverbrauch durch den Import von Energie und der Speicherinvestition ziehen. Angenommen die erzeugte Energie, also der Energieüberschuss, wird direkt vor Ort verbraucht, dann müsste nur noch in den Zeiträumen des Energiemangels Strom importiert

werden. Der jährliche Verbrauch, welcher im Jahr 2014 bezahlt werden müsste, beträgt 792 MWh . Bei einem derzeitigen Strompreis von rund $0,30 \text{ Euro/kWh}$, vorausgesetzt dieser bleibt in den nächsten 30 Jahren konstant, ergeben sich Stromkosten in Höhe von $7,13 \text{ Mio. Euro}$. Die Differenz gegenüber den Speicherinvestitionskosten für eine 30 jährige Lebensdauer von rund $17,9 \text{ Mio. Euro}$ ist sehr hoch. Werden ferner Vergütungen durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) [19] für das Einspeisen der überschüssigen Energie in das Verbundnetz betrachtet, sinkt der endgültige Strompreis und die Differenz dehnt sich weiter aus. Es stellt sich also heraus, dass die Investition eines Lithium-Ionen-Speichers in der Größenordnung einer effektiven Speicherkapazität von 30 MWh wirtschaftlich unbrauchbar ist, da es niemals zu einer Amortisierung kommen kann.

4.2.2 Wirtschaftlichkeit eines Redox-Flow-Batteriesystems

Als Vergleichssystem dient die Redox-Flow-Batterie. Der Wirkungsgrad ist niedriger und beträgt ca. $\eta = 75 \%$. Der Kostenpunkt für die Investition unter Einbeziehung des Wirkungsgrades berechnet sich folgendermaßen:

$$\frac{30 \text{ MWh}}{0,75} \cdot 500 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 1,5 \text{ MW} \cdot 1250 \frac{\text{€}}{\text{kW}} = 21.875.000 \text{ €} \quad (4.2)$$

Die Batterie muss für eine Speicherkapazität von 40 MWh ausgelegt sein, damit effektiv 30 MWh bereitgestellt werden können. Abgesehen vom Wirkungsgrad sind die Eigenschaften der Redox-Flow-Variante im Gegensatz zur Lithium-Ionen-Variante wesentlich besser und zeichnen sich durch eine Anzahl von ungefähr 10.000 Zyklen aus. Bei insgesamt 100 Volllastzyklen im Jahr würde das Speichersystem eine Lebensdauer von 100 Jahren erreichen können. In Anbetracht der Stromkosten innerhalb der nächsten 100 Jahre würde der Preis somit bei $23,8 \text{ Mio. Euro}$ liegen. Die Differenz in Bezug auf die Speicherinvestitionskosten von $21,9 \text{ Mio. Euro}$ ist in diesem Fall eher gering. Der endgültige Strompreis durch Einbeziehung der Vergütungen ist ferner zu beachten.

Trotzdem liefert dieses Ergebnis einen Anreiz, zusätzliche Faktoren zu überprüfen, um bspw. spezifische Kosten aufstellen zu können. Eine weitere Erkenntnis ist, dass sich eine Redox-Flow-Batterie, bedingt durch die hohe Lebensdauer und Zyklenanzahl, als zentraler Großspeicher besser eignet als eine Lithium-Ionen-Batterie.

4.2.3 Szenario: Netzanschlusskosten im Vergleich zu Speicherkosten

Betrachtet wird weiterhin das Beispiel der Insel Pellworm. Im gegenwärtigen Zustand ist die Insel durch zwei 20 kV-Seekabeln mit dem Festland verbunden. Für zukünftige Systeme, die ähnliche Anlagen- und Siedlungsstrukturen vorweisen, ist es interessant den Kostenaufwand zwischen elektrischen Speichern und einer Verlegung eines neuen Netzanschlusses, z.B. durch Seekabel, zu vergleichen.

