

Regenerative Selbstversorgung eines Industriegebiets im ländlichen Raum der EMN

RegIndGebiet

Analyse der Möglichkeit einer regenerativen, dezentralen Selbstversorgung eines
Industriegebiets im ländlichen Raum der Metropolregion Nürnberg

Abschlussbericht

Projekt Energietechnik
Bachelor Maschinenbau Vertiefungsrichtung Energietechnik
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik

Projektbearbeiter: Hannes Warnhofer
warnhoferha65625@th-nuernberg.de

Datum, Unterschrift: _____

Korrekturleser: Timo Wilfling

Abstract

In dieser Arbeit wird untersucht, wie die regenerative Selbstversorgung eines Industriegebiets in der Europäischen Metropolregion Nürnberg (EMN) erreicht werden kann. Dazu wird zunächst ein beispielhaftes Modellgebiet erstellt, das aus verschiedenen Unternehmen der EMN zusammengesetzt ist und die Basis der weiteren Betrachtung bildet. Der Strom- und Wärmebedarf dieses Gebiets wird aus verschiedenen Daten zum branