

Optimaler Mix aus regenerativen Energien der Metropolregion Nürnberg 2050

EMNGoesReg

Analyse des besten Stromversorgungsmix der Metropolregion Nürnberg mit
100 % aus regenerativer Stromversorgung im Hinblick auf das Klimaziel 2050

Projekt Energietechnik

Bachelor of Engineering

Maschinenbau

Verfasser: Ochsenkiel, Julian

Matrikel.-Nr.: 2864727

Adresse: Berghofstraße 9, 91522 Ansbach

E-Mail: ochsenkielju65196@th-nuernberg.de

Mobil: +49 151 46409072

Gegengelesen von: Kevin Gerstberger

Ort, Datum und Unterschrift des Verfassers:

Ansbach, den 28.06.2018

Abstract

Das Projekt verläuft im Rahmen des Seminars „Projekt Energietechnik“ des sechsten Semesters Maschinenbau an der Technischen Hochschule Nürnberg. Ziel des Projekts ist es, eine Konzeptstudie zu erstellen, bei der das Stromversorgungsnetz der Europäischen Metropolregion Nürnberg (EMN) bis 2050 hundertprozentig regenerativ versorgt werden kann. Bei einer vollkommenen regenerativen Energieversorgung entsteht das Problem von Eigendefiziten aufgrund volatiler Wettererscheinungen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird in dieser Projektarbeit der optimale Mix aus Laufwasser, Biomasse, Sonnen- und Windkraft untersucht, um die Metropolregion bis 2050 komplett aus regenerativen Energien versorgen zu können. Die entstehenden Defizite sollen mit Hilfe von geotechnischen Speichern ausgeglichen werden. Für die Auswertungen werden die Informationen der Klimadatenbank der NASA herangezogen, um das Jahr mit den ungünstigsten Wetterbedingungen seit Beginn dieser Wetteraufzeichnungen herauszufiltern. Hierbei wird vor allem auf das Wind- und Sonnenpotential eingegangen, da Laufwasser und Biomasse in dieser Region weitestgehend ausgeschöpft sind. Die ausgewerteten Daten zeigen, dass im Jahr 2014 der ungünstigste Mix aus Solar- und Windenergie vorlag. Anhand der Auswertung wurde eine Zusammenstellung der erneuerbaren Energien in Bezug auf den Stromverbrauch von 2017, eine Verteilung von ca. 75 Prozent Windenergie, ca. 32 Prozent Solarenergie und insgesamt 13 Prozent aus Biomasse- und Wasserkraftenergie erstellt. Hieraus muss mindestens ein Überschuss von 20 Prozent entstehen, da das Übertragen der Energie sowie das Zwischenspeichern immer mit Verlusten verbunden sind. Anhand dieser Daten ergibt sich unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades der Speicher, eine jährlich zu kompensierende Energiemenge von 6,8 TWh. Hierbei muss ein maximales zeitliches Defizit von 165 Stunden überbrückt werden um der EMN zuverlässig Strom liefern zu können. Alle regenerativen Energieträger ergeben eine insgesamt zur Verfügung gestellte elektrische Leistung von 9,9 TWh. Der daraus entstehende Stromüberschuss von 3,1 TWh kann abgeregelt oder in andere Regionen verkauft werden.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	1
2 Projektbeschreibung und Ziele	2
3 Datengrundlage.....	4
3.1 Datenbeschaffung	4
3.2 Datenaufbereitung.....	6
4 Auswertung und Ergebnisse	6
4.1 Ermittlung des Jahres mit den ungünstigsten Wetterverhältnissen.....	6
4.2 Bestimmung der optimalen Einspeisung aus den vier Energieträgern	8
4.2.1 Windleistung.....	8
4.2.2 Solarleistung.....	11
4.2.3 Laufwasser- und Biomasseleistung	12
4.2.5 Optimaler Mix	15
4.3 Residualleistungsanalyse.....	18
4.3.1 Ermittlung des größten Defizits	19
4.3.2 Ermittlung der längsten Defizitperiode	20
4.3.3 Benötigte elektrische Leistung zum Ausgleich der Defizite	20
4.4 Speicherwahl und Dimensionierung	22
4.4.1 Festlegung der Speicherart.....	22
4.4.2 Dimensionierung der Speicher.....	23
5 Fazit.....	25
Literaturverzeichnis	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Metropolregion Nürnberg in Raster	5
Abbildung 2: Durchschnittliche spez. Leistung der letzten 38 Jahre	7
Abbildung 3: Leistungsbeiwerte Windkraftanlagen.....	9
Abbildung 4: Leistungsdaten ENERCON E-115.....	9
Abbildung 5: Windleistungsverlauf Januar.....	10
Abbildung 6: Windleistungsverlauf Juli	10
Abbildung 7: Solarleistungsverlauf Januar	12
Abbildung 8: Solarleistungsverlauf Juli.....	12
Abbildung 9: Stromverbrauch 2017	13
Abbildung 10: Verbrauch EMN Januar	14
Abbildung 11: Verbrauch EMN Juli.....	14
Abbildung 12: Versorgungsverlauf Januar	17
Abbildung 13: Versorgungsverlauf Juli	17
Abbildung 14: Trendlinien Szenario 2050.....	18
Abbildung 15: Residuale Last Minima und Maxima.....	189
Abbildung 16: Versorgungsdauerlinien.....	21
Abbildung 17: Residuallastverlauf	23

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Jahre mit den besten und ungünstigsten Wetterbedingungen	8
Tabelle 2: Leistungsdaten Wind	10
Tabelle 3: Leistungsdaten Solaranlage	11
Tabelle 4: Leistungsdaten Sonne	11
Tabelle 5: Umwandlungsvermögen	16

Abkürzungsverzeichnis

EMN	Europäische Metropolregion Nürnberg
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
CO₂	Kohlenstoffdioxid
NASA	National Aeronautics and Space Administration
MERRA-2	Modern Era Retrospective analysis for Research and Application
P_{Betz}	Windleistung nach Betz
P_{WEA}	Windenergieanlagenleistung
WEA	Windenergieanlage
SEA	Solarenergieanlage
cp	Leistungsbeiwert
BG	Benutzungsgrad
MDN	Main-Donau-Netzgesellschaft
UV	Umwandlungsvermögen
UR	Umwandlungsreserve

1 Einleitung

Die Themen Energieversorgung und Umrüstung auf regenerative Energiequellen sind nicht nur ein deutschlandweites, sondern ein weltweites Thema. Um das Klima der Welt zu schützen, haben ca. 140 Staaten und Regionen politische Maßnahmen ergriffen, die den Ausbau für die regenerative Energieversorgung vorantreiben sollen. Europa hat sich das Ziel gesetzt, bis 2020 die Versorgung mit erneuerbaren Energien auf 20 Prozent zu erhöhen und gleichzeitig die Treibhausgasemissionen um 20 Prozent zu reduzieren. Bis 2030 sollen die Treibhausgasemissionen um mindestens 40 Prozent gegenüber 1990 gesenkt werden. Bis zum Jahr 2050 sollen die CO₂-Emissionen sogar um 80 bis 95 Prozent vermindert werden.

Seit der Einführung des Erneuerbare-Energie-Gesetzes (EEG) ist in Deutschland das Aufrüsten neuer, regenerativer Energieanlagen gesetzlich geregelt. Bis 2025 wurde das Ziel ausgerufen, 40-45 Prozent des Energieverbrauchs durch erneuerbare Energien abzudecken. Bis 2035 sollen es sogar 55-60 Prozent sein. Deshalb ist Deutschland eines der Länder, die weltweit am meisten auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien investieren und somit den Fortschritt vorantreiben.

Der Klimawandel ist schon heute in vielen Gebieten der Erde sehr stark spürbar. Aufgrund der zu hohen CO₂-Emissionen weltweit, wird die mittlere Temperatur der Erde immer weiter steigen. Schon allein der Anstieg von vier Grad Celsius hätte nicht nur für die Menschheit, sondern auch für Flora und Fauna erhebliche Folgen. Hierbei wäre vor allem das Abschmelzen des grönländischen Eispanzers, Artensterben im Regenwald, Hitzenöte und die daraus resultierenden Ernteauffälle in Afrika zu erwähnen.

Um diesem Problem entgegen zu wirken, muss der Anteil an erneuerbaren Energielieferanten enorm ansteigen. Obwohl die Auswirkungen des Klimawandels Deutschland nicht allzu sehr betreffen, sollten wir als Vorbild vorangehen. Hierzulande, müssen aufgrund des erheblichen CO₂-Ausstoßes, die Kohlekraftwerke heruntergefahren werden. Aufgrund des fehlenden Gefälles ist in der flachen Metropolregion auch keine effektive Wassernutzung zur Energieerzeugung möglich. Auch wenn die Windenergie in der EMN, wie auch im gesamten Freistaat Bayern, z.B. zu Küstenregionen, nicht optimal genutzt werden kann, liegt das größte Potential in dieser Region trotzdem hauptsächlich in Wind- und Solarenergie. Das Problem bei

diesen Energieformen ist jedoch das unregelmäßige Verhalten der Energieträger. Im Sommer ist das Windaufkommen tendenziell schlecht, da längere Ruhephasen mit wenig oder gar keinem Wind auftreten können und die Sonne im Winter nur eine geringe Stundenzahl zu Verfügung steht. Diese prekäre Situation führt zu hohen Energiedichten, die durch eine Abregelung und Steuerung gegen Überlastung des Stromnetzes gewährleistet werden muss. Bei Stromengpässen kann eine stabile und sichere Stromversorgung nicht garantiert werden.

Um diese Herausforderung meistern zu können, werden Energiespeicher eingesetzt, deren Aufgabe es ist, die Energie, die bei erhöhten Leistungen überschüssig ist, aufzunehmen und sie bei Energiebedarf wieder zuverlässig ins Netz zu speisen. Hierbei ist es wichtig, dass diese Speicher eine hohe Lebensdauer und eine sehr geringe Selbstentladung besitzen um den Energiebedarf anhaltend decken zu können.

2 Projektbeschreibung und Ziele

Das Gesamtprojekt befasst sich mit der Förderung der zentralen und dezentralen Energiewende. Ziel des Projekts ist es, die Europäische Metropolregion Nürnberg (EMN) komplett durch regenerative Energien versorgen zu können. Es soll aufgezeigt werden, ob diese sowohl technisch, als auch finanziell im Rahmen des Möglichen liegt. Die Metropolregion könnte so, mithilfe der Ergebnisse als Vorreiter des kompletten Umstiegs auf eine unabhängige und emissionsfreie Stromversorgung agieren und ein Vorbild für andere Regionen dem Ziel für 2050 vorangehen. Hierzu werden unterschiedliche Themen wie Solarthermie, Windkraft, E-Mobilität aber auch verschiedenste Speichertechnologien betrachtet.

Dieser Teil des Gesamtprojekts „Optimaler Mix aus regenerativen Energien der Europäischen Metropolregion Nürnberg 2050 – Analyse des besten Stromversorgungsmix der EMN mit 100 % aus regenerativer Stromversorgung im Hinblick auf das Klimaziel 2050“ beschäftigt sich mit der idealen Verteilung von regenerativen Energiequellen der Metropolregion. Hierbei soll der beste Mix aus Wind- und Solarenergie, aber auch Wasserkraft und Biomasse erarbeitet werden, um die Region bis 2050 zu 100 Prozent aus erneuerbaren Energien versorgen zu können. Dies soll auch das weitere Ziel, die Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 % im

Vergleich zu 1990 zu senken, unterstützen. Die Differenz aus dem prognostizierten Strombedarf von 2050 und des umwandelbaren Stroms soll mit regenerativen Speichersystemen gespeichert bzw. gedeckt werden.

Mit Hilfe der MERRA-2 Datenbanken werden die Daten der NASA ausgewertet um die Wind- und Sonnenverhältnisse der letzten 38 Jahre bestimmen zu können. Um den optimalen Mix der von Biomasse, Laufwasser, Solar- und Windenergie berechnen zu können, wurden die Verbraucherdaten der Metropolregion von der N-ERGIE und der Main-Donau-Netzgesellschaft benötigt.

Dabei werden die nun folgenden Forschungsfragen untersucht:

- 1) Was waren die ungünstigsten Wind- und Solarleistungen seit 1980?
- 2) Welchen Anteil an regenerativen Umwandlungsvermögen im Bezug auf das Jahr mit den schlechtesten Wetterverhältnissen sollten Wind-, Solarenergie, Laufwasser und Biomasse einnehmen, damit das Optimierungskriterium erreicht wird?
- 3) Wie hoch ist das größte Defizit von Einspeiseleistung der vier Energieträger zum prognostizierten Stromverbrauch 2050, wenn von einem Jahr mit den ungünstigsten Wetterverhältnissen ausgegangen wird?
- 4) Welche Eigenschaften muss der Energiespeicher eines regenerativen Versorgungssystems für das Jahr 2050 aufweisen um das Defizit zu überbrücken?

Das Hauptziel dieser Projektarbeit ist es, die perfekte Verteilung der Energiequellen in Bezug auf die ausgearbeiteten Kriterien zu finden. Hierbei geht es vor allem darum, die Metropolregion Nürnberg bis 2050 zu 100 Prozent aus regenerativen Energieträgern versorgen zu können. Da ein Mix, welcher nur aus regenerativen Energien besteht, nie zu einer vollständigen Übereinstimmung mit dem aktuellen Strombedarf führt, sollen die Überschüsse der gewonnenen Energie gespeichert und die Schwankungen mit Hilfe von Speichern ausgeglichen werden.

3 Datengrundlage

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Schritte der Projektarbeit beschrieben. Um die Auswertung besser nachvollziehen zu können, wird auf verschiedenste Zwischenergebnisse eingegangen.

3.1 Datenbeschaffung

Die Daten für die Leistungen der Sonne und des Windes in der Metropolregion Nürnberg, werden aus den MERRA-2 Datenbanken der NASA bezogen. Mit dem besagten Tool können Aussagen über Windgeschwindigkeit, Strahlung, Temperaturen, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit seit 1980 getroffen werden.

Ein Excel-Tool „MERRA-2“ zur Aufbereitung dieser Wetterdaten wurde vom Betreuer dieses Projekts Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp zur Verfügung gestellt. Es mussten zunächst einige Daten aufbereitet werden, um das Funktionieren dieses Tools zu gewährleisten.

Mit Hilfe des globalen MERRA-Gitters, wird die komplette Erdoberfläche in hunderttausende Rastergebiete aufgeteilt. Dort sind Informationen zur Beschaffenheit der Oberfläche, Topologie und Höhenlage gespeichert. Das genannte Gitter wird zur Veranschaulichung in Google Earth dargestellt (Abbildung 1). Um das zu untersuchende Gebiet und dessen Koordinaten besser eingrenzen zu können, werden alle Rastergebiete mit ihren Mittelpunkten und Grenzen veranschaulicht. Für die Metropolregion Nürnberg wird das Gebiet mit $49,5^\circ$ Nord und $11,25^\circ$ Ost ausgewählt. Das Versorgungsgebiet befindet sich im Norden Bayerns. Für weitere Untersuchungen wird das zu untersuchende Gebiet in 20 Raster aufgeteilt. Aufgrund der Untersuchung der letzten 38 Jahren, ergibt das für die komplette Metropolregion eine Anzahl von 760 auszuwertenden Dateien.

Auf die Auswertung, welches das Jahr mit den ungünstigsten Wetterbedingungen war, wird näher im Kapitel 4.1 eingegangen.

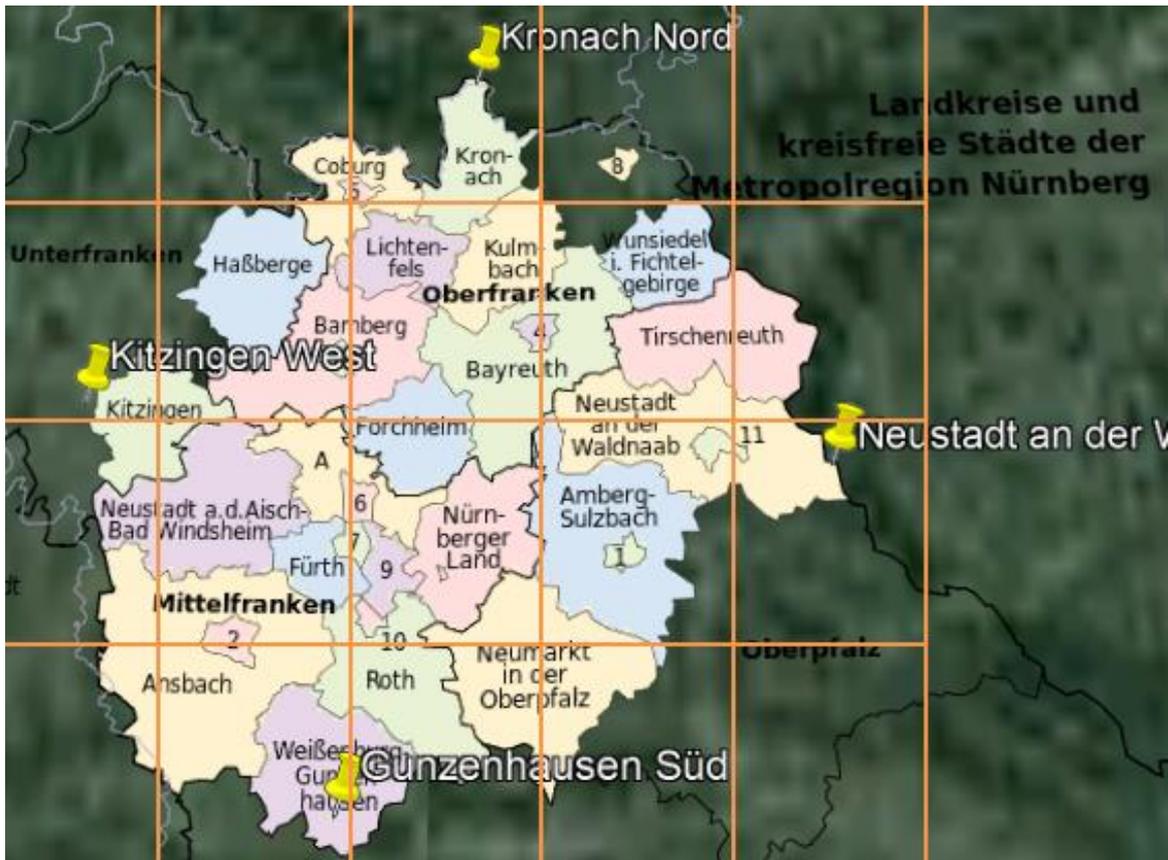


Abbildung 1: Metropolregion Nürnberg in Google Earth

Anschließend werden in mehreren Einzelschritten die stündlichen Durchschnittswindgeschwindigkeiten und Globalstrahlungswerte der 5x4 Rastergebiete in die Excel-Datei importiert.

Als letztes werden die Windgeschwindigkeiten aufbereitet. Hierbei werden nur die gelieferten Windgeschwindigkeiten auf die Geschwindigkeiten in einer Höhenschicht von 80 Metern untersucht.

Um verschiedene Strommix-Szenarien aus erneuerbaren Energien für das zu betrachtende Gebiet durchspielen zu können, wurde auf den Energieatlas Bayern zurückgegriffen. Diese Internetplattform stellt Informationen und Werkzeuge zur Umsetzung der Energiewende zur Verfügung. Mit Hilfe des Tools „Mischpult“ kann der Mix aus Wind-, Solarenergie, Biomasse und Wasserkraft so erprobt werden, um einen groben Anhaltspunkt für spätere Auswertungen zu erhalten.

3.2 Datenaufbereitung

Mit dem von Herrn Professor Popp zu Verfügung gestellten Excel-Tools namens „Versorgungsanalyse“, wurden die Komponenten der verschiedenen Energieformen untersucht. Dieses verarbeitet die Energiedaten aus dem „MERRA-2“ Tool und bereitet diese auf, um die gesuchten Ergebnisse zu erhalten.

Zuerst werden im „MERRA-2“ Tool die Mittelpunktkoordinaten der jeweiligen 20 Rastergebiete und die zu untersuchende Windhöhen-schicht eingetragen. Hierbei wird eine durchschnittliche Nabenhöhe von 80 Metern bei modernen Onshore-Windkraftanlagen festgelegt, wobei moderne Windenergieanlagen eine Nabenhöhe von 160 Meter erreichen.

Zusätzlich werden die berechneten Daten der Temperatur, des Luftdrucks, der Luftdichte, der totalen Windleistung, der physikalisch maximal umwandelbaren Windleistung nach Betz (PBetz) und der Windenergieanlagenleistung (PWEA) zu der Windenergieanlagenkennlinie und der charakteristischen Parameter des Rastergebiets übertragen. Die auf die Solaranlagenfläche auftreffende Globalstrahlungsleistung und die daraus berechneten Solaranlagenleistungen werden ebenfalls weitergegeben. Die daraus entstehenden Daten werden jeweils in der Registerkarte WEA (Windenergieanlagen) für die Winddaten und SEA (Solarenergieanlagen) für die Solardaten überführt.

In der Registerkarte „Ort“ werden Informationen zur Beschreibung des untersuchten Rastergebiets angegeben. Zum Beispiel für die Gaskonstante, die Erdbeschleunigung und die mittlere Höhe. Um die Rastergebiete besser beschreiben zu können, wird eine Karte des zu untersuchenden Gebiets beigefügt.

4 Auswertung und Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln wird auf die Auswertung und die Ergebnisse der Projektarbeit eingegangen.

4.1 Ermittlung des Jahres mit den ungünstigsten Wetterverhältnissen

Nach der Aufbereitung der Daten wurde für jedes der 20 Rastergebiete über alle 38 Jahre eine Datei „Versorgungsanalyse“ erstellt. In dieser Datei sind für ein Jahr, also

8760 Stunden, die Windgeschwindigkeiten und die Sonneneinstrahlung hinterlegt. Die entstandenen 760 Versorgungsanalysedateien wurden zuerst nach ihren Jahren in Ordnern sortiert, sodass jedes Jahr in seinem Ordner die dazugehörigen 20 Rastergebiete enthält. Die Excel-Datei „Zusammenstellung“, welche gleichzeitig erstellt wurde, zeigt für jedes Jahr die Betz'sche Windleistung $[W/m^2]$ und die gesamte Sonneneinstrahlung $[W/m^2]$. Die Betz'sche Windleistung besagt, dass nur maximal etwa $2/3$ der zur Verfügung stehenden Windleistung auch effektiv von den Windkraftanlagen genutzt werden kann.