Die Kosten für die Verlegung von Seekabeln können in etwa abgeschätzt werden. Bei der Verlegung des 53 km langen 30 kV-Seekabels für die Insel Helgoland [17], wurden bspw. 20 Mio. Euro benötigt. Demnach betragen die Kosten etwa 0,377 Mio. Euro/km. Bei dem Bericht zu den Netzanschlusskosten bei der Integration von Windenergie des Fraunhofer Instituts [18] werden die Kosten für Hochspannungsseekabel aufgestellt. Nach diesem Bericht betragen die Kosten pro verlegtem Kilometer Seekabel in etwa 0,5 Mio. Euro. Auch die spezifischen Kosten bezogen auf die Gesamtinvestition wurden betrachtet und fallen bei Arbeiten in Küstennähe, wie es bei der Insel Pellworm der Fall ist, geringer aus. Insofern wird mit einem geschätzten Wert für die Verlegungskosten von Seekabeln in Höhe von 0,35 Mio. Euro/km gerechnet. Die kürzeste Entfernung zwischen Pellworm und dem Festland beträgt 8 km. Da es sich bei dem Netzanschluss um zwei Seekabel handelt, sind es insgesamt 16 km Seekabel, die mindestens verlegt werden müssen. Die Investitionskosten der Seekabel betragen 5,6 Mio. Euro für die Neuinstallation eines Netzanschlusses und haben eine Lebensdauer von ca. 40 Jahren. Damit liegen die Kosten für einen neuen Netzanschluss deutlich unter den Speicherinvestitionskosten. Zudem sind durch den Anschluss an das Festland viele weitere Vorteile gegeben. Dazu zählt insbesondere das Bereitstellen von Regenergie zum Ausgleich von Netzschwankungen im Verbundnetz.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Erneuerbare Energien werden und müssen die Zukunft der Stromversorgung bestimmen. Nicht nur um einer Verknappung der fossilen Brennstoffe vorzubeugen, sondern auch um die Umwelt zu schonen. Die Solar- und Windenergie sind dafür prädestinierte Energiequellen. Das beweist die Anlagen- und Siedlungsstruktur der nordfriesischen Insel Pellworm, welche in dieser Arbeit durch eine Lastflussanalyse der Stromverbraucher und -produzenten näher untersucht wurde. Die jährliche Energieerzeugung von rund 22 *GWh* übersteigt den jährlichen Verbrauch von ca. 7 *GWh*. Diese Tatsache stellte die Grundlage der Untersuchung dar, ein zentrales Großspeichersystem für eine autarke Energieversorgung auszulegen und dessen Wirtschaftlichkeit abzuschätzen. Hierzu wurde die Software PowerFactory als Simulationsumgebung für das Energieversorgungsmodell genutzt. Daten des Deutschen Wetterdienstes aus dem Jahr 2014, wie die Globalstrahlung, die Umgebungstemperatur und die Windstärken waren der Berechnung von Leistungsprofilen der Energieerzeugung dienlich. Standardlastprofile des Bundesverbands für Energie und Wasserwirtschaft e.V. ermöglichten die Erstellung von Lastprofilen von Haushalt, Gewerbe und Landwirtschaft. Mit Hilfe dieser Daten war es möglich, ein realitätsnahes Energieversorgungssystem zu entwickeln, das die Anlagenstruktur auf Pellworm referenziert und in seinen groben Zügen widerspiegelt. Diesbezüglich wurden geeignete Modelle und Systeme aus der Entwicklungsumgebung von PowerFactory benutzt und schlussendlich durch eine Lastflussanalyse in Form von Leistungsprofilen zusammengetragen. Somit konnten Zeiträume im Beispieljahr 2014 dargestellt werden, die einen Energiemangel oder -überschuss aufzeigten. Diese Zeiträume wurden näher betrachtet, da sich hier die Notwendigkeit von Speicherkapazitäten, Lade- und Entladeleistungen abzeichneten, welche wiederum für die Auslegung von Speichern wichtig sind. Zum Vergleich dienten zwei verschiedene elektrochemische Speicher: die Redox-Flow-Batterie und die Lithium-Ionen-Batterie.

Das Ergebnis zeigt, dass die Anforderung der benötigten Speicherkapazität von ungefähr 30 *MWh* zum ungünstigsten Zeitraum im Jahr 2014 einen sehr hohen Wert darstellt. Eine derartige Speicherkapazität ist bisher nur sehr teuren Großprojekten [14] vorbehalten.

