Projektarbeit in Schwerpunkt Energietechnik

Sommersemester 2017

Analyse und Optimierung der Wind- und Photovoltaiksysteme für das Versorgungsgebiet Forchheim

Opt.Wind-PV-Sys.

Technische Hochschule Georg-Simon-Ohm Nürnberg

Studiengang: Energieprozesstechnik

Gökhan Osan

Müllnerstraße 34

90429 Nürnberg

Osango62178@th-nuernberg.de

Tel.: 0176174545091

Beginn: 20.03.2017

Abgabe: 30.06.2017

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp

Korrektor: Tobias Prosch

1 Inhaltsverzeichnis

I. Abkürzungsverzeichnis III
II. Abbildungsverzeichnis IV
III. Tabellenverzeichnis V
2 Einleitung 1
2.1 Problemstellung 1
2.2 Aufgabenstellung der Projektarbeit 2
2.3 Zielsetzung 3
3 Analyse und Aufbereitung der Wind- und Globalstrahlungsdaten 4
3.1 Excel-Tool MERRA-2 4
3.2 Optimale Nabenhöhe für das Versorgungsgebiet 6
3.3 Excel-Tool Energieversorgungsanalyse 7
3.3.1 Windenergieanlagenkennlinie und Windenergieanlagenleistung 8
3.3.2 Solarleistung 9
4 Optimierung der Wind- und Photovoltaiksysteme 10
4.1 Arten und Ausrichtungen von Windkraftanlagen 10
4.2 Arten und Ausrichtungen von Photovoltaikanlagen 12
4.3 Benötigte Leistung und Anzahl an Windrädern und Solarmodulen 14
4.3.1 Windkraftanlagen 14
4.3.2 Photovoltaikanlagen auf Dach- und Freifläche 19
5 Fazit 23
6 Literaturverzeichnis 24

I. Abkürzungsverzeichnis

Opt.Wind-PvSys.	Optimierung der Wind- und Photovoltaiksysteme
NASA	National Aeronautics and Space Administration
A_{Rotor}	Rotorfläche
d_{Rotor}	Rotordurchmesser
IEC	Internationalen Elektrotechnischen Kommission
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
Cp	Leistungsbeiwert
PBetz	Theoretisch mögliche mittlere spezifische Windleistung
PWEA	Tatsächlich abgegebene mittlere spezifische Windleistung

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau eines Stülpmembranspeichers, (Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp, 2014)

Abbildung 2: Benutzeroberfläche des Excel-Tools MERRA-2

Abbildung 3: Bayerische Energie-Atlas: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 160 m Höhe, [online] http://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/?wicket-crypt=XAJ-o--9RII&wicket-crypt=UEN8eATpGlI [10.06.2017]

Abbildung 4: Technische Daten Nordex N100/3300 und N131/3300, [online] http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/Nordex_Delta_Broschuere_de.pdf [12.06.2017]

Abbildung 5: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Konzept einer Agrophotovoltaik-Anlage, [online] https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2015/agrophotovoltaik-nachhaltige-landnutzung-fuer-energie-und-nahrung.html [14.06.2017]

Abbildung 6: Leistungskurve und Anlagenkennlinie Nordex N131/3300, [online] https://www.wind-turbine-models.com/turbines/1284-nordex-n-131-3300-delta#powercurve [20.06.2017]

Abbildung 7: Leistungskurve und Anlagenkennlinie Nordex N100/3300 [online] https://www.wind-turbine-models.com/turbines/438-nordex-n-100-delta [20.06.2017]

Abbildung 8: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum Februar

Abbildung 9: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum Juni

Abbildung 10: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum Oktober

Abbildung 11: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Juli

Abbildung 12: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Dezember

Abbildung 13: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Februar

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Theoretisch mögliche und tatsächlich abgegebene mittlere spezifische Windleistungen für die unterschiedlichen Monate

Tabelle 2: Abgegebene mittlere spezifische Solarleistung für die unterschiedlichen Monate

2 Einleitung

Das Potential der erneuerbaren Energieträger, wie Wind und Sonne, ist nahezu unendlich und wird heutzutage kaum ausgeschöpft. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017): Zurzeit liegt der Anteil von erneuerbaren Energieträgern in Deutschland bei 29 % der Bruttostromerzeugung. Darunter trägt die Windenergie mit 11,9 % den größten Anteil zur Stromerzeugung bei. Dennoch nimmt die Nutzung der Solarenergie in Deutschland immer mehr an Bedeutung zu und es werden aktuell 5,9 % der Bruttostromerzeugung durch Photovoltaikanlagen produziert, [online] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html [19.04.17]. Damit sich die Anteile der erneuerbaren Energieträger in Deutschland weiter ausbreiten können, müssen neue Technologien erforscht werden, die es zum Beispiel ermöglichen, die regenativ erzeugte Energie langzeitig in einem Speicher zu erhalten.

2.1 Problemstellung

Das Problem der erneuerbaren Energieträger ist die Speicherung. Dieses Problem kann mit einem sogenannten Stülpmembranspeicher, wie in Abbildung 1 zu sehen, gelöst werden.

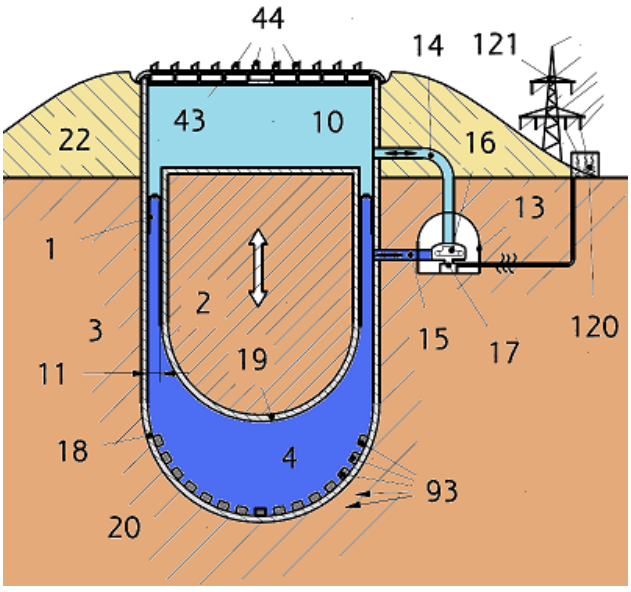

Abb. 1: Aufbau eines Stülpmembranspeichers (Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp, 2014)

Der Stülpmembranspeicher ist ein Energiespeicher mit einem in einer Einfassung (3) beweglichen Kolben (2), welcher mit einer Stülpmembran (1) gegenüber seiner Einfassung(3) abgedichtet und unterirdisch gebaut ist. Durch Anheben und Absenken des Kolbens (2) wird das Wasser durch einen Schacht (15) zu einer Turbine (16) befördert und somit von Lageenergie in mechanische Antriebsenergie umgewandelt. Die Turbine (16) treibt einen Generator (17) an und somit kann die mechanische Antriebsenergie weiter in elektrische Energie umgewandelt werden, welche in ein Stromnetz (120) eingespeist werden kann [online] http://www.poppware.de/Stuelpmembranspeicher/Stuelpmembranspeicher_Spezifikation.pdf [28.05.2017]. Um die Energiewende zu überwinden und Deutschland mit nachhaltiger Energie zu versorgen, könnte der Stülpmembranspeicher eine Lösung für die Zukunft sein. Dieser Speicher würde zum Einsatz kommen um das Defizit der Wind- und Photovoltaikanlage auszugleichen, wenn auf Grund der Wetterlage nicht genug Strom erzeugt werden kann.

2.2 Aufgabenstellung der Projektarbeit

Die Stadt Forchheim soll ausschließlich aus Wind- und Photovoltaikanlagen versorgt werden. Die Stadt Forchheim liegt im Süden des nordbayerischen Regierungsbezirks Oberfranken und hat eine Fläche von 45 km², in der 30.418 Einwohner leben. Um eine Stadt mit regenerativen Energien zu versorgen, müssen die Wind- und Solardaten für das Versorgungsgebiet analysiert werden. Die Energiewetteranalyse erfolgt mit einem Excel-Programm, das den Zugriff auf eine sehr große Datenbank ermöglicht. Dieses liefert zum Beispiel Zeitreihen für Windgeschwindigkeiten und Globalstrahlungsdaten. Aus den ermittelten Daten werden die Größe, Art und Anzahl der Windräder und Solarmodule bestimmt und somit die optimale Wind- und Photovoltaikanlage berechnet und ausgewählt. Außerdem soll die Kombination aus Wind- und Photovoltaikanlagen in Bezug auf die jährliche Wetterlage beispielsweise durch automatisches Nachführen perfekt ausgelegt werden.

2.3 Zielsetzung

Das Ziel dieses Projekts ist es, die Wind- und Globalstrahlungsdaten für das Versorgungsgebiet Forchheim zu analysieren und daraus ein geeignetes Wind- und PV-System zu optimieren.

Der gewonnene Strom aus Wind- und Photovoltaikanlagen soll den Energiebedarf des Versorgungsgebietes Forchheim abdecken. Der überschüssig erzeugte Strom wird in den Stülpmembranspeicher eingespeist.

Zu Beginn der Projektarbeit wurden vier Forschungsfragen aufgestellt:

1. Welche Nabenhöhe ist die optimale Höhe aufgrund der ermittelten Winddaten für Forchheim?

2. Welche Arten und Ausrichtungen von Windrädern und Solarmodulen sind optimal aufgrund der ermittelten Wind- und Globalstrahlungsdaten?

3. Welche Leistung und Anzahl an Windrädern und Solarmodulen ist zu installieren?

4. Welche, von einer Auswahl am Markt angebotener Windenergieanlagen, würde sich derzeitig am besten für die Verhältnisse im Großraum Forchheim eignen?

Diese vier Forschungsfragen werden im Folgenden gründlich erforscht und beantwortet.

3 Analyse und Aufbereitung der Wind- und Globalstrahlungsdaten

Die Analyse und Aufbereitung der Wind- und Globalstrahlungsdaten erfolgen mit zwei Excel-Tools, die von Prof. Popp für die Projektarbeit zur Verfügung gestellt wurden. Die Energiewetteranalyse wurde für das Versorgungsgebiet Forchheim für den Zeitraum von 01.01.2016 bis 31.12.2016 ermittelt. Damit mit den ermittelten Daten energietechnisch relevante Berechnungen fortgeführt werden können, müssen die Wind- und Globalstrahlungsdaten aufbereitet und in ein weiteres Excel-Tool exportiert werden. In den folgenden Abschnitten werden die Excel-Tools genauer beschrieben.

3.1 Excel-Tool MERRA-2

Das Excel-Tool MERRA-2 ermöglicht den Zugriff auf die Datenbank von NASA und liefert die benötigten Zeitreihen für Windgeschwindigkeiten und Globalstrahlungsdaten. Die Verwendung dieses Tools erforderte sämtliche Schritte und Einstellungen in Excel sowie eine Registration auf der Internetseite der NASA. Nach dem erfolgreichen Einstellen wurde mit Hilfe von Google-Earth ein Rastergebiet für die Region Forchheim bestimmt. Daraus ergaben sich die Mittelpunktwerte von Längengrad 11,25 ° E und Breitengrad 49,5 ° N und mit den folgenden Koordinaten: Nord 50,10 °, Süd 48,90 °, West 10,60 ° und Ost 11, 90 °, die das zu ermittelnde Gebiet definieren. Danach wurde der Zeitraum von 01.01.2016 bis 31.12.2016 eingetragen. Durch das Eintragen der Koordinaten und des Zeitraums, wie in der Abbildung 2 Benutzeroberfläche von MERRA-2 zu sehen ist, wird durch Klicken auf Wind- und Globalstrahlungsdaten-Importieren der Download für die Zeitreihe gestartet.

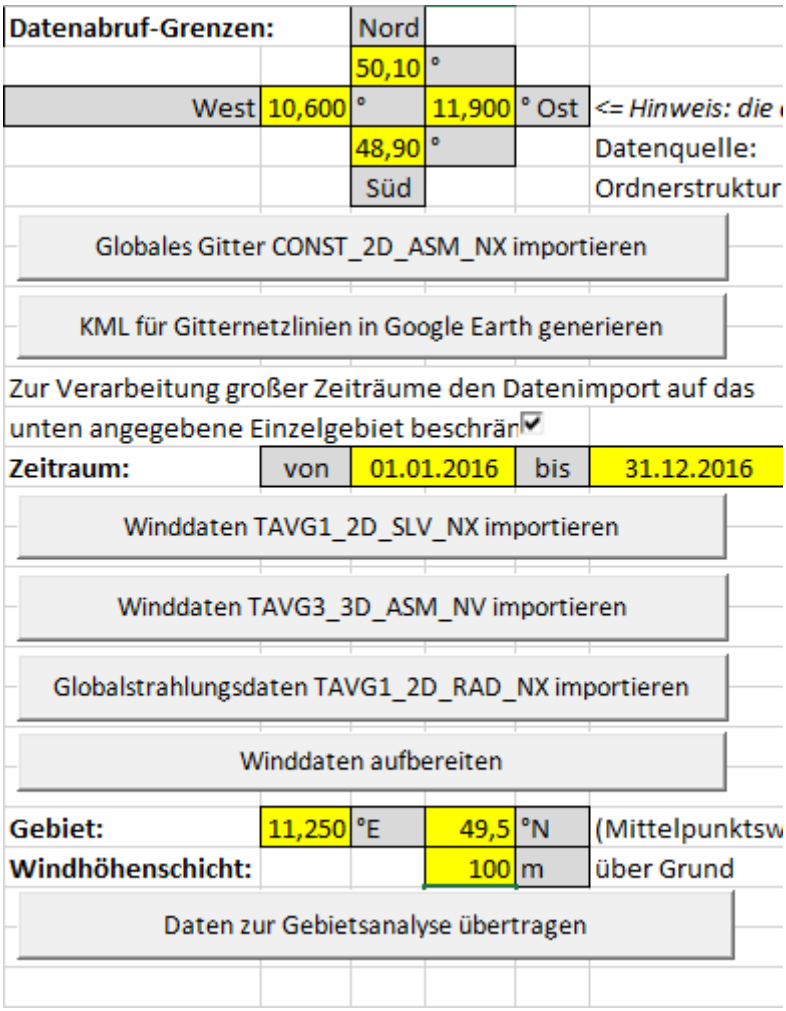

Abb. 2: Benutzeroberfläche des Excel-Tools MERRA-2

Es wurden zunächst die Winddaten mit Stundendurchschnittswerten, danach die Winddaten mit vielen Höhenschichten im Drei-Stunden-Takt und im Anschluss die Globalstrahlungsdaten mit Stundendurchschnittswerten analysiert. Die Analyse hat einige Stunden in Anspruch genommen, da die Daten für das ganze Jahr 2016 und für alle drei Daten mit unterschiedlichen Eigenschaften separat durchgeführt wurden. Die ermittelten Globalstrahlungsdaten können gleich, ohne Aufbereitung, zu einfachen energietechnischen Analysen eingesetzt werden. Während die ermittelten Winddaten weitere Aufbereitungsschritte erfordern. Die Windanalyse hat die Windgeschwindigkeiten für Druckflächen geliefert. Da sich deren Höhenlage mit dem Luftdruck ständig verändert, sind diese Werte zunächst nicht relevant. Es werden die Windgeschwindigkeiten für definierte Höhen über Grund benötigt, in denen die Naben der Windenergieanlagen angeordnet werden können. Daher wird durch Klicken der Schaltfläche „Winddaten aufbereiten“ (Abbildung 2) eine Umrechnung vorgenommen, welche die Windgeschwindigkeiten im Ein-Stundentakt für definierte Höhenschichten

über Grund liefert. Mit diesen Windgeschwindigkeiten liegen die wichtigsten Daten für eine realitätsnahe Modellierung des Windleistungsaufkommens einer Region vor. Für weitere energietechnische Ermittlungen werden die aufbereiteten MERRA-Daten in ein weiteres Excel-Tool zur Versorgungsanalyse exportiert.

3.2 Optimale Nabenhöhe für das Versorgungsgebiet

Für den Export der aufbereiteten Daten musste die Windhöhenschicht über Grund ermittelt werden. Die Wahl der Höhenschicht hängt davon ab, ob das Gebiet flach, hügelig oder gebirgig ist. Das Excel-Tool MERRA-2 liefert eine Standardhöhenabweichung und gibt somit einen Hinweis, ob ein Gebiet flach, hügelig oder gebirgig ist. Je größer dieser Wert, desto größere Höhenabweichungen weisen die Geländebereiche des Rastergebiets von ihrem Mittelwert auf. Die Standardhöhenabweichung für Forchheim ist 48,95 m. Außerdem ist bekannt, dass die Stadt Forchheim und die Region in einem Hügelland liegen. Die modernen Windkrafträder können zurzeit bis auf eine Höhe von 160m gebaut werden. Mit Hilfe vom Bayerischen Energieatlas wurden die Windgeschwindigkeiten in dieser Höhe ermittelt. In Abbildung 3 sieht man eine Karte von Forchheim und seiner Umgebung mit unterschiedlichen mittleren Windgeschwindigkeiten auf 160 m Höhe.