Anschließend kann für jedes Jahr die durchschnittliche spezifische Leistung berechnet werden. Abbildung 2 veranschaulicht den Verlauf der spez. Leistung der letzten 38 Jahre.

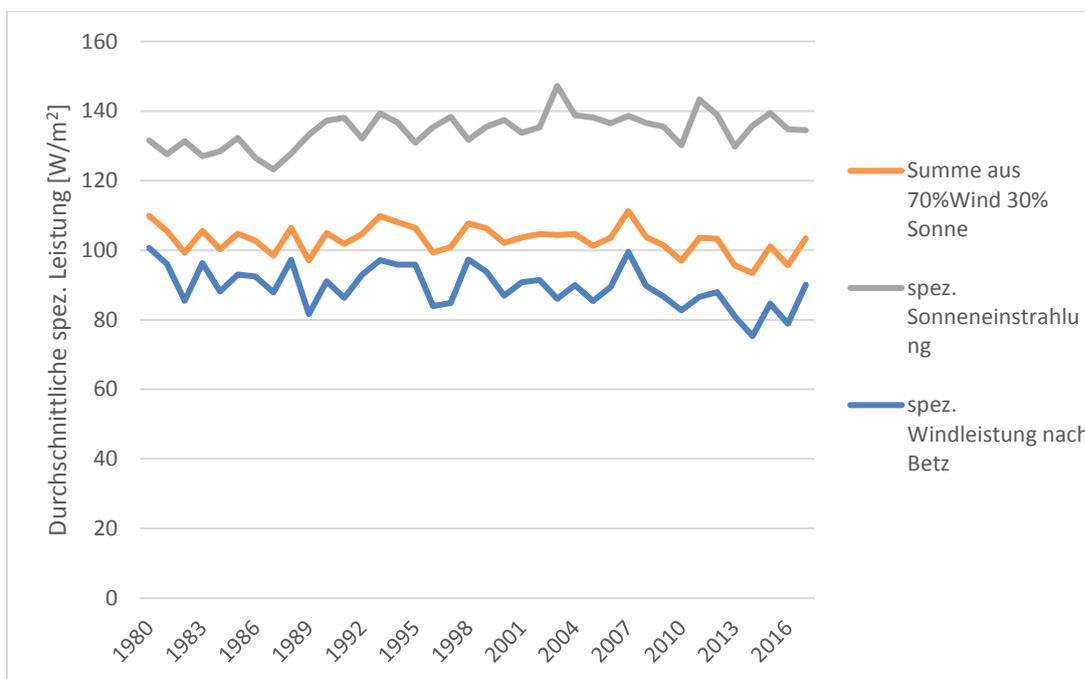


Abbildung 2: Durchschnittliche spez. Leistung der letzten 38 Jahre

Hierbei war 1980 das Jahr mit den besten und 2014 das mit den schlechtesten Windverhältnissen. Wiederum war im Jahr 2003 die größte und 1987 die geringste Sonneneinstrahlung zu verzeichnen. Wird nun die prozentuale Verteilung von 70% Wind und 30% Sonne berücksichtigt, so ergibt sich, dass im Jahr 2007 die besten und 2014 die schlechtesten Wetterverhältnisse herrschten. Tabelle 1 veranschaulicht noch einmal die oben ausgewerteten Daten.

Tabelle 1: Jahre mit den besten und ungünstigsten Wetterbedingungen

	max. spez. Leistung [W/m ²]	Jahr	min. spez. Leistung [W/m ²]	Jahr
Wind- leistung n. Betz	100,60	1980	75,30	2014
Sonnen- einstrahlung	147,19	2003	123,21	1987
Summe 70%W/30%S	111,25	2007	93,44	2014

Im Verlauf der Ausarbeitung wird ausschließlich auf das Jahr 2014 eingegangen, da von den ungünstigsten Bedingungen ausgegangen wird. Anhand dessen wird das maximale Defizit von Einspeisung und Verbrauch bestimmt um die benötigten Kapazitäten für die Speicherung der überschüssigen Energien zu realisieren.

4.2 Bestimmung der optimalen Einspeisung aus den vier Energieträgern

Da für die optimale Zusammenstellung der Sonnen- und Windenergie, der Biomasse und des Laufwassers die Leistungen der Energieträger von Nöten sind, werden diese in den folgenden Absätzen bestimmt.

4.2.1 Windleistung

Das Register „WEA“ des Versorgungsanalyse-Tools beinhaltet die Daten von verschiedenen Windenergieanlagen. Bei jeder einzelnen Anlage wird die Funktion des Leistungsbeiwerts c_p über die Windgeschwindigkeit angezeigt (siehe Abbildung 3). Für die folgenden Berechnungen und Auswertungen werden jedoch nur die Daten einer Anlage herangezogen.

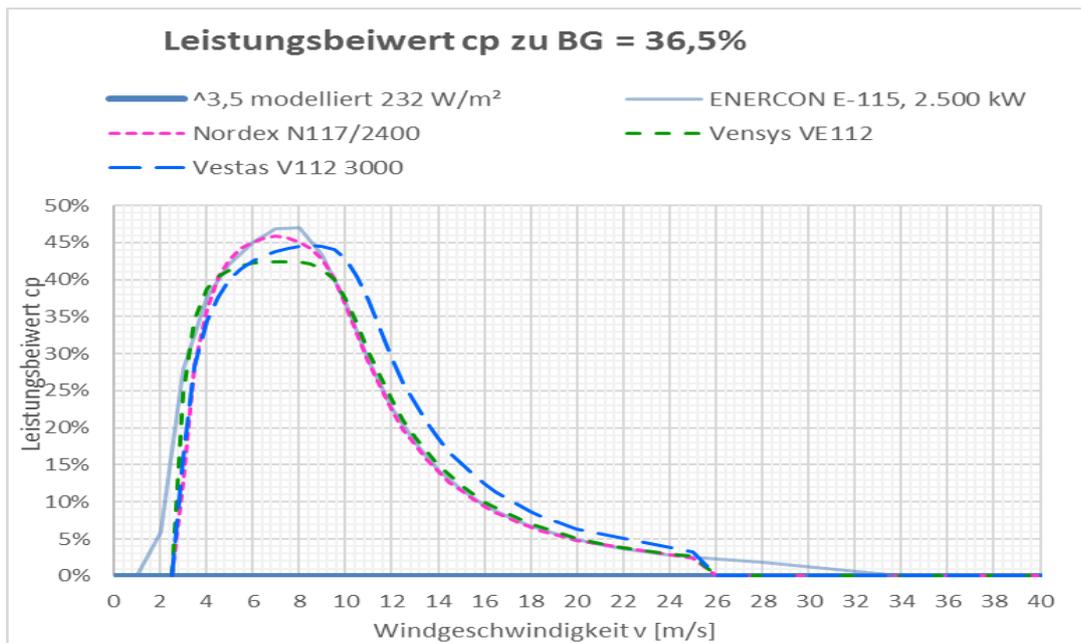


Abbildung 3: Leistungsbeiwerte Windkraftanlagen

In diesem Fall hat man sich entschieden, die Betriebsdaten der 4,1 MW-Anlage ENERCON E-115 für weitere Auswertungen zu nutzen. In Abbildung 4 werden die Kennwerte der Windenergieanlage und der Leistungsbeiwert über die Windgeschwindigkeit aufgezeigt. Aufgrund des besseren Leistungsbeiwerts bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 5,96 m/s (Tabelle 2) und der höheren Windgeschwindigkeiten wurde sie für weitere Analysen herangezogen.

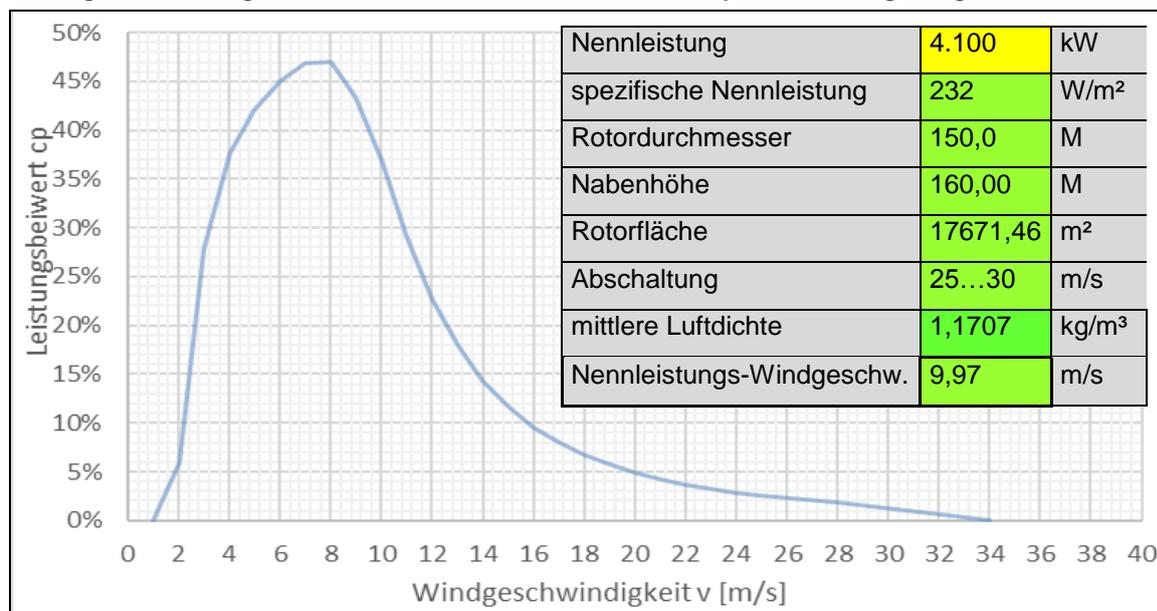


Abbildung 4: Leistungsdaten ENERCON E-115

Tabelle 2: Leistungsdaten Wind

UTC Mitte	vw(80m)	T(80m)	p(80m)	Rho(80m)	Ptot(80m)	PBetz(80m)	PWEA(80m)	WzuM
Minimum	0,10	264,53	93151,86	1,09	0,00	0,00	0,00	0,00%
Mittelwert	5,96	282,90	95292,92	1,17	221,63	131,33	75,30	100,00%
Maximum	18,23	304,27	97065,51	1,27	3592,19	2128,71	232,01	310,03%
Summe					1945270,49	1152752,88	659977,04	

Mit Hilfe von Tabelle 2, kann mit den ermittelten Mittelwerten nach Betz (PBetz) und der Windenergieanlagen (PWEA) jeweils ein Diagramm erstellt werden, welches veranschaulicht, wie sich die Windleistungen im Vergleich zu Winter und Sommer verhalten. Werden die Abbildungen 5 und 6 betrachtet, so fällt auf, dass Windkraftanlagen im Winter deutlich öfter mit ihrer Nennleistung betrieben werden können und somit mehr Strom erzeugt wird als in den Sommermonaten.