Anhand solcher Anlagen ist jedoch zu erkennen, dass derartige Systeme nicht unrealistisch sind und die Technologien bereits zu soliden Fortschritten verholfen hat. Die Frage, ob es möglich ist, einen zentralen Großspeicher für eine ländliche Siedlungsstruktur so auszulegen, dass ein autarkes Energieversorgungssystem mit Hilfe von Sonnen- und Windenergie entsteht, ist auf den ersten Blick eindeutig zu beantworten. In Anbetracht der Vereinfachungen dieser Simulation und dem Vergleich aus gleichwertigen Projekten ist es möglich, einen zentralen Großspeicher auszulegen, welcher einen Energieausgleich für die Insel Pellworm und ähnliche Strukturen ermöglichen kann. Dabei ist die Variante der Lithium-Ionen-Batterie, bedingt durch die Lebensdauer und Zyklenanzahl, nicht sonderlich gut geeignet wie die Variante der Redox-Flow-Batterie. Diese weist eine hohe Lebensdauer auf und bewirkt somit eine höhere Zyklenanzahl. Angesichts der Kostenfaktoren in Bezug auf die Stromkosten für die genannte Laufzeit der Batterie fallen diese wesentlich geringer aus. Jedoch sind die Kostenfaktoren nicht transparent genug, um genaue Aussagen treffen zu können. Das Szenario der Netzanschlusskosten im Vergleich zu den Speicherkosten zeigt, dass eine Verbindung zum Festland die beste Lösung ist. Zum einen sind die Investitionskosten für eine Speicherung der Energie sehr teuer, zum anderen sind Vorteile von Netzstabilisierungseffekten im Verbundnetz gegeben.

Viele Annahmen und Schätzungen, wie die Eigenschaften der Batteriesysteme oder die Bereitstellung der maximalen Kapazität, manipulieren die Ergebnisse und können teilweise zu erheblichen Abweichungen führen. Es bedarf weiterer Analysen, um endgültige Aussagen treffen zu können und um tiefgründiger in die einzelnen Faktoren zu blicken. Die Simulation des Energieversorgungssystems dieser Arbeit schafft daher ein breites Spektrum an weiteren möglichen Untersuchungen. Auch in neuartigen Energiekonzepten, wie beim Projekt „SmartRegion Pellworm“ [3], sind interessante Ansätze zu weiterführenden Untersuchungen zu finden. Das Demand-Side-Management (DSM), verbrauchernahe Speichertechniken in Form von Elektroheizungen und Haushaltsspeicher sowie weitere erneuerbare Energiequellen hinsichtlich von Biogasanlagen oder Blockheizkraftwerken sind Beispiele dafür. Auch die Verknüpfung von Technologien, wie die Nutzung verschiedenster Speichertechniken im Sinne von hybriden Systemen geben vielfältige

Ansätze. Aufstellungen weiterer Szenarien sind ebenfalls möglich, indem bspw. der Verbrauch ebenfalls so hoch ist wie die Energieerzeugung und diesbezüglich eine Kostenaufstellung stattfindet. Auf dem Markt befinden sich zudem jede Menge alternative Speichertechniken, wie die Blei-Säure-Batterie oder gar mechanische Speicher, wie Druckluftspeicher, die zu einem großen Vergleich herangezogen werden können. Der Ausblick in die Zukunft der Energieversorgungssysteme und deren Stabilisierung sind sehr vielfältig und daher auch sehr komplex. In Deutschland und vielen anderen Ländern wird geforscht und dies teilweise mit sehr guten Ergebnissen [12]. Ob die Erschließung neuer regenerativer Energiequellen, die Effizienz von Speichertechnologien oder die Reduzierung des Stromverbrauchs: Die Welt der Energie ist dabei, sich stets weiterzuentwickeln und hat das Ziel, ein intelligentes und sauberes Stromnetz zu erschaffen.

Literaturverzeichnis

- [1] **Horenkamp, W., et al.:** *VDE-Studie Dezentrale Energieversorgung 2020 - Gesamttext* [Studie] Frankfurt: (ETG), Energietechnische Gesellschaft im VDE, 2007
 - [2] **Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit:** *Stromspiegel für Deutschland 2014* [Bericht] Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2014
 - [3] **Schleswig-Holstein Netz AG:** *SmartRegion Pellworm* [Flyer] Quickborn: Schleswig-Holstein Netz AG, 2014
 - [4] **ENERCON GmbH:** *ENERCON Produktübersicht* [Tabelle] Aurich: ENERCON GmbH, 2014
 - [5] **Shell Solar GmbH:** *Produktinformation - Shell PowerMax 150-C/160-C* [Tabelle] München: Shell Solar GmbH. Produktinformation
 - [6] **DIgSILENT GmbH:** *PV System - ElmPvsys, TypPvpanel* [technische Referenz] Version: 15.2, Gomaringen: DIgSILENT GmbH, 2014
 - [7] **VDE - ETG-Task Force:** *VDE-Studie: Energiespeicher für die Energiewende - kurzfristig noch nicht von so hoher Bedeutung* [Online] 2012
<https://www.vde.com/de/fg/ETG/Arbeitsgebiete/V2/Aktuelles/Oeffenlich/Seiten/StudieSpeicherungsbedarf.aspx>
 - [8] **Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE:** *Integration von Windenergie in ein zukünftiges Energiesystem unterstützt durch Lastmanagement („Wind und Last“)* [Bericht] Freiburg: Fraunhofer-Institut, 2007
 - [9] **Deutscher Wetterdienst:** *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Klimadaten* [Online] 2014, <http://www.dwd.de/cdc>. Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Werte bearbeitet
-