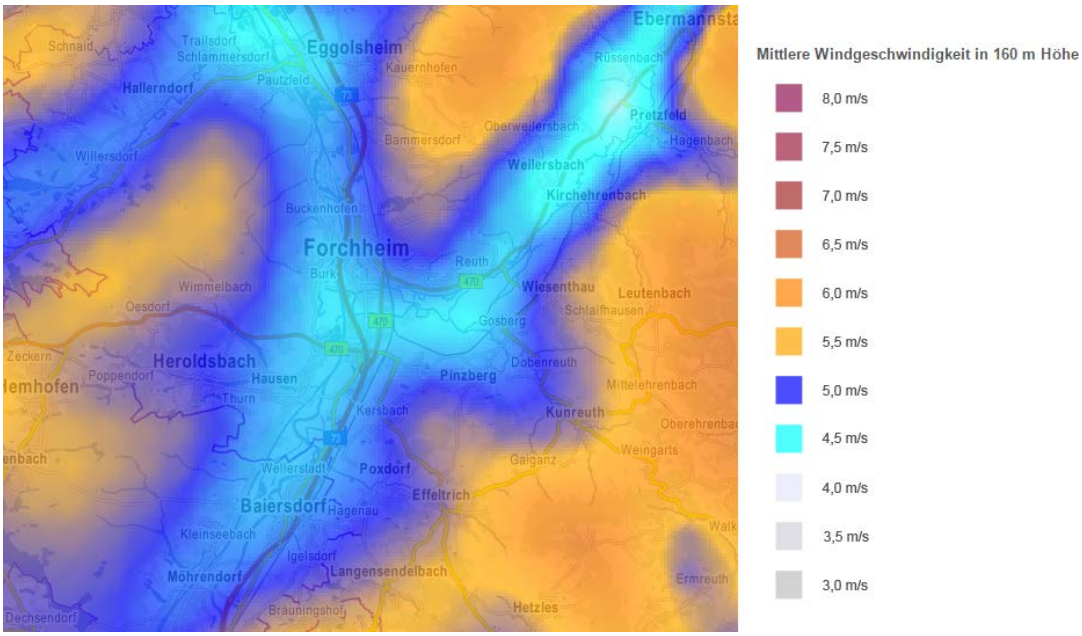

Abb. 3: Bayerische Energie-Atlas: Mittlere Windgeschwindigkeiten in 160 m Höhe (online)

In dieser Höhe ist die mittlere Windgeschwindigkeit für einen Flächenumkreis von 50 x 50 km zwischen 4,5 - 6,5 m/s. In Forchheim ist die mittlere Windgeschwindigkeit 4,5 bis 5,0 m/s, weil die Stadt in einem Tal-Bereich liegt. In der Umgebung gibt es Gebiete, die höher liegen und eine deutlich bessere mittlere Windgeschwindigkeit von 6,0 – 6,5 m/s aufweisen. Je höher die Windgeschwindigkeit, desto höher ist die Windleistung. Ein weiterer Nachteil ist, dass man die Windkraftanlage aus Platzgründen schlecht in Forchheim bauen kann. Deshalb bietet es sich an, die Windkraftanlage in der Umgebung zu bauen zum Beispiel in der Nähe von Effeltrich. In dieser Umgebung gibt es für die Windkraftanlagen ausreichend Platz, um die Windräder auf eine Höhe von 160m zu bauen. Damit die Windgeschwindigkeiten vom Bayerischen Windatlas mit denen von MERRA-2 übereinstimmen, wurde eine Windhöhenschicht von 100 m über Grund gewählt, um auf die gleiche durchschnittliche Windgeschwindigkeit wie im Bayerische Windatlas zu kommen. Somit nähern sich die Windgeschwindigkeiten von MERRA der Realität vom Bayerischen Windatlas an.

3.3 Excel-Tool Energieversorgungsanalyse

Die aufbereiteten MERRA-Daten werden in ein weiteres Excel-Tool zur Versorgungsanalyse exportiert. Es wurden folgende Daten übertragen:

- Die Mittelpunktkoordinaten und die charakteristischen Parameter des Rastergebiets.

- Die Winddaten zur ausgewählten Höhenschicht und die daraus berechneten Daten der Temperatur, des Luftdrucks, der Luftdichte, der totalen Windleistung, der physikalisch maximal umwandelbaren Windleistung und der Windenergieanlagenleistung zu der Windenergieanlagenkennlinie.

- Die auf horizontaler Fläche am Boden auftreffende Globalstrahlungsleistung und die Solarenergieanlagenleistung.

3.3.1 Windenergieanlagenkennlinie und Windenergieanlagenleistung

Mit Hilfe von MERRA Daten und mit Kennlinien konkreter Windenergieanlagen wurden in dem Energieversorgungsanalyse Excel-Tool die Windleistungen bestimmt. Davor wurde ein Windkraftrad ausgewählt und die technischen Daten, wie die Nennleistung, Rotordurchmesser, Ein- und Abschaltgeschwindigkeit, Luftdichte und die Nenn-Windgeschwindigkeit wurden in das Excel-Tool festgelegt.

Aus dem Rotordurchmesser wird die Rotorfläche mit der Formel:

$A_{Rotor} = \frac{\pi}{4} * {d_{Rotor}}^2$ berechnet.

Da die Windleistung in W/m² Rotorfläche bestimmt wird, wurde für die spezifische Nennleistung die Nennleistung durch die Rotorfläche geteilt und nach unten korrigiert, falls das Ergebnis die spezifische Nennleistung überschreiten sollte. Die Modellkennlinie für Windenergieanlagen wird aus den Windgeschwindigkeiten, cp-Werten, sowie der Nennleistung und dem Rotordurchmesser mit der daraus berechneten spezifischen Nennleistung ermittelt. Nach Berechnung und Eingabe der technischen Daten, wurde mit den aus dem MERRA übertragenen Angaben, die in Elektrizität umgewandelte Windleistung für jeden Zeitschritt bestimmt. Außerdem hat das Programm die Minima, Mittelwert, Maxima und Summen der Zeitreihe ermittelt. Anschließend berechnet das Programm für jeden Zeitschritt das Verhältnis der Windenergieanlagenleistung zum Mittelwert. Damit erkennt man für jede Stunde des Analysezeitraums, wie die Leistungsabgabe in Bezug auf die Durchschnittsleistung ausfällt. Die daraus berechnete Windleistung kann durch ein animierbares Diagramm für den gesamten Untersuchungszeitraum veranschaulicht werden.

3.3.2 Solarleistung

Auf einem weiteren Register wurden die Solarleistungen ermittelt. Zuerst wurden die Parameter, die für die Berechnung notwendig sind, eingetragen. Für die Ortslage wurden die Breiten- und Längengrade analog zum MERRA Raster übernommen. Des Weiteren benötigt man die Ausrichtung der Kollektorfläche und die Moduleigenschaften. Bei der Ausrichtung der Kollektorfläche wurde zunächst die Richtung, die die Himmelsrichtung in die Modulfläche zeigt und die Neigung, mit der die Modulfläche zur Horizontalen geneigt ist, in Grad angegeben. Für die Moduleigenschaften wurden der Wirkungsgrad und die maximale flächenspezifische Leistungsabgabe angegeben. Diese Werte sind entsprechend den vorgesehenen Solarmodulen anzugeben. Aus diesem Parameter und den aus MERRA übertragenen Daten, wie Bodenrückstrahlung, Globalstrahlung auf die horizontale Ebene und Globalstrahlung auf die nachgeführte, senkrecht zum Strahlengang ausgerichtete Ebene, wurden in einen direkten, einen diffusen und einen reflektierten Strahlungsanteil umgerechnet. Aus diesen wiederum wird die Strahlung auf die geneigte Ebene bestimmt. Die abgegebene elektrische Leistung ergibt sich aus der Multiplikation mit dem angegebenen Umwandlungswirkungsgrad und über eine eventuelle Abregelung auf die flächenspezifisch angegebene Maximalleistung. Nach den Berechnungen wurde letztendlich die Solarleistung und wie sich der Mittelwert die zum Zeitschritt anstehende Solarleistung zum Mittelwert des gesamten Analysezeitraums verhält ermittelt. Die daraus berechnete Solarleistung kann analog zur Windleistung durch ein animierbares Diagramm ebenfalls für den gesamten Untersuchungszeitraum abgebildet werden.

4 Optimierung der Wind- und Photovoltaiksysteme

Damit die Stadt Forchheim regenerativ aus Wind- und Photovoltaikanlagen versorgt werden kann, muss die erzeugte Leistung dem Verbrauch von 30.418 Einwohnern der Stadt Forchheim angepasst werden. Der jährliche durchschnittliche Verbrauch von Forchheim beträgt 22,5 MW, dazu kommt eine Erzeugungsreserve von 10% und in Summe auf einen jährlichen durchschnittlichen Verbrauch von ca. 25 MW. Um diesen Verbrauch gewährleisten zu können müssen die Wind- und Photovoltaikanlagen optimiert werden. In den folgenden Kapiteln wurden zwei unterschiedliche Windanlagen mit dem Energieversorgungsanalyse Excel-Tool berechnet und verglichen. Die Photovoltaikanlage wurde ebenfalls mit dem Excel-Tool auf verschiedene Ausrichtungen berechnet und verglichen. Daraus ergibt sich dann ein optimaler Energiemix für Forchheim.

4.1 Arten und Ausrichtungen von Windkraftanlagen

Es gibt viele verschiedene Arten von Windrädern, die nicht alle für Forchheim geeignet sind. Aus diesem Grund wurden zwei Windkrafträder auf ihre technischen Daten untersucht, wie zum Beispiel auf die Nabenhöhe, da für Forchheim eine Nabenhöhe von 160m ausgewählt wurde. Die zwei ausgewählten Windkraftanlagen unterscheiden sich hauptsächlich durch ihre Auslegung für Windstarke- oder Windschwache Gebiete. Dafür wurden zwei moderne Windkraftanlagen der Marke Nordex verglichen. Für Starkwindanlagen wurde die N100/3300 und für Schwachwindanlagen die N131/3300 ausgewählt. In der Abbildung 4 sind die technischen Daten dieser zwei Anlagen aufgeführt.

	N100/3300	N131/3300
Betriebsdaten		
Nennleistung	3.300 kW	3.300 kW
Einschaltwindgeschwindigkeit	3,5 m/s	3 m/s
Abschaltwindgeschwindigkeit	25 m/s	20 m/s
Rotor		
Rotordurchmesser	99,8 m	131,0 m
Überstrichene Fläche	7.823 m²	13.478 m²
Betriebsdrehzahlbereich	9,0–16,1 U/min	6,8–12,4 U/min
Nenndrehzahl	14,3 U/min	10,9 U/min
Blattspitzengeschwindigkeit	75 m/s	74,8 m/s
Drehzahlregelung	variabel durch Mikroprozessor	variabel durch Mikroprozessor
Leistungsbegrenzung	Pitch	Pitch
Getriebe		
Bauart	3-stufiges Getriebe (Planeten-Planeten-Stirnrad)	3-stufiges Getriebe (Planeten-Planeten-Stirnrad)
Generator		
Bauart	doppelt gespeister Asynchrongenerator	doppelt gespeister Asynchrongenerator
Kühlsystem	Flüssigkeits-/Luftkühlung	Flüssigkeits-/Luftkühlung
Spannung	660 V	660 V
Netzfrequenz	50/60 Hz	50 Hz
Bremssystem		
Hauptbremse	Aerodynamische Bremse (Pitch)	Aerodynamische Bremse (Pitch)
Haltebremse	Scheibenbremse	Scheibenbremse
Blitzschutz	konform mit IEC 61400-24	konform mit IEC 61400-24
Turm		
Bauart	Stahlrohrturm	Hybridturm
Nabenhöhe/Zertifikate	75 m/IEC 1a, DIBt 3 85 m/IEC 1a, 100 m/IEC 1a, DIBt 3	134 m/DIBt S 164 m/DIBt S

Abb. 4: Technische Daten Nordex N100/3300 und N131/3300 (online)

Die N100/3300 und N131/3300 für stark- und schwach-Wind haben dieselbe Nennleistung von 3,3 MW, jedoch unterscheiden sie sich durch ihre Rotordurchmesser, Bauart und Nabenhöhe. Starkwindanlagen werden in Gebiete mit rauem Klima gebaut und gehören zu dem IEC Windklassentyp 1 mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 10 m/s. Außerdem kann die N100/3300 auf eine Nabenhöhe von maximal 100m gebaut werden, da Stahlrohrtürme auf eine maximale Nabenhöhe von 120 m ausgelegt werden können. Aus diesen Gründen ist die Starkwindanlage für Forchheim nicht geeignet. Die leistungsstarke N131/3300 Schwachwindanlage gehört zu dem IEC Windklassentyp 4 mit einer durchschnittlichen Windgeschwindigkeit von 6 m/s. Der Hybridturm kann auf eine maximale Höhe von

164 m gebaut werden und ist somit für Forchheim besser geeignet. Ein weiterer Vorteil für die Schwachwindanlage ist, dass sie trotz ihrer hohen Nennleistung einen geringen Schallemissionswert von maximal 104,5 Dezibel haben. Der Schallemissionswert ist entscheidend dafür, ob eine Windkraftanlage gebaut werden darf oder nicht.

Die Windkraftanlage muss gegen den Wind ausgerichtet und nachgeführt werden. Die Windrichtungsnachführung erfolgt bei modernen Anlagen durch Stellmotoren. Es wird über Sensoren die Windrichtung ermittelt und mit den elektrischen Stellmotoren nachgeführt. Damit die Anlage nicht mit Schwingungen behaftet ist, werden die Stellmotoren gegeneinander verspannt oder mit einer Bremse über das gesamte Lager festgesetzt. Die ausgewählten Windkraftanlagen werden automatisch gegen den Wind ausgerichtet und nachgeführt.

4.2 Arten und Ausrichtungen von Photovoltaikanlagen

Die direkten Sonneneinstrahlungen können auf verschiedene Arten der Solarenergie-Erzeugung genutzt werden. Die direkten Sonnenstrahlungen können durch Solarthermie für Warmwasserbereitung und durch Photovoltaik für Stromerzeugung aktiv genutzt werden. Die Solarthermie Anlagen werden in der Regel auf freie Dachflächen installiert, wobei die Dachflächen auch für Photovoltaikanlagen genutzt werden. Eine weitere Anlagenform ist die Freiflächenanlage. Dabei werden die Solarmodule auf eine freie Fläche hintereinander in Reihe aufgestellt. Oft konkurrieren die Betreiber von Photovoltaikanlagen auf landwirtschaftlich freien Flächen mit den Ackerbauern. Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) beschäftigt sich zurzeit mit einem Forschungsprojekt, das dieses Problem lösen kann. Das Projekt befasst sich mit einer sogenannten Agrophotovoltaik-Anlage, die in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Anlage befindet sich 5 m über einem Ackerbau und ist auf Stahlträgern montiert. Da sich die Solarmodule 5m über dem Boden befinden, ist ausreichend Platzt für Traktoren und Ernte Maschinen vorhanden und die Fläche kann weiterhin landwirtschaftlich und für Stromerzeugung genutzt werden.

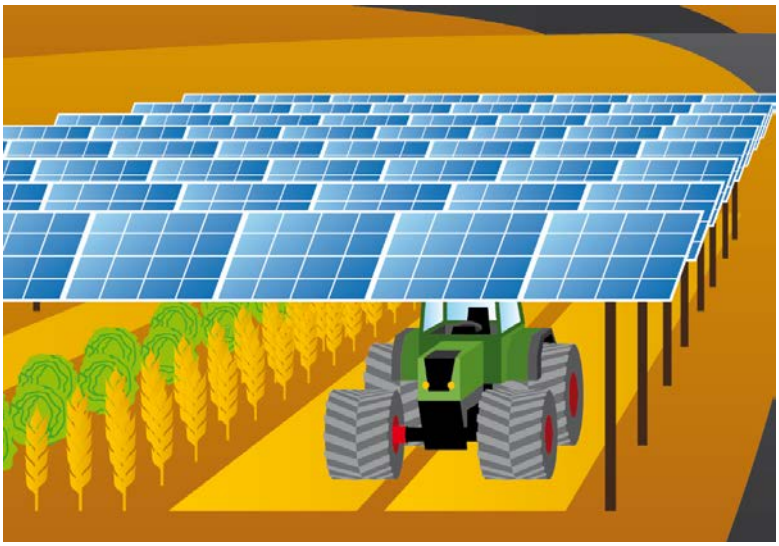

Abb. 5: Konzept einer Agrophotovoltaik-Anlage (Fraunhofer-ISE online)

Ein Pilotprojekt der Agrophotovoltaik-Anlage gibt es bereits seit März 2015 in der Region Bodensee Oberschwaben und es wird bis Herbst 2017 untersucht, wie gut die Pflanzen unter der Anlage wachsen und wie viel Ertrag sie bringen. In Zukunft könnte diese Idee auch in Forchheim gebaut werden, da es in Forchheim viele landwirtschaftliche Flächen gibt.

Es wird davon ausgegangen, dass die Photovoltaikanlagen zum Teil auf Dachflächen und zum Teil auf Freiflächen installiert werden. Dabei ist die Ausrichtung und Neigung der Kollektorflächen ein wichtiger Bestandteil für die optimale Ausbeutung der direkten Sonneneinstrahlungen. Zunächst wird angenommen, dass die Gebäude mit geneigten Dächern eine Neigung von 35 ° besitzen und bei Gebäuden mit einem Flachdach die Solarmodule ebenfalls mit Hilfe einer Unterkonstruktion um 35 ° geneigt installiert werden. Zu den Gebäuden gehören auch vorhandene Dächer der Gewerbe- und Industriebetriebe. Außerdem soll die Ausrichtung der Gebäude gleich verteilt sein. Das bedeutet, dass es genauso viele Häuser im Westen, Osten und Süden der Stadt gibt. Aus dem Energienutzungsplan für die Stadt Forchheim ergibt sich eine nutzbare Modulfläche von rund 408.000 m². Davon wäre die eine Hälfte für Solarthermie und die andere Hälfte für Photovoltaik installierbar. Dies entspricht rund195.000 m² freie nutzbare Dachfläche für Photovoltaikanlagen. Für Freiflächenphotovoltaikanlagen in Forchheim hat sich eine Gebietsfläche von rund 288.000 m² entlang von Bahnlinien und Autobahnen ergeben. Ob diese Freifläche komplett genutzt und wie viel auf den Dachflächen installiert werden kann, ergibt sich in dem nächsten Kapitel durch Berechnungen.