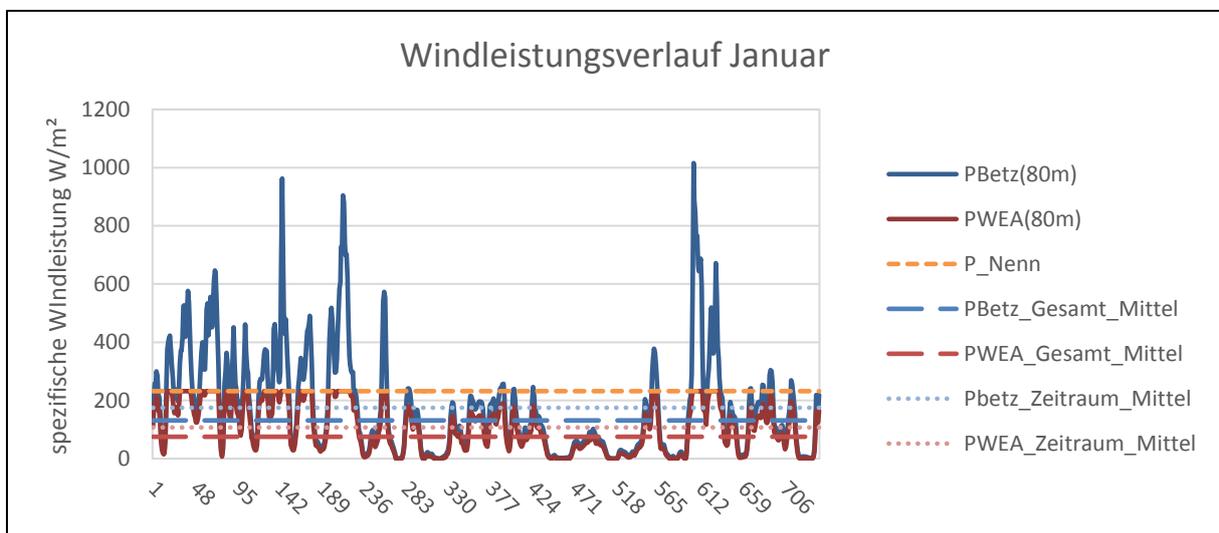


Abbildung 5: Windleistungsverlauf Januar

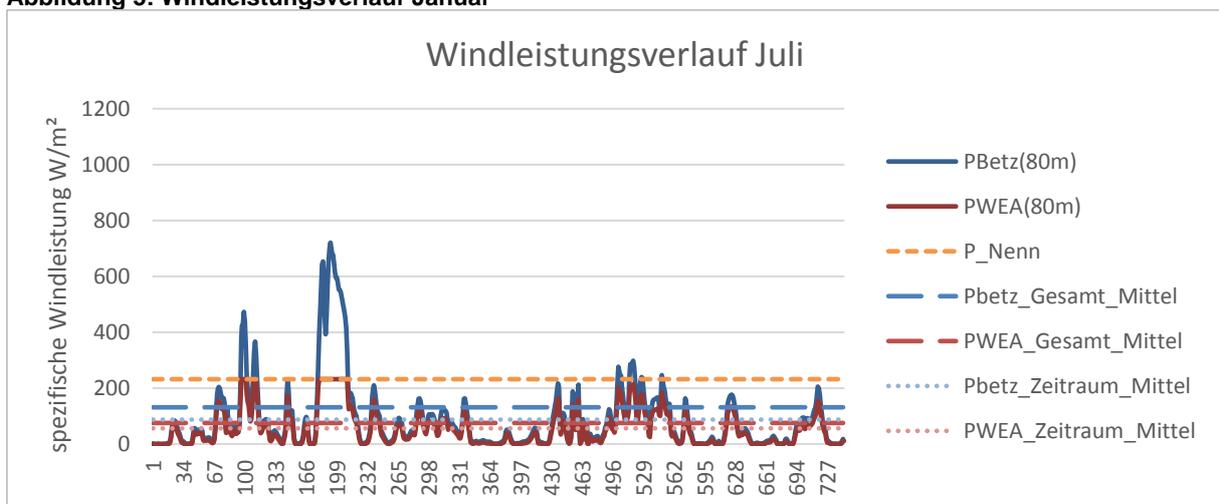


Abbildung 6: Windleistungsverlauf Juli

4.2.2 Solarleistung

Um die Solarleistung der Metropolregion Nürnberg bestimmen zu können, werden alle 20 Rastergebiete zu einem großen Versorgungsgebiet zusammengefasst. Hierbei wurden die solarspezifischen Wetterdaten der Gebiete aus dem Register „SEA“ in ein Excel-Tool überführt und ausgewertet. Zuerst werden die Ortsangaben des zu untersuchenden Raumes eingegeben, um daraus die auftreffende Einstrahlung berechnen zu können. Hier wird eine Ausrichtung der Kollektorflächen von 225° Süd-West und eine Neigung von 30° vorausgesetzt. Des Weiteren werden ein Wirkungsgrad der Anlage von 15% und die maximale Leistung von 125 W/m² angenommen. Diese Werte sind zur Veranschaulichung in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Leistungsdaten Solaranlage

Ortslage		Ausrichtung der Kollektorfläche			Solarenergieanlage		
Breite	49,00°...50,5°	Richtung αE	225°	SW	Wirkungsgrad EtaS	15%	
Länge	10,00°...12,5°	Neigung γE	30°	(60°)	Maximale Leistung Pmax	125	W/m ²

Anschließend werden aus allen ausgewerteten Rastergebieten, wie bei der Windleistung, die Minima, Mittelwerte, Maxima und deren Summen ausgegeben. Dies wird in Tabelle 4 veranschaulicht. Hierbei handelt es sich bei der spezifischen Strahlungsleistung um die Leistung, welche insgesamt von der Sonne zur Verfügung gestellt wurde. Bei der spezifischen Leistung der Anlage wird die tatsächlich eingespeiste Leistung mit Hilfe des Wirkungsgrades ausgegeben.

Tabelle 4: Leistungsdaten Sonne

	Spezifische Strahlungsleistung W/m ²	Spezifische Leistung der Anlage W/m ²	Spez. Leistung durch Mittelwert
Minimum	0	0,00	0,00%
Mittelwert	135	20,26	100,00%
Maximum	752,07	112,81	556,80%
Summe	1183184,24	177493,73	

Wie unter Kapitel 4.2.1 wurden für die Solarleistung zwei Diagramme erstellt, welche die aktuelle elektrische Leistung, die mittlere Leistung über den angegebenen Zeitraum und die gesamte mittlere Leistung über das Jahr 2014 darstellen.

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen nun noch einmal die anfallenden Leistungen in zwei unterschiedlichen Fällen. Hierbei wird der Monat Januar mit dem Monat Juli im Jahre 2014 verglichen. Es ist festzustellen, dass hier die Leistungsspitzen im Juli deutlich größer sind als die im Januar und somit in den Sommermonaten mehr Leistung durch Solarenergie eingespeist werden kann.

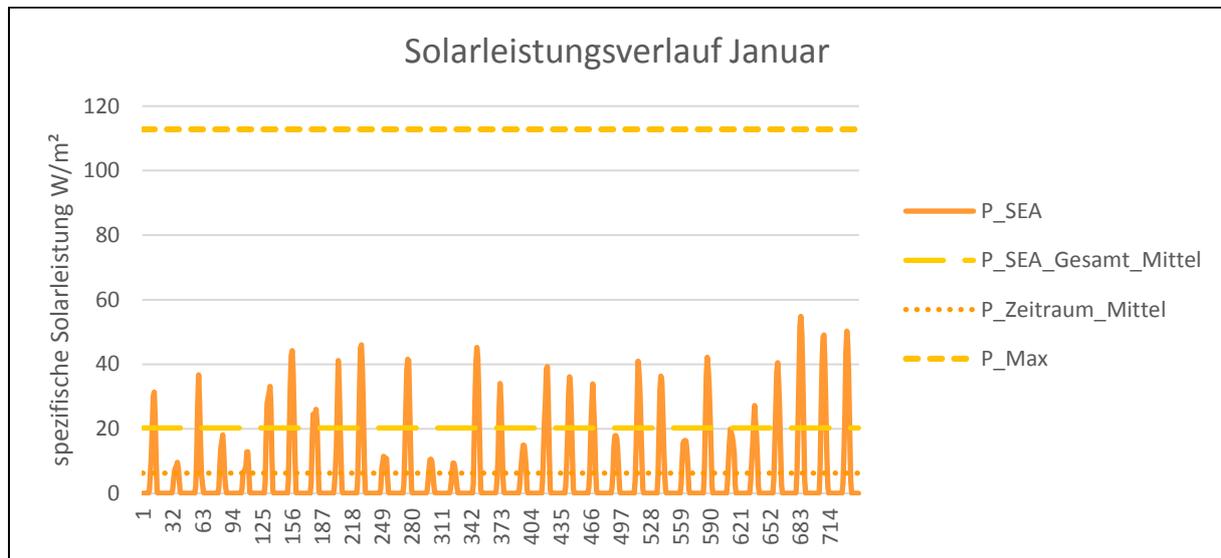


Abbildung 7: Solarleistungsverlauf Januar

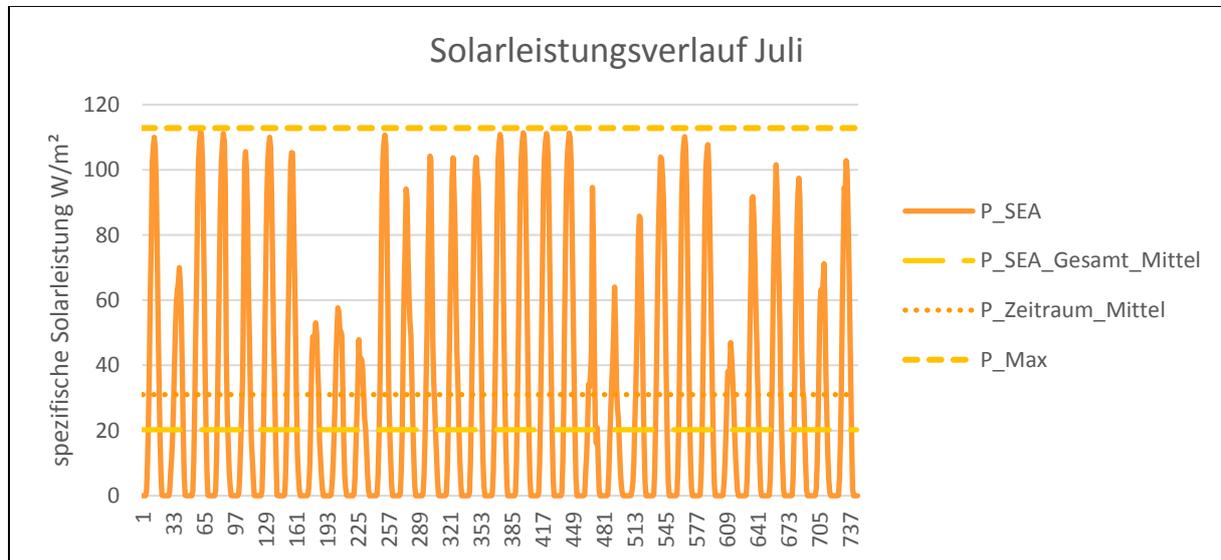


Abbildung 8: Solarleistungsverlauf Juli

4.2.3 Laufwasser- und Biomasseleistung

Da Laufwasser und Biomasse in der Auslegung des optimalen Systems eine untergeordnete Rolle spielen, ist eine hundertprozentige Genauigkeit folgender

Angaben nicht ausschlaggebend. So ergibt sich für das Laufwasser ein Anteil der Deckung des Stromverbrauchs von rund 3% und bei der Biomasse von rund 10%, was bezogen auf den durchschnittlichen Verbrauch eine elektr. Leistung von 84 MW und 280 MW ergibt. Da es in der Metropolregion Nürnberg seit Jahren fast keinen Ausbau von Wasserkraft bzw. Biomasse mehr gibt, werden diese Werte seit Jahren als konstant angenommen.