-
- [10] **Jessen, E.:** *Hamburger Abendblatt*. [Online] 2009
<http://www.abendblatt.de/region/norddeutschland/article106749652/Lange-Leitung-Strom-fuer-Helgoland.html>.
- [11] **Neuman, G.:** Lithium-Akkumulatoren - Vielseitige und leistungsfähige Speicher elektrischer Energie, *Technik in Bayern* 2008
- [12] **Graber, K.:** *ELECTROVAYA DELIVERS 1.5 MWH LITHIUM ION BATTERY-BASED ENERGY STORAGE SYSTEM TO ARIZONA PUBLIC SERVICE COMPANY* [Bericht] ABB Media Relations. Toronto: Electrovaya Inc., 2012
- [13] **Deutscher Wetterdienst:** *Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland - Jahressummen 2014* [Grafik] Hamburg: DWD, Abt. Klima- und Umweltberatung, 2014
- [14] **Peter, Dipl.-Ing. (FH) S.:** *Modellierung einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Strukturen* [Studie] Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2013, ISSN 1862-4359
- [15] **Dr.-Ing. N. Krzikalla, Sigi Achner, Stefan Brühl, BET.:** *Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung aus Erneuerbaren Energien* [Studie] Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. Aachen: BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH, 2013, ISBN-13: 978-3-920328-64-5
- [16] **solarserver.de - Heindl Server GmbH:** *SolarServer - Das Internetportal zur Sonnenenergie* [Online] BYD Company Ltd., 2012, <http://www.solarserver.de/solar-magazin/nachrichten/archiv-2012/2012/kw01/byd-stellt-speicher-fuer-36-megawattstunden-solar-und-windenergie-in-der-chinesischen-provinz-hebei-fertig.html>
- [17] **Kessler, A.:** *Speicher für die Energieversorgung von morgen* [Tagung], EnBW Energie Baden-Württemberg, 2014
-

- [18] **Schuerle, Klaus-Dieter.:** Staatssekretär im Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [Zitat] 2012
- [19] **Doetsch, Dr.-Ing. C.:** Durchbruch für neuartige Stromspeicher: Große und leistungsfähige Redox-Flow-Batterie [Online] 2013
<https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2013/Maerz/Durchbruch-fuer-neuartige-Stromspeicher-Redox-Flow.html>
- [20] **Kempkens, W.:** Größter Batteriespeicher Europas geht in Schwerin ans Netz *INGENIEUR.de*. [Online] 2014
<http://www.ingenieur.de/Themen/Energiespeicher/Groesster-Batteriespeicher-Europas-geht-in-Schwerin-ans-Netz>
- [21] **Bundesnetzagentur:** *Zahlen, Daten und Informationen zum EEG* [Online] 2015
http://www.bundesnetzagentur.de/cln_1411/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/zahlenunddaten-node.html;jsessionid=292FB3B0F87C740FC77CF58F43D30143
-

Anhang

Der Anhang zur Arbeit ist bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gustav Vaupel einsehbar.

Inhalt der CD:

- MATLAB Scripte
 - DIgSILENT Temporärer Lizenzvertrag
 - Lastflussanalyse_Daten_2014.csv
 - 16_Kessler_Energiespeichertagung_2014.pdf
 - BEE-Plattform-Systemtransformation_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf
 - Bericht_Task2.4_WuL_20071108.pdf
 - climate_change_14_2013_modellierung_einer_vollstaendig_auf_erneuerbaren_energien.pdf
 - ENERCON_Produkt_de_Maerz_2014_web.pdf
 - Globalstrahlung_2014.pdf
 - PowerMaxPlus_150C_160C_D_0905.pdf
 - PR20120223.pdf
 - SmartRegion_Imageflyer2014.pdf
 - Stromspiegel2014web_final.pdf
 - TechRef_ElmPvsys.pdf
 - vdestudie-DezEnergieversorgung2020.pdf
-

Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmitteln benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 02. Juni 2015

Ort, Datum

Mathes Nagengast