4.3 Benötigte Leistung und Anzahl an Windrädern und Solarmodulen

Um den jährlichen durchschnittlichen Verbrauch von 22,5 MW von Forchheim abzudecken, wurde ein optimaler Mix aus Wind- und Photovoltaikanlagen berechnet. Dazu kommt ein Erzeugungsreserveanteil von 10% und somit ergibt sich dann ein jährlicher durchschnittlicher Verbrauch von 25 MW. Die Windkraftanlagen sollen 80% und die Photovoltaikanlagen 20% des Verbrauchs gewährleisten. Daraus ergibt sich eine Leistungsabgabe für Windkraftanlagen von 20 MW und für die Photovoltaikanlagen von 5 MW.

4.3.1 Windkraftanlagen

Die zwei ausgewählten Windkraftanlagen von Nordex für Schwachwind N131/3300 und Starkwind N100/3300 haben dieselbe Nennleistung von 3,3 MW und unterscheiden sich dennoch durch ihre Leistungskurve und Anlagenkennlinie. Die Leistungskurve einer Windkraftanlage zeigt an, wie hoch die abgegebene elektrische Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit ist. Die Anlagenkennlinie ergibt sich aus dem Leistungsbeiwert cp in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Der Leistungsbeiwert beschreibt die Effizienz einer Windkraftanlage und ist das Verhältnis zwischen der Primärenergie und der produzierten Endenergie. In Abbildung 6 und 7 ist die Leistungskurve und Anlagenkennlinie des Nordex N131/3300 und N100/3300 abgebildet.

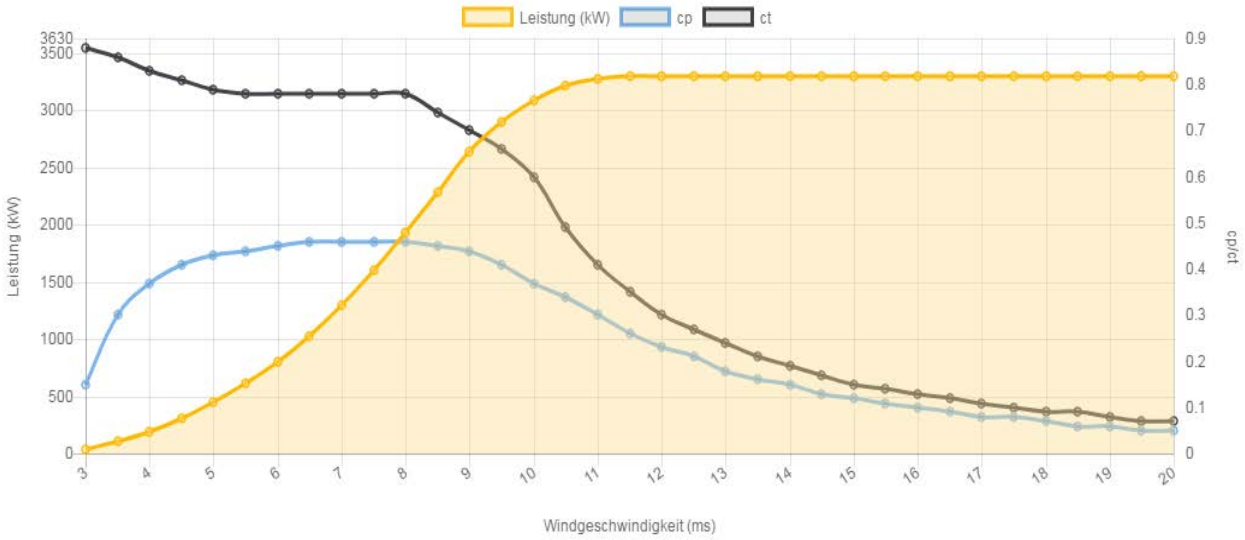

Abb. 6: Leistungskurve und Anlagenkennlinie Nordex N131/3300 (online)

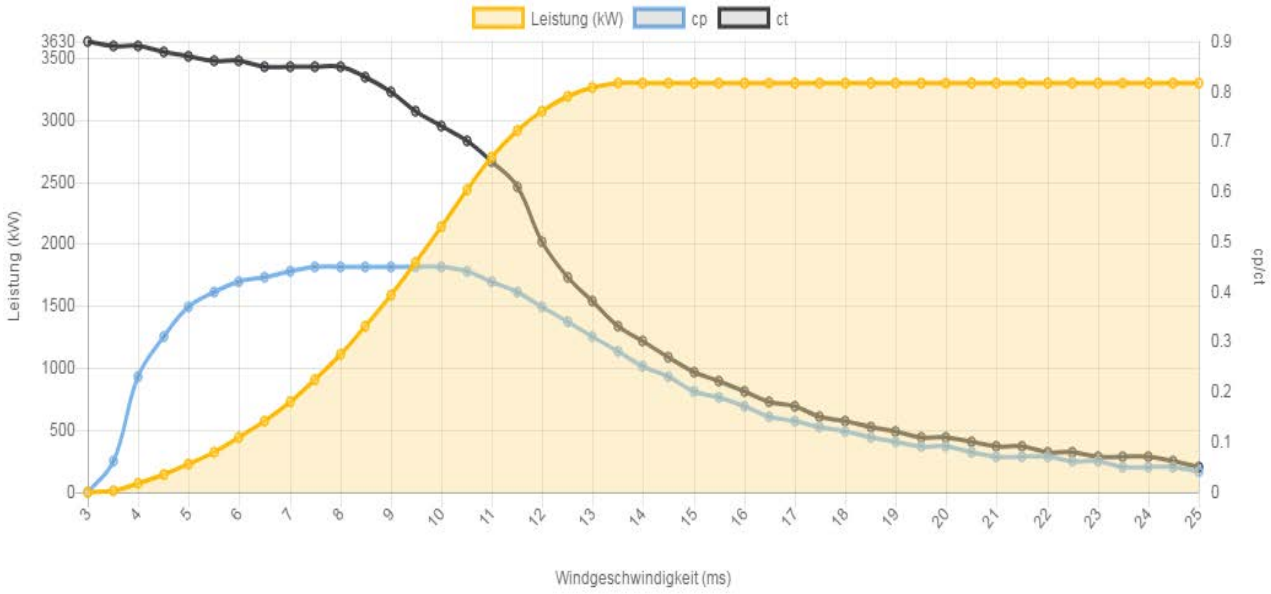

Abb. 7: Leistungskurve und Anlagenkennlinie Nordex N100/3300 (online)

Wenn man die beiden Leistungskurven vergleicht, erkennt man, trotz derselben Nennleistung, dass die Leistungskurve der Schwachwindanlage bei geringerer Windgeschwindigkeit höhere Leistung erzeugt als die Starkwindanlage. Dasselbe erkennt man bei der Anlagenkennlinie. Die Schwachwindanlage hat bei geringerer Windgeschwindigkeit einen höheren Leistungsbeiwert als bei der Starkwindanlage. Der optimale Betriebspunkt, da wo sich die Leistungskurve sich mit der Anlagenkennlinie schneidet, liegt bei beiden Windkraftanlagen bei erzeugter Leistung von ca. 1,8 MW. In Forchheim kann mit diesen Anlagen der optimale Betriebspunkt nicht erreicht werden, da die durchschnittliche mittlere Windgeschwindigkeit bei 6,0 –

6,5 m/s liegt. Die Schwachwindanlage erzeugt bei diesen Windgeschwindigkeiten höhere Leistungen als die Starkwindanlage und ist daher für Forchheim besser geeignet.

Mit den davor ermittelten Werten aus MERRA und dem Versorgungsanalyse Excel-Tool, wurde aus dem Maximum-Wert von 270,74 % die tatsächliche Windleistung in Bezug auf die mittlere Durchschnittsleistung und der Benutzungsgrad der Windkraftanlage N131/3300 berechnet. Es ergab sich ein Benutzungsgrad der Anlage von 37 %. Dieser Wert wurde mit der Nennleistung der Anlage von 3,3 MW multipliziert. Dadurch hat sich eine durchschnittliche jährliche erzeugte Leistung für eine Windkraftanlage von 1,22 MW ergeben. Da die Windkraftanlagen eine Leistung von 20 MW abgeben muss, um 80% des Verbrauches abzudecken, müssen mindestens 17 Windkrafträder gebaut werden die zusammen eine durchschnittliche jährliche Leistung von 20,74 MW erzeugen.

Die berechneten Windleistungen für den Zeitraum 1.01.2016 bis 31.12.2016, von der Windkraftanlage Nordex N131/3300, wurden in dem Energieversorgungsanalyse Excel-Tool durch ein animierbares Diagramm dargestellt. Das Diagramm zeigt die theoretisch maximale Windleistung PBetz, die eine ideale Windkraftanlage über 100 m Grund erzeugen kann und die tatsächlich abgegebene Windleistung PWEA der Windkraftanlage Nordex 131/3300. Außerdem werden in dem Diagramm die gemittelten Windleistungen des gesamten Zeitraums von PBetz und PWEA dargestellt.

In den folgenden Abbildungen 8, 9, 10 wurden die spezifische Windleistungen für den Zeitraum Februar, Juni und Oktober abgebildet.

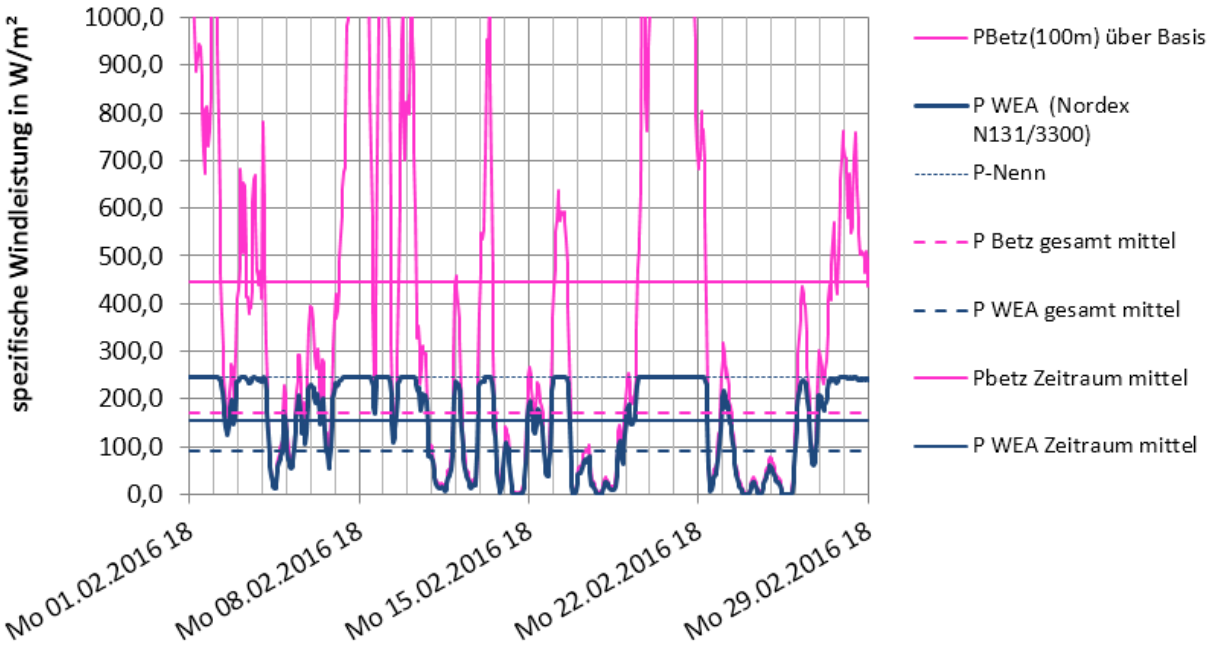

Abb. 8: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum Februar

In der Abbildung 8 erkennt man, dass der Zeitraum Februar ein ertragreicher Monat war. Die Windkraftanlage N131/3300 erzeugte in diesen Zeitraum eine mittlere spezifische Windleistung von 154,69 W/m². Mit einer idealen Windkraftanlage könnte man in diesem Zeitraum theoretisch eine mittlere spezifische Windleistung von 445,92 W/m² erzeugen. Zudem war der Zeitraum Februar der stärkste Monat.

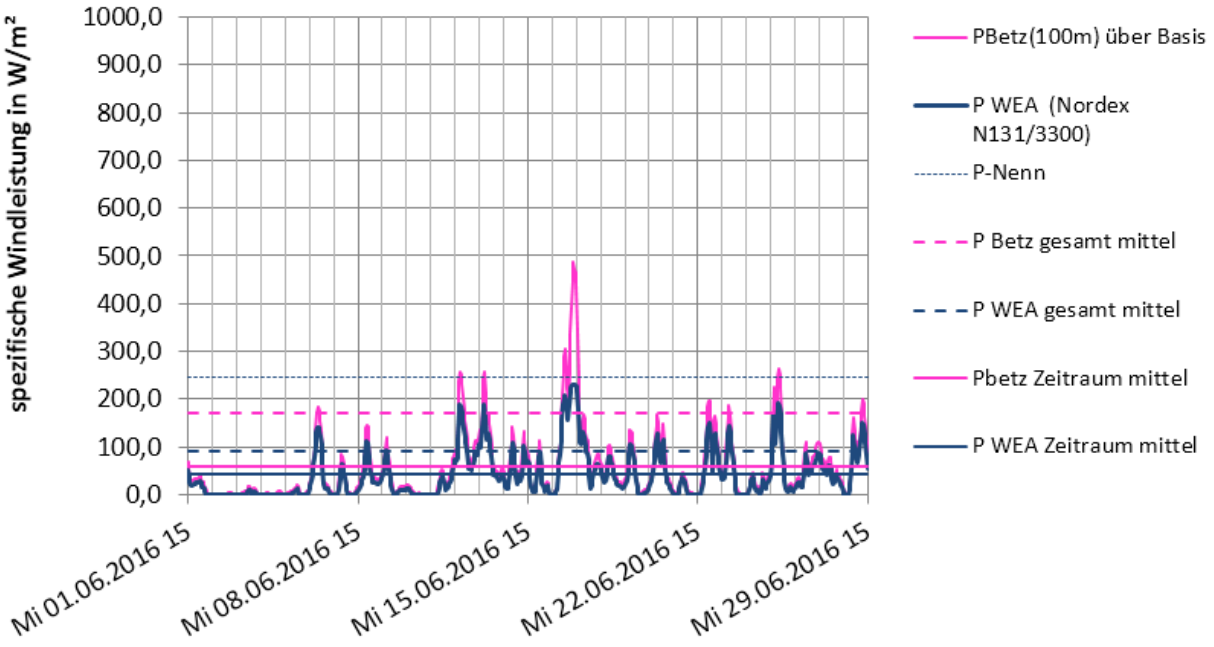

Abb. 9: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum Juni

Im Vergleich war der Zeitraum Juni kein ertragsreicher Monat, sondern, im Gegenteil, der schwächste Zeitraum, wie man in Abbildung 9 erkennen kann. Der Grund dafür ist, dass im Sommer die Windgeschwindigkeiten niedriger sind als im Winter. Es wurde eine mittlere spezifische Windleistung von 41,51 W/m² aufgezeichnet. Die theoretisch erzeugbare spezifische Windleistung war 57,87 W/m² und ist im Vergleich zu Februar ebenfalls sehr gering.

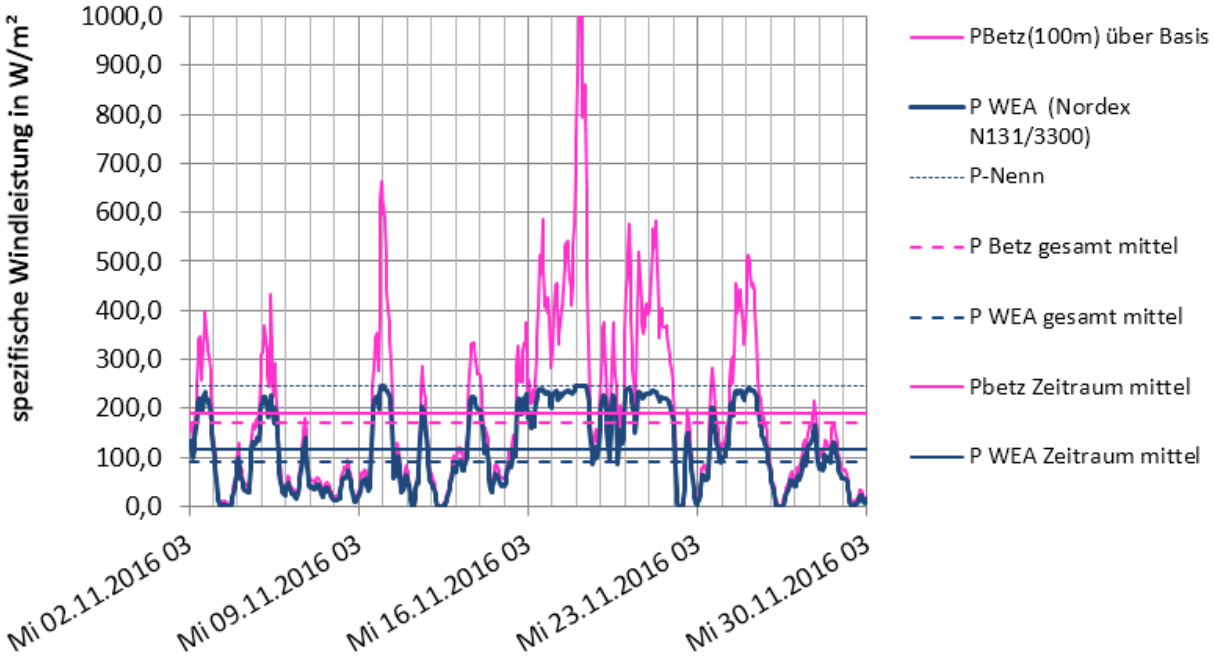

Abb. 10: Spezifische Windleistungen für den Zeitraum November

Ende Herbst, Anfang Winter nehmen die spezifischen Windleistungen wieder zu, wie man in Abbildung 10 erkennen kann. In der Tabelle 1 sind die mittlere spezifischen theoretisch möglichen und tatsächlich abgegebenen Windleistungen für den gesamten Zeitraum dargestellt.