4.2 4 Verbrauch

Um den Verbrauch der elektrischen Energien für 2050 ermitteln zu können, wurden die Daten verschiedenster Nachschlagewerke, wie z.B. die Main-Donau-Netzgesellschaft und das Bayernwerk, miteinander verglichen. Da jedoch für den Verbrauch für 2050 nur grobe Spekulationen vorliegen, wird mit den aktuellsten Werten der Main-Donau-Netzgesellschaft (MDN) fortgefahren. Die in 15 Minuten dargestellten Zeitschritte werden in eine stündliche Zeitreihe überführt. Die Main-Donau-Netzgesellschaft liefert für ca. 1,3 Millionen Menschen in Nordbayern Strom. Da jedoch der gesamte Stromverbrauch der EMN benötigt wird, wird dieser, auf die Bevölkerungszahl der Region, von 3,56 Millionen Menschen, umgewälzt. Nach der Aufbereitung dieser Verbrauchsdaten, kann der Bedarf an elektrischer Energien der EMN 2017 dargestellt werden. Hierbei entsteht ein Durchschnittsverbrauch von 2,8 GW, was auf das ganze Jahr bezogen ein Gesamtverbrauch von 24,4 TWh entspricht. Dies wird in Abbildung 9 veranschaulicht.

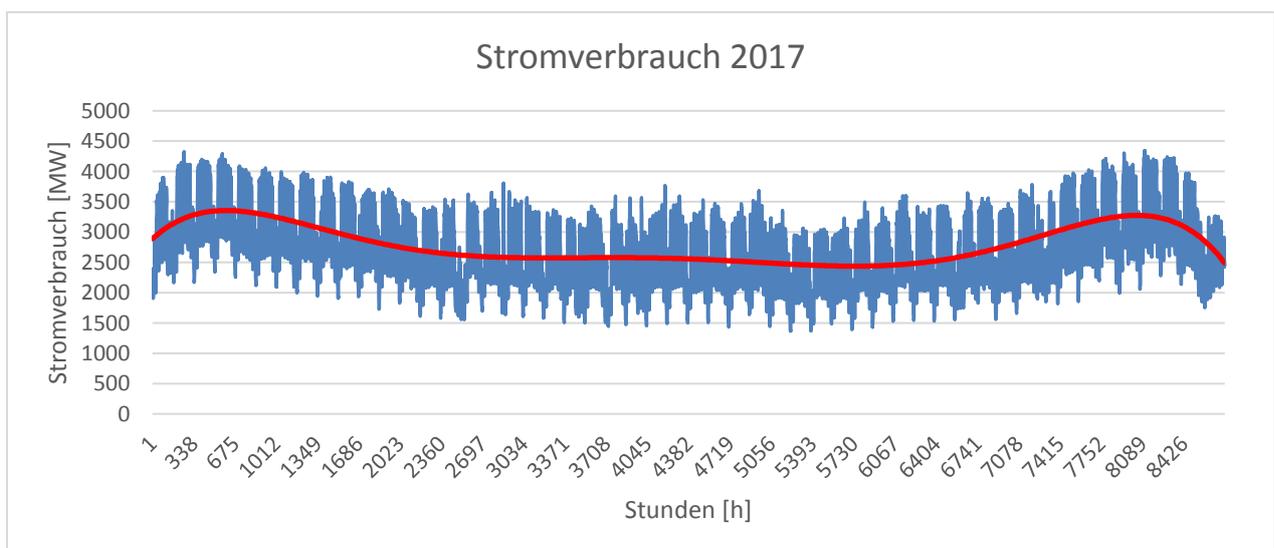


Abbildung 9: Stromverbrauch 2017

Betrachtet man die oben dargestellte Abbildung, so fällt auf, dass der Stromverbrauch im Sommer geringer ist, als im Winter. Dies liegt vor allem daran, dass im Sommer weniger elektrisches Licht benötigt wird, da die Sonne früher auf und später unter geht, die Heizungen weniger laufen und somit die Pumpen weniger Strom benötigen. Um jedoch eine detailliertere Aussage über den täglichen Stromverbrauch treffen zu können, werden in Abbildung 10 und Abbildung 11 der Verbrauch der EMN vom 1. bis 6. Januar bzw. 1. bis 6. Juli dargestellt.

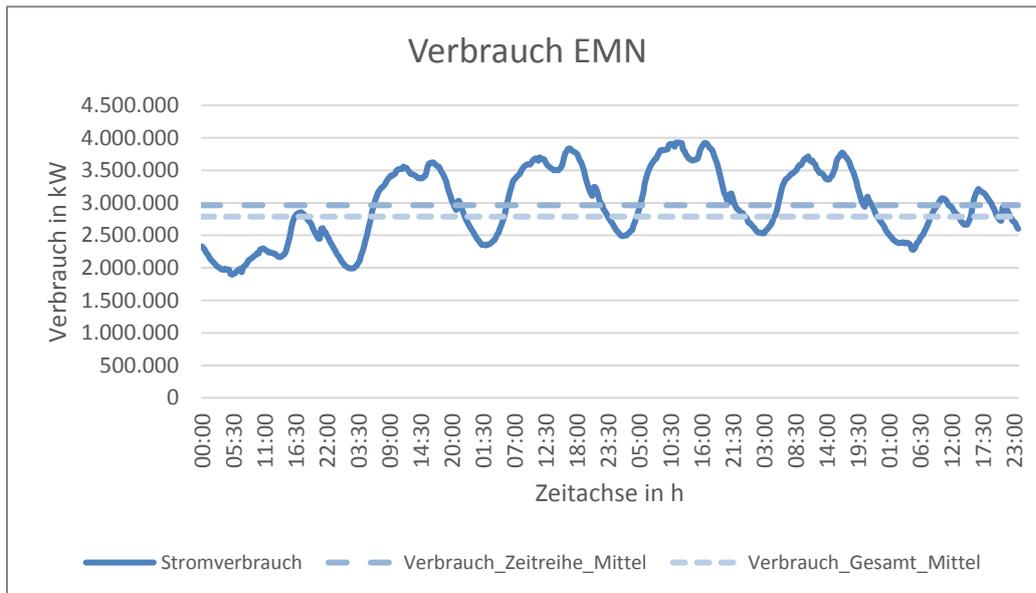


Abbildung 10: Verbrauch EMN Januar

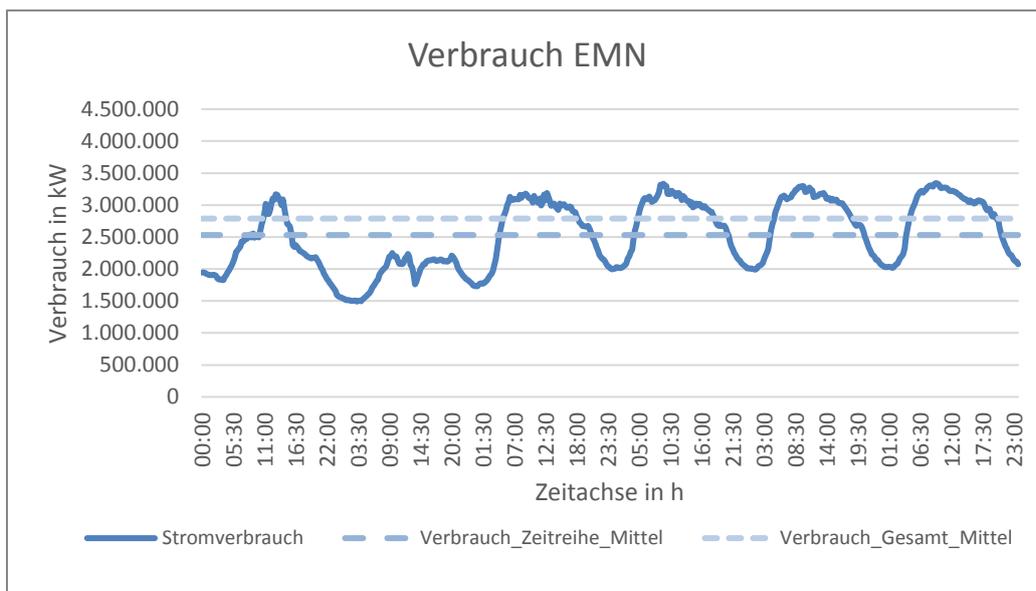


Abbildung 11: Verbrauch EMN Juli

Der Kennlinienverlauf der sieben Tage im Januar und im Juli, verdeutlicht, dass der Stromverbrauch im Sommer geringer ist, als im Winter. Dies gilt auch für den Stromverbrauch in der Nacht und am Tag, da der Verbrauch am Tag deutlich höher ist als in der Nacht.

4.2.5 Optimaler Mix

Bei der Ermittlung des optimalen Mix aus regenerativen Energien für das Jahr 2050 wird in Bezug auf den durchschnittlichen Stromverbrauch eine 100 prozentige Versorgung aus den Energieträgern Wind- und Solar sowie Laufwasser- und Biomasseanlagen herangezogen.

Wie unter Kapitel 4.2.4 erwähnt, wird für den angenommenen Stromverbrauch das Jahr 2017 herangezogen. Da 2014 das Jahr mit den ungünstigsten Wetterverhältnissen war, wird dieses für weitere Auswertungen verwendet und anhand dessen, die prozentuale Verteilung der Wind- und Solarenergie, sowie Biomasse und Wasserkraft bestimmt. Die Summe aller Erzeugungsvermögen muss über 100% sein, da das Übertragen der Energie sowie das Zwischenspeichern immer mit Verlusten verbunden ist. Für die Ermittlung der optimalen Verteilung der vier Energiequellen wurden die Anteile für das Jahr 2050 wie folgt ermittelt.