Zeitraum	PBetz mittel [W/m²]	PWEA mittel [W/m²]
Januar	262,71	132,21
Februar	445,92	154,69
März	160,11	95,25
April	119,13	79,62
Mai	175,67	109,43
Juni	57,87	41,51
Juli	71,86	52,33
August	81,73	58,04
September	88,78	65,70
Oktober	110,22	72,88
November	192,19	115,96
Dezember	209,87	102,11

Tab. 1: Theoretisch mögliche und tatsächlich abgegebene mittlere spezifische Windleistungen für die unterschiedlichen Monate

Aus Tabelle 1 erhält man für den gesamten Zeitraum eine theoretisch mögliche mittlere spezifische Windleistung von 169,27 W/m² und eine tatsächlich abgegebene mittlere spezifische Windleistung von 90,43 W/m². Das Maximum von PBetz und PWEA war im Februar und der Minimale im Juni.

4.3.2 Photovoltaikanlagen auf Dach- und Freifläche

Die Photovoltaikanlagen haben einen Wirkungsgrad von 15 % und eine maximale Leistung von 110 W/m². Die Kollektorflächen werden mit einer Neigung von 35 ° ausgerichtet. Außerdem wurde ein optimaler Mix der Photovoltaikanlagen in Bezug auf die Ausrichtung ermittelt. Dabei wurden 20 % nach Westen, 30% nach Osten und 50 % nach Süden ausgerichtet. Aus diesem optimalen Mix, hat sich aus den MERRA Daten und dem Versorgungsanalyse Excel-Tool ein Benutzungsgrad von 18 % ergeben. Der Benutzungsgrad wird mit der maximalen Leistung der Photovoltaikanlage von 110 W/m² multipliziert. Dadurch ergibt sich in Summe eine jährliche durchschnittliche erzeugte Leistung von 19,78 W/m².

Die Photovoltaikanlagen werden auf Dach- und Freiflächen installiert. Für die Gebietsfläche von 288.000 m² hat sich aus dem Energienutzungsplan für Forchheim eine nutzbare Freifläche von 161.000 m² ergeben. Davon wären im Norden 90.000 m², in der Mitte 52.000 m² und im Süden 19.000 m² zur Verfügung. Diese Nutzbare Freifläche wurde mit der jährlichen durchschnittlichen Leistung von 19,78 W/m²

multipliziert. Daraus folgt für die Freiflächenphotovoltaikanlage eine jährliche durchschnittliche erzeugte Leistung von 3,2 MW. Die Photovoltaikanlagen müssen insgesamt mindestens 5 MW Leistung erzeugen. Das bedeutet, dass die installierten Photovoltaikanlagen auf der Dachfläche knapp 2 MW erzeugen müssen. Von der nutzbaren Dachfläche von rund 195.000 m² werden 95.000 m², also weniger als die Hälfte, benötigt**,** um auf die benötigte Leistung zu kommen. Durch Multiplikation mit der jährlichen durchschnittlich erzeugten Leistung von 19,78 W/m² hat sich eine jährliche durchschnittlich erzeugte Leistung von 1,9 MW ergeben. Damit kommen die Photovoltaikanlagen auf Dach- und Freifläche auf eine jährliche durchschnittlich erzeugte Gesamtleistung von 5,1 MW.

Analog zu den Windleistungen, wurden die ermittelten Solarleistungen für den Zeitraum 1.01.2016 bis 31.12.2016 in dem Energieversorgungsanalyse Excel-Tool durch ein animierbares Diagramm dargestellt. Das Diagramm zeigt zudem die maximale Solarleistung und die mittlere spezifische Solarleistung für jeden Zeitraum. In den folgenden Abbildungen 11, 12, 13 wurden die spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Juli, Dezember und Februar abgebildet.

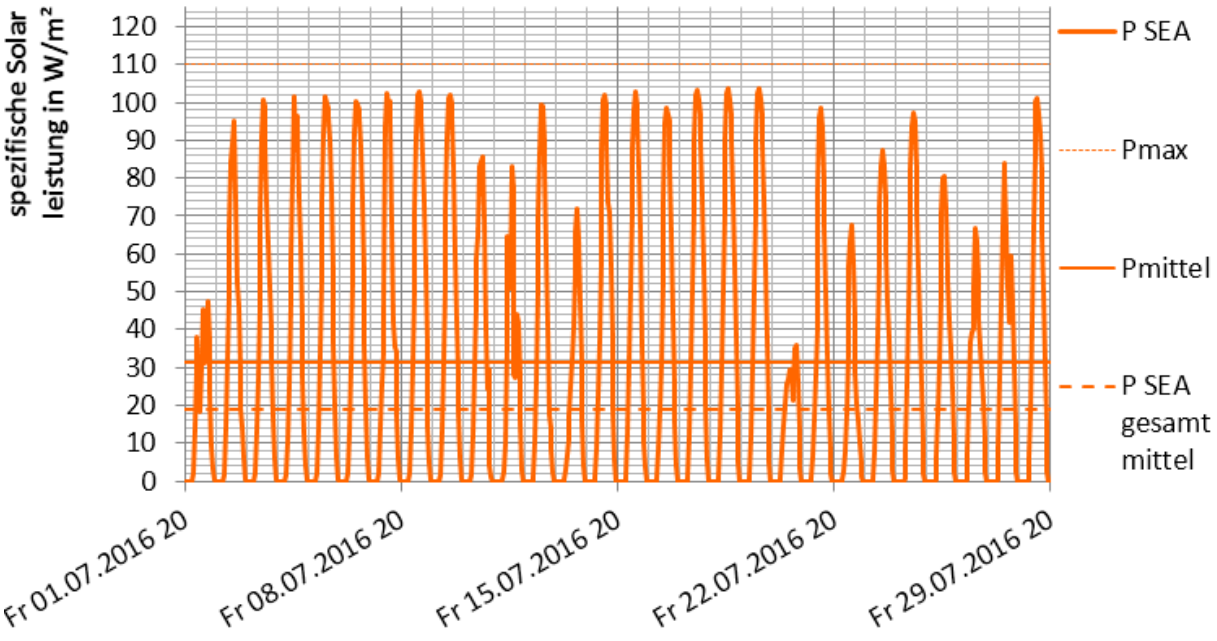

Abb. 11: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Juli

Wie man in der Abbildung 11 erkennen kann, wurden im Juli hohe spezifische Solarleistungen erzeugt. Die Photovoltaikanlagen haben eine mittlere spezifische Solarleistung von 32 W/m² für den Zeitraum Juli abgegeben. Zudem war Juli der ertragreichste Monat im Jahr 2016.

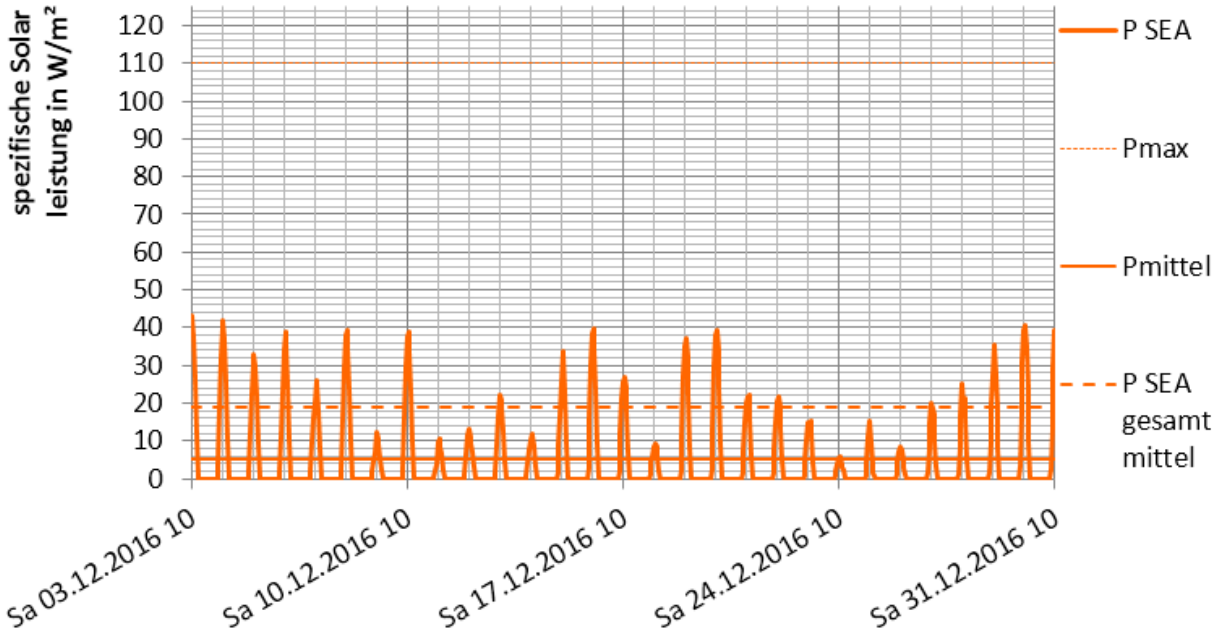

Abb. 12: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Dezember

Im Vergleich war der Winter kein ertragreicher Monat für die Photovoltaikanlagen. Der Dezember war der schwächste Zeitraum**,** wie man in Abbildung 12 erkennen kann. Der Grund dafür ist, dass im Winter die Globalstrahlungsdaten niedriger sind als im Sommer. Es wurde eine mittlere spezifische Solarleistung von 5 W/m² erzeugt.

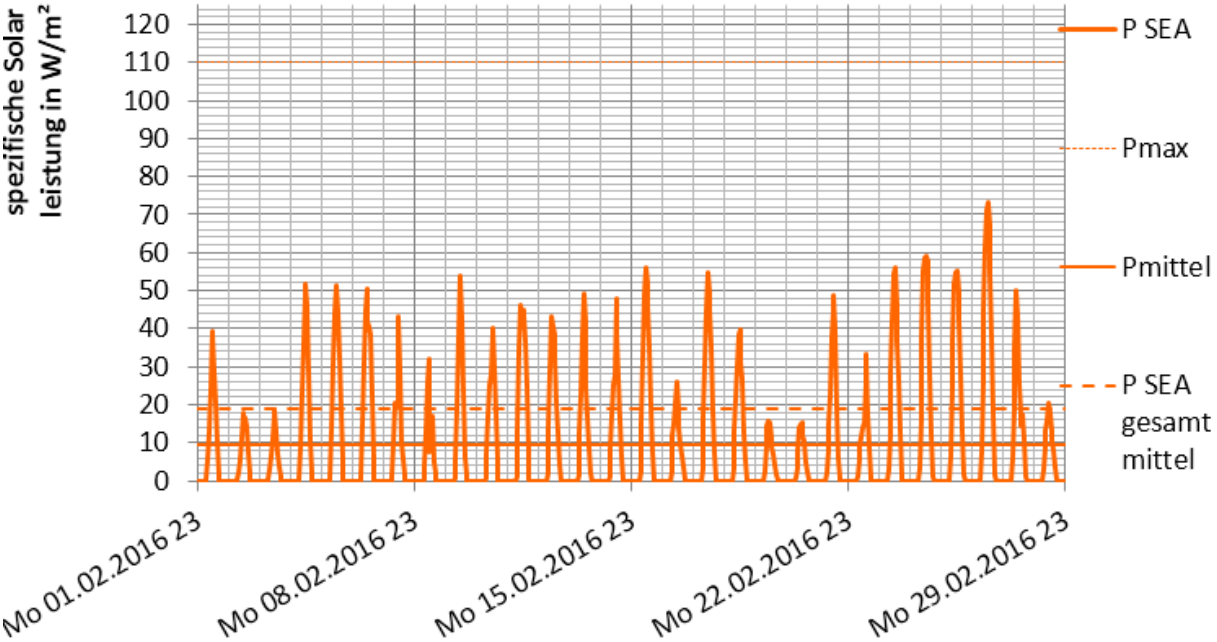

Abb. 13: Spezifische Solarleistungen für den Zeitraum Februar

Ende Winter, Anfang Frühling nehmen die spezifischen Solarleistungen wieder zu, wie man in Abbildung 13 erkennen kann. In der Tabelle 2 sind die mittleren spezifischen Solarleistungen für den gesamten Zeitraum dargestellt.

Zeitraum	**PSAE mittel [W/m²]**
Januar	5,12
Februar	9,59
März	18,00
April	24,50
Mai	29,82
Juni	29,36
Juli	31,55
August	31,04
September	23,23
Oktober	12,81
November	6,83
Dezember	5,11

Tab. 2: Abgegeben mittlere spezifische Solarleistung für die unterschiedlichen Monate

Aus Tabelle 2 erhält man für den gesamten Zeitraum eine mittlere spezifische Solarleistung von 18,91 W/m². Die maximale mittlere spezifische Solarleistung war im Juli und die Minimale im Dezember.

5 Fazit

In dieser Projektarbeit sollten die Wind- und Globalstrahlungsdaten für das Versorgungsgebiet Forchheim analysiert und ein geeignetes Wind- und Photovoltaiksystem optimiert werden. Die am Anfang aufgestellten Forschungsfragen wurden in dieser Projektarbeit ausführlich durch erarbeitet und haben zu folgenden Ergebnissen geführt. Für die optimale Nabenhöhe hat sich aufgrund der ermittelten Winddaten eine Höhe von 160 m ergeben. Für Forchheim wurden unterschiedliche Windkraftanlagen, die heutzutage am Markt angeboten werden, verglichen. Letztendlich wurde sich für die Schwachwindanlage Nordex N131/3300, mit einer Nennleistung von 3,3 MW, entschieden. Die Photovoltaikanlagen haben einen Wirkungsgrad von 15 % und eine maximale Leistung von 110 W/m². Die Kollektorflächen werden mit einer Neigung von 35 ° ausgerichtet. Außerdem wurde ein optimaler Mix, in Bezug auf die Ausrichtungen**,** ermittelt. Dabei wurden 20 % nach Westen, 30% nach Osten und 50 % nach Süden ausgerichtet um die Globalstrahlung optimal zu nutzen. Durch Berechnungen hat sich für eine Windkraftanlage eine jährliche durchschnittlich erzeugte Leistung von 1,22 MW ergeben. Um 80% des Verbrauches abzudecken, müssen mindestens 17 Windkrafträder gebaut werden, die zusammen eine jährliche durchschnittliche Leistung von 20,74 MW erzeugen. Für die Freiflächenanlage hat sich eine jährliche durchschnittlich erzeugte Leistung von 3,2 MW und für die Dachanlagen 1,9 MW ergeben. Damit kommen die Photovoltaikanlagen auf eine jährliche durchschnittlich erzeugte Gesamtleistung von 5,1 MW. In Summe ergibt sich für die Wind- und Photovoltaikanlagen eine Gesamtleistung mit Erzeugungsreserveanteil von 25,84 MW und kann somit den jährlichen durchschnittlichen Verbrauch von Forchheim abdecken.

6 Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2017), Erneuerbare Energien, [online] https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html [19.04.2017].

Ohm E-Learning Portal, Projekt Energietechnik 17, MERRA-2 Wind und Solardatenabruf PDF-Datei, [online] https://elearning.ohmportal.de/course/view.php?id=3429#section-2 [19.04.2017].

Ohm E-Learning Portal, Projekt Energietechnik 17, Energieversorgungsanalyse PDF-Datei, [online] https://elearning.ohmportal.de/course/view.php?id=3429#section-2 [19.04.2017].

Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp, Regenerative Stromversorgung, [online] http://poppware.de/Regenerative_Stromversorgung/Index.htm [19.04.2017].

Wikipedia, Windkraftanlage (2017), [online] https://de.wikipedia.org/wiki/Windkraftanlage [25.04.2017].

Nordex N131/3300, [online] http://www.nordex-online.com/de/produkte-service/windenergieanlagen/n131-33-mw.html [06.06.2017].

Nordex Delta Broschüre, [online] http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/Nordex_Delta_Broschuere_de.pdf [06.06.2017].

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, Konzept einer Agrophotovoltaik-Anlage (online) https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2015/agrophotovoltaik-nachhaltige-landnutzung-fuer-energie-und-nahrung.html [14.06.2017].

Integrierter Energienutzungsplan für das gesamte Stadtgebiet Forchheim (2014), [online] https://www.forchheim.de/sites/default/files/Integrierter%20Energienutzungsplan%20f%C3%BCr%20das%20Stadtgebiet%20Forchheim.pdf [20.06.2017].