100% des Strombedarfs aus regenerativen Energien

$$\text{Verbrauch (V)} = 2,8 \text{ GW}$$

$$\text{Umwandlungsvermögen} = 100 \% \times V = 1 \times 2,8 \text{ GW} = 2,8 \text{ GW}$$

davon 3% Biomasseanteil (BA) und 10% Wasserkraftanteil (WaA)

$$\text{Umwandlungsvermögen (UV)} = \text{Freier Anteil (FA)} + \text{Gegebener Anteil (GA)}$$

$$GA = BA + WaA = 10\% + 3\% = 13\%$$

$$FA = UV - GA = 120\% - 13\% = 107\%$$

davon 70% Windanteil (iWA) und 37% Sonnenanteil (iSA)

$$\text{Windanteil (WA)} = iWA \times FA = 70\% \times 107\% = 74,90\%$$

$$\text{Sonnensanteil (SA)} = iSA \times FA = 37\% \times 107\% = 32,10\%$$

Für den Windanteil wurde hier ein Wert von ca. 75% am Durchschnittsverbrauch angenommen, da diese Energiequelle die höchste Energiedichte aufweist. Ein weiterer großer Vorteil der Windenergie ist die saisonale Verteilung des Windes. Wie unter

Kapitel 4.2.1 dargestellt, weht durchschnittlich im Winter mehr Wind als im Sommer. Gleichzeitig ist auch der Energiebedarf in Wintermonaten höher als im Sommer. Der Solaranteil hat ebenfalls ein sehr hohes Potential und ist daher nach dem Wind der zweit wichtigste Faktor für den optimalen Energiemix. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass im Sommer enorme Leistungspeaks und dafür im Winter und in der Nacht sehr große Defizite an Solarenergie herrschen. Somit wird deshalb für die Solarenergie ein Erzeugungsvermögen von ca. 32% angesetzt.

Wie unter 4.2.3 beschrieben, ist das Potential des Laufwassers und der Biomasse weitestgehend ausgeschöpft und wird mit einem Erzeugungsvermögen beim Laufwasser von 3% und bei der Biomasse von 10% angesetzt. (Siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Umwandlungsvermögen

WA	SA	LA	BA	UV	UR
74,90%	32,10%	3,00%	10,00%	120,00%	20,00%
Windanteil	Solaranteil	Laufwasseranteil	Biomasseanteil	Umwandlungsvermögen	Umwandlungsreserve

Die Summe aller Energieanteile ergibt ein Umwandlungsvermögen von 120%, was einer Umwandlungsreserve von 20% entspricht. Dies bedeutet, dass im Durchschnitt, 20% mehr Strom erzeugt werden kann, als 2050 verbraucht wird.

Mit Hilfe der oben ausgewerteten Zusammenstellungen lassen sich nun die benötigten Anzahlen von Windkraftanlagen und die Solaranlagenflächen bestimmen. Für das Szenario im Jahr 2050 muss es nach den Auslegungen in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.2 insgesamt 1570 Windkraftanlagen und 54,5 km² an Solarkollektorflächen geben. Laut dem Energieatlas Bayern stehen aktuell 630 Windkraftanlagen mit einer Nennleistung von 10 bis 4.100 kW zur Verfügung. Da jedoch nur von Anlagen mit 4,1 MW ausgegangen wird, entspricht dies umgerechnet 336 4,1 MW Anlagen. Somit müssen noch zusätzlich 1.234 neue Windkraftanlagen mit dieser Leistung bis 2050 in Betrieb genommen werden. Mit der gewählten Verteilung der Energieträger, wird für das Jahr 2050 eine gesamte Einspeiseleistung von 29,3 TWh angesetzt.

In den Abbildungen 12 und 13 ist der ausgewählte Mix an regenerativen Energien mit dem Versorgungsverlauf bezogen auf den Durchschnittsverbrauch dargestellt. Die einzelnen Energieformen, als auch das gesamte Umwandlungsvermögen und der

Verbrauch sind hier dargestellt. Die Diagramme zeigen den ermittelten Mix für Januar und Juli 2014 in der Metropolregion. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Sommer ein größeres Umwandlungsvermögen vorherrscht als im Winter. Dies ist auf die erhöhte Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten zurückzuführen.

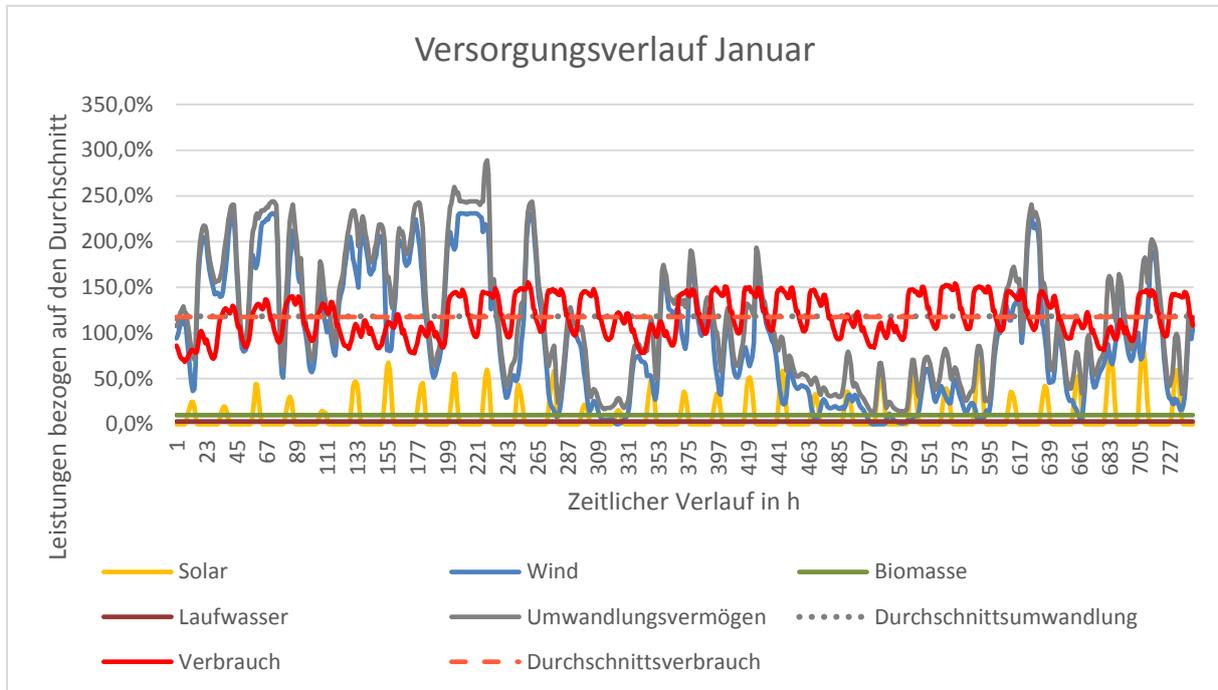


Abbildung 12: Versorgungsverlauf Januar

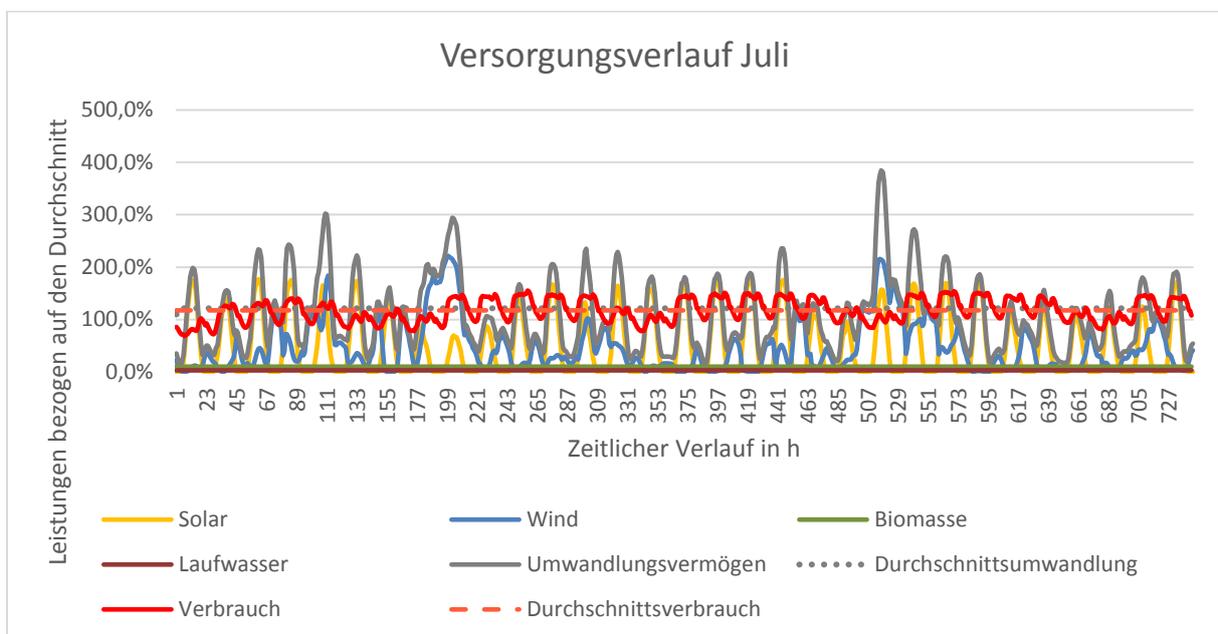


Abbildung 13: Versorgungsverlauf Juli

4.3 Residualleistungsanalyse

Abbildung 14 zeigt den Verlauf der erzeugten Trendlinien des Verbrauchs im Jahr 2017 und der Einspeiseleistung der vier regenerativen Energieträger. Der Erzeugungsmix muss nun so optimiert werden, dass die Defizitphasen, in denen der Verbrauch höher ist als die produzierte Leistung, minimiert werden. Im Jahr 2050 wird deutlich, dass in den ersten Wochen bereits ein Überschuss produziert wird, wobei aber auch Ende Januar eine kleine Defizitphase auftritt, welche durch die ausgelegten Speicher kompensiert werden muss. Es kommen zwei mögliche Speichersysteme in Frage. Zum einen die geotechnischen, wie beispielsweise Stülpmembranspeicher und Ringwallspeicher oder Power-to-Gas Anlagen. In der folgenden Projektarbeit wird sich jedoch auf geotechnische Speicher beschränkt. Der Wirkungsgrad wird auf 75% angesetzt. Um eine grobe Dimensionierung von regenerativen Speicheranlagen zu ermöglichen, muss zuerst das größte Defizit ermittelt werden. Des Weiteren muss die längste Defizitperiode für die Auslegung bestimmt werden.

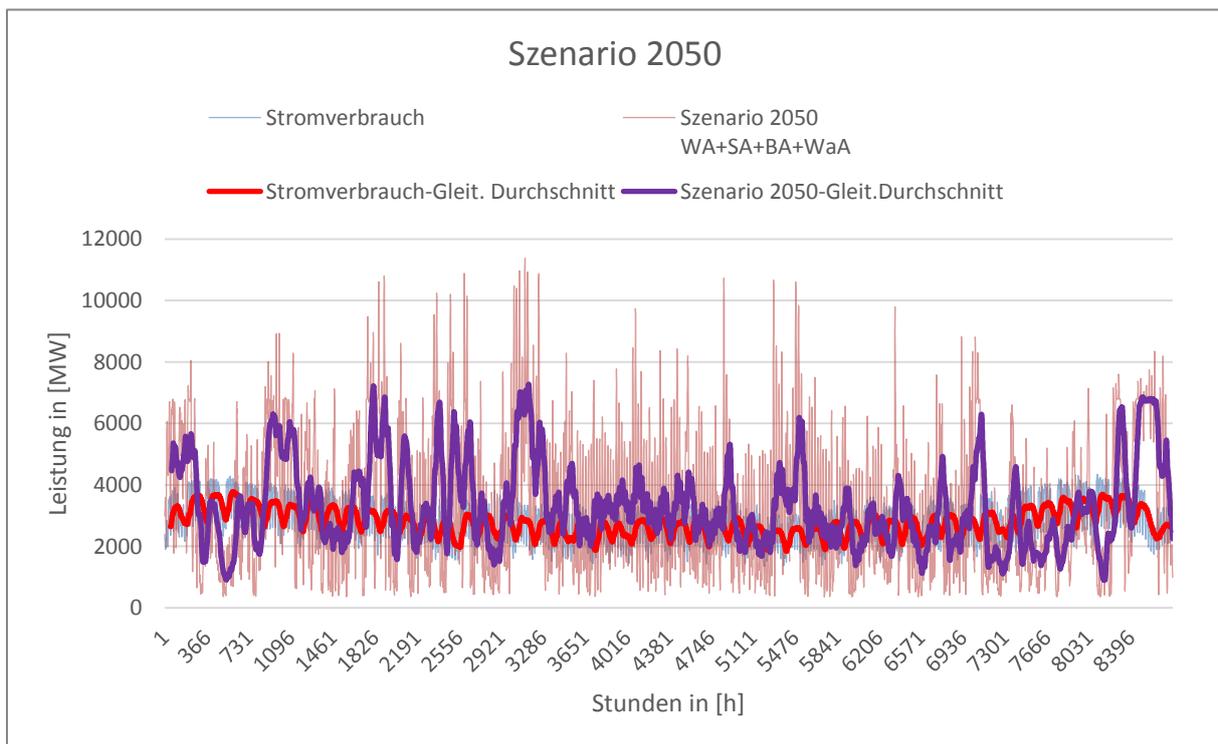


Abbildung 14: Trendlinien Szenario 2050

4.3.1 Ermittlung des größten Defizits

Da zur Ermittlung des größten Defizits die Residualleistung von Nöten ist, wird diese für 2050 stündlich ermittelt. Die Residualleistung ist die Differenz aus der regenerativen Einspeisung und dem Stromverbrauch.

$$P(t)_{Residual} = P(t)_{reg. Einspeisung} - P(t)_{Verbrauch}$$

Abbildung 16 zeigt die maximale und die minimale Residualleistung für 2050. Anhand der oben ausgewerteten Daten ergibt sich so ein maximales stündliches Defizit von -3,8 GW und einen Überschuss von 9,2 GW. Hierbei wird deutlich, dass die maximale residuale Leistung deutlich über das Doppelte größer ist als die minimale Residualleistung, aber auch den durchschnittlichen Strombedarfs von ca. 2,8 GW um das Dreifache übersteigt.

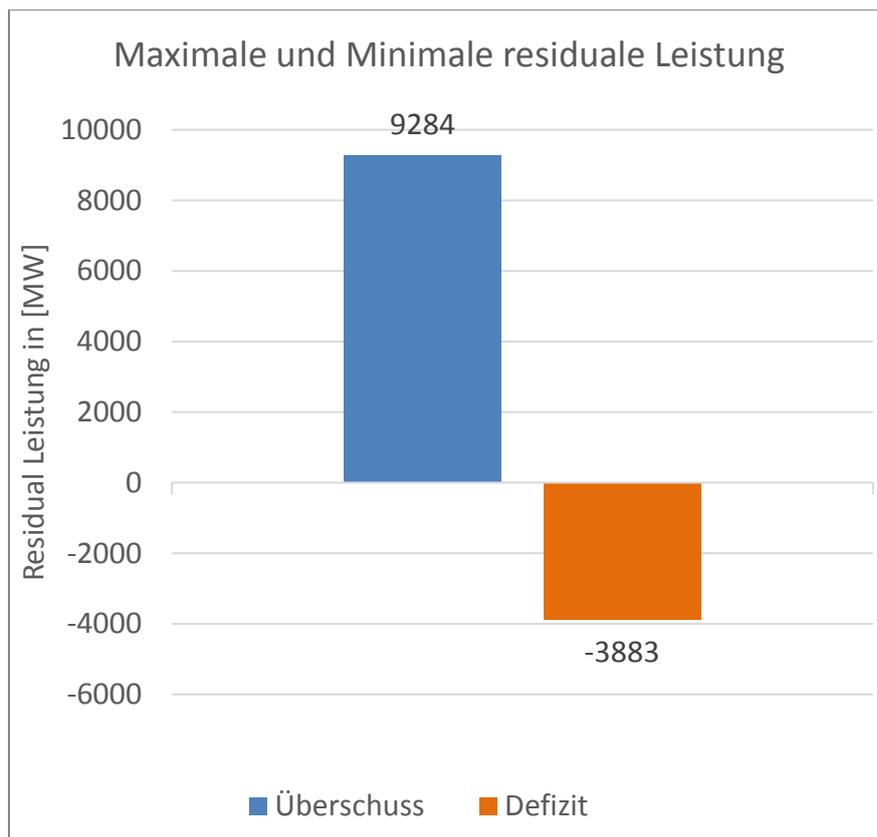


Abbildung 15: Residuale Leistung Minima und Maxima

4.3.2 Ermittlung der längsten Defizitperiode

Um die längste Defizitperiode bestimmen zu können, wurde aus allen stündlichen Werten die längste Zeitreihe mit negativen Residualleistungen ermittelt. Hierbei ergibt sich für die Periode mit dem größten Überschuss eine Zeitreihe von 219 Stunden und für das Defizit von 165 Stunden.

$$t_{\text{Überschuss}_{MAX}} = 219 \text{ h}$$

$$t_{\text{Defizit}_{MAX}} = 165 \text{ h}$$

4.3.3 Benötigte elektrische Leistung zum Ausgleich der Defizite

Um die elektrische Leistung, für das von oben bestimmte längste Defizit, ermitteln zu können, muss zuerst die Energiemenge aus dieser Zeitspanne errechnet werden. Diese lässt sich wie folgt kalkulieren:

$$E_{\text{Defizit}_{MAX}} = \sum_{t_1}^{t_2} (P(t)_{\text{Verbrauch}} - P(t)_{2050})$$

$$E_{\text{Defizit}_{MAX}} = 348 \text{ GWh}$$

mit $t_1 = \text{Anfangszeitpunkt des größten Defizits}$

$t_2 = \text{Endzeitpunkt des größten Defizits}$

$P(t)_{2050} = \text{Einspeiseleistung der erneuerbaren Energien zum Zeitpunkt } t$

$P(t)_{\text{Verbrauch}} = \text{Stromverbrauch zum Zeitpunkt } t$

Mit dem von oben bestimmten maximalen Defizit in einem Zeitraum von 165 Stunden lässt sich nun die elektrische Leistung berechnen.

$$P_{\text{Defizit}} = \frac{E_{\text{Defizit}_{MAX}}}{t_{\text{Defizit}_{MAX}}} = \frac{348 \text{ GWh}}{165 \text{ h}} = 2,1 \text{ GW}$$

Anhand der oben ausgeführten Rechnung lässt sich erkennen, dass das maximale zu kompensierende Defizit 2,1 GW entspricht. Das längste Defizit mit der notwendigen Ausgleichsleistung entspricht in etwa 70 Prozent des durchschnittlichen Strombedarfs. Für das Defizit über das gesamte Jahr hinweg wird Abbildung 16 herangezogen.

Die jeweilige Wind- und Solarleistung bezogen auf den durchschnittlichen Stromverbrauch über das ganze Jahr gesehen, ist in Form von Erzeugungsdauerlinien dargestellt. Hierbei ist gut zu sehen, dass für ca. 4720 Stunden im Jahr überdurchschnittlich viel Strom eingespeist wird. Dies wird an der Fläche über dem Stromverbrauch zum Szenario 2050 ersichtlich. Der Anteil unter 100 Prozent zur 2050 Linie muss beispielsweise mit Hilfe von Power-to-Gas Anlagen oder geotechnischer Speicher ausgeglichen werden. Hier ergibt sich ein Defizit von circa 4040 Stunden.

$$E_{\text{Überschuss}} = \int_{0h}^{8760h} P_{\text{Verbrauch}} dt - \int_{0h}^{8760h} P_{\text{Einspeisung}} dt$$

Mit Hilfe dieses Diagramms lässt sich nun die Differenz der beiden Verläufe betrachten und dementsprechend die Anteile der Erzeugungsvermögen so wählen, dass es kein Defizit zwischen Verbrauch und Einspeisung für das Szenario 2050 gibt.

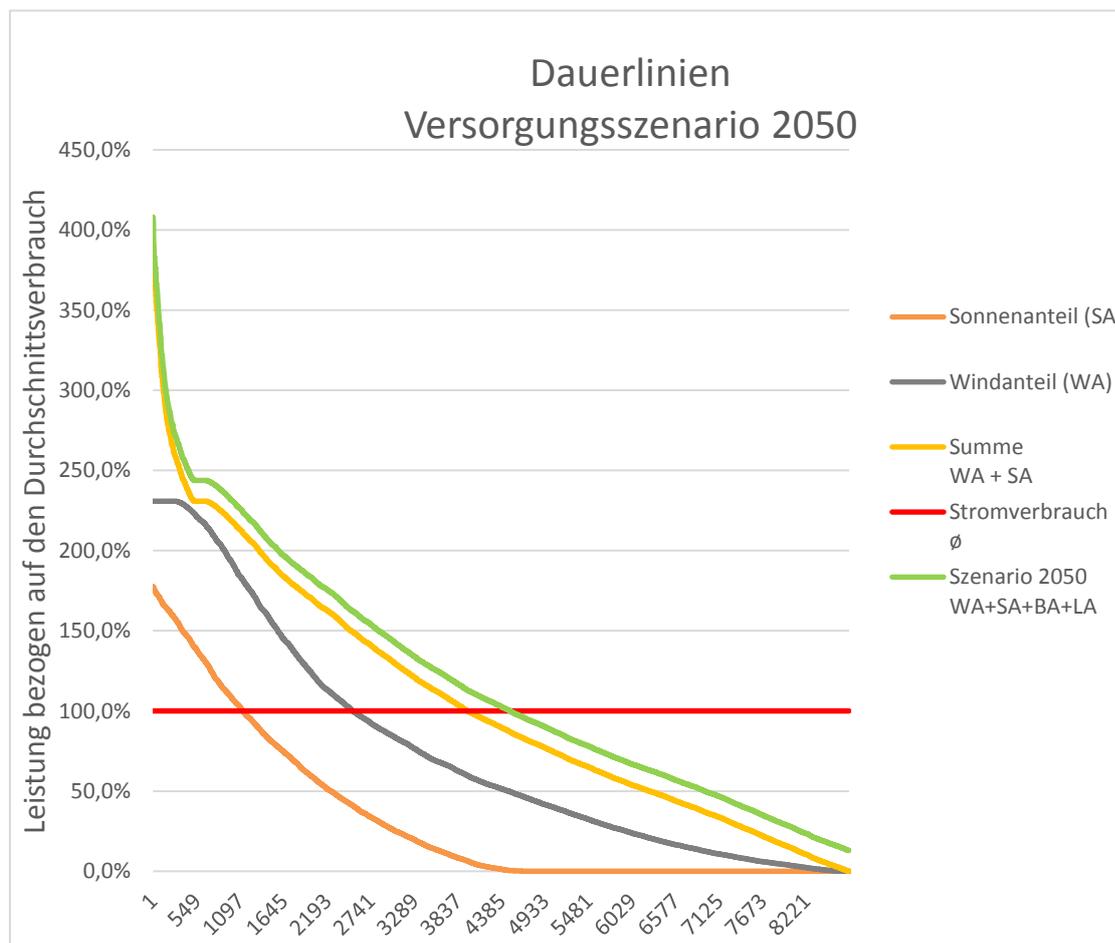


Abbildung 16: Versorgungsdauerlinien

Mit dem von oben bestimmten Schnittpunkt der Dauerlinie bei 4720 Stunden ($t_{Schnitt}$) kann die Energiemenge, welche zur Kompensierung des jährlichen Defizits nötig ist, berechnet werden.

$$E_{Defizit_{ges}} = \sum_{t=t_{Schnitt}}^{t=8760h} (P(t)_{\emptyset Verbrauch} - P(t)_{DL-2050})$$

$$E_{Defizit_{ges}} = 5,1 \text{ TWh}$$

$$\text{mit } P(t)_{\emptyset Verbrauch} = 2,8 \text{ GW}$$

$$P(t)_{DL-2050} = \text{Dauerlinie der erneuerbaren Energien 2050}$$

Die zu kompensierende Energiemenge von 5,1 TWh entspricht im Verhältnis zur komplett benötigten Energiemenge der Region von 24,4 TWh etwa 21 Prozent. Die verbleibenden 79 Prozent entsprechen dem regenerativ erzeugten Strom in der EMN, der ohne Speicherung zur Verfügung gestellt werden kann.

4.4 Speicherwahl und Dimensionierung

Um die unter Kapitel 4.3 ermittelten Defizite ausgleichen zu können werden Speicher benötigt, die für nachfragegerechte Stromeinspeisung sorgen. Auf diese wird in den folgenden Kapiteln näher eingegangen.

4.4.1 Festlegung der Speicherart

Um die überschüssige elektrische Energie, welche für die Kompensation der Defizite nötig ist, speichern zu können, werden regenerative Speichermöglichkeiten, wie geotechnische Speicher benötigt. Beispiele für diese Speicherart sind zum einen der Ringwandspeicher und der Stülpmembranspeicher. Auf die genauere Funktionsweise der Speicherkonzepte und deren Wirkungsweise wird in anderen Projektarbeiten näher eingegangen. Hierbei wird wie oben beschrieben, ein Wirkungsgrad der Speicheranlagen von 75 % angesetzt.

4.4.2 Dimensionierung der Speicher

Für die Leistung, welche durch Speicherung ausgeglichen werden muss, wird zunächst die erforderliche Residuallast bestimmt. Diese errechnet sich aus der Differenz der verbrauchten Leistung und der regenerativ eingespeisten Leistung und zeigt auf, welche Energiemenge nun produziert werden muss. In Abbildung 17 ist der Verlauf der Residuallast in Form einer Dauerlinie dargestellt.

$$P_{Residuallast}(t) = P_{Verbrauch}(t) - P_{Reg.Einspeisung}(t)$$

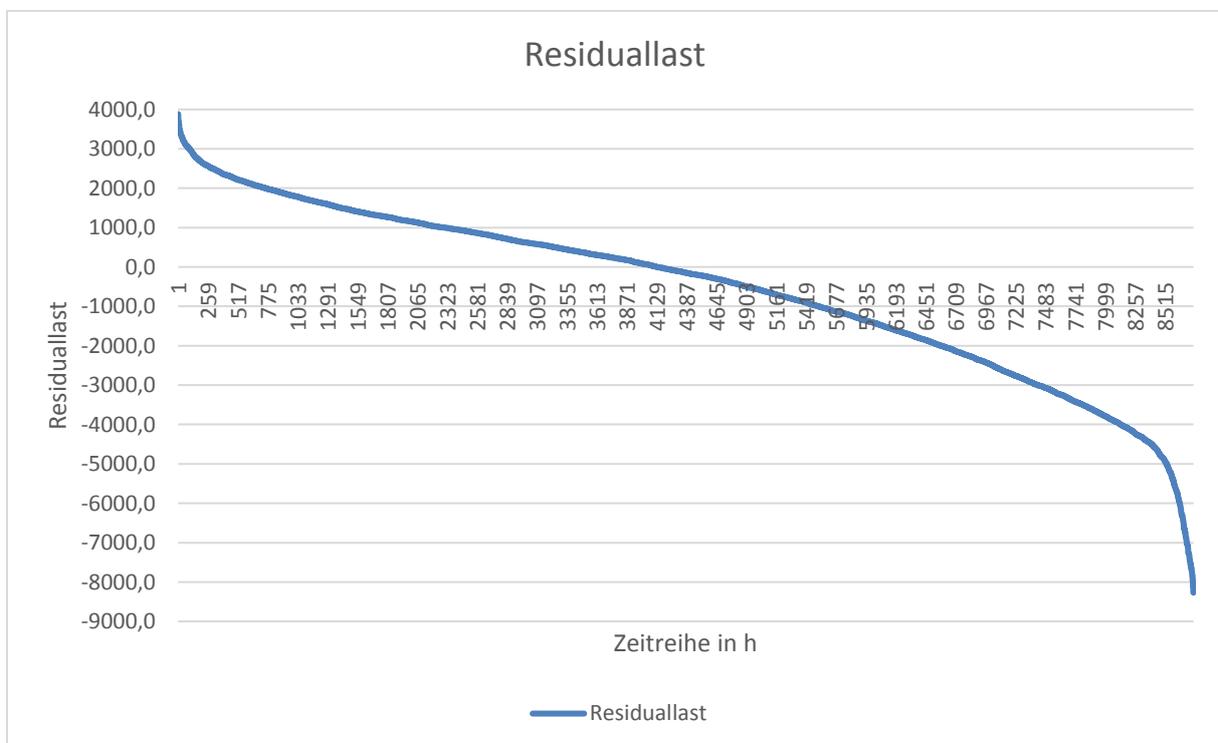


Abbildung 17: Residuallastverlauf

Anhand des Residuallastverlaufes kann nun die zu speichernde Arbeit, welche die Defizite ausgleicht, ausgerechnet werden. Dies beschreibt die Fläche über null zur Residuallast. Der Bereich unter Null zur Residuallastlinie beschreibt die maximal mögliche Energiemenge, welche gespeichert werden kann. Hierbei müssen 5,1 TWh durch Speicher zur Verfügung gestellt werden. Alle regenerativen Anlagen geben eine Residualleistungsüberschüsse von 9,9 TWh. Hierbei müssen 4.133 Stunden durch gespeicherte Energie gedeckt werden.

Mit Hilfe der oben bestimmten Betriebsstundenzahl von 4.133 Stunden, kann nun der Benutzungsgrad, in welchem die Anlagen Strom erzeugen müssen, bestimmt werden.

$$\text{Benutzungsgrad} = BG_{\text{gesamt}} = \frac{\text{Betriebsstunden}}{\text{Stunden pro Jahr}}$$

$$BG_{\text{gesamt}} = \frac{4133 \text{ h}}{8760 \text{ h}} = 47,1 \%$$

Die von den Speichern bereitgestellte elektrische Leistung lässt sich nun wie folgt bestimmen:

$$E_{\text{benötigt}} = \frac{E_{\text{ab}}}{\eta} = \frac{5,1 \text{ TWh}}{0,75} = 6,8 \text{ TWh}$$

$$\Delta E = E_{\text{gesamt_erzeugt}} - E_{\text{benötigt}} = 9,9 \text{ TWh} - 6,8 \text{ TWh} = 3,1 \text{ TWh}$$

Wird die gesamte erzeugte Energie mit der benötigten Energie subtrahiert, entsteht eine überschüssige Leistung von 3,1 TWh. Diese Überschüsse können nun genutzt werden um exportiert oder abgeregelt zu werden. Da der optimale Mix mit einem Durchschnittsverbrauch von 2017 festgelegt wurde, ist mit diesem Mix, aufgrund des enormen Überschusses an erzeugter Leistung, auch ein höherer Energieverbrauch für 2050 realisierbar.

5 Fazit

Um die Metropolregion bis 2050 voll aus erneuerbaren Energien versorgen zu können, wurde in dieser Projektarbeit anhand des Jahres mit den ungünstigsten Wetterverhältnissen ein Mix erstellt, welcher die optimale Nutzung der regenerativen Energien garantiert. Für das Jahr mit den schlechtesten Verhältnissen wurde 2014 herangezogen, da dies seit Beginn der Wetteraufzeichnungen die schwächsten Windgeschwindigkeiten und die geringste Sonneneinstrahlung aufweist. Da 2050 keine Prognosen des Stromverbrauchs vorhanden sind, werden die Verbrauchsdaten von 2017 herangezogen. Der optimale Mix stellt sich aus 74,90 % Wind- und 32,10 % Sonnenenergie zusammen. Da es in der EMN keinen Ausbau an Biomasse (10,00 %) und Laufwasser (3,00%) gibt, werden diese Werte als konstant angenommen. Für diese Zusammenstellung reicht die aktuelle Zahl an Windkraftanlagen und Solarkollektoren nicht aus, so werden in der gesamten Metropolregion 1570 Windkraftanlagen und 54 km² an Solaranlagenflächen benötigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es realistisch wäre, die EMN bis 2050 vollkommen CO₂ neutral mit Strom versorgen zu können. Es muss jedoch auf einigen Gebieten noch viel ausgebaut und investiert werden um entsprechende Infrastrukturen zu entwickeln.

Um eine vollständige Optimierung für ein regeneratives Versorgungssystem gewährleisten zu können, müssten Akzeptanzerwägungen sowie gesamtwirtschaftliche und betriebswirtschaftliche Überlegungen berücksichtigt werden. Für weitere Projektarbeiten in diesem Fachgebiet, können diese offenen Fragen jedoch weiter behandelt werden.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2016). Erneuerbare Energien. Abgerufen am 15. Mai 2018 von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html>

Energieatlas Bayern (2015). Vergleich der Energieträger. Abgerufen am 22. Mai 2018 von https://www.energieatlas.bayern.de/thema_energie/vergleich.html

Kaltschmitt, M. & Wiese, W. (Hrsg.) (2013). Erneuerbare Energien (5. Aufl). Berlin/Heidelberg: Springer Verlag

Energieatlas Bayern (2017). MISCHPULT "ENERGIEMIX BAYERN VOR ORT". Abgerufen am 02. Juni 2018 von <https://www.energieatlas.bayern.de/kommunen/mischpult.html>

Datenbank MERRA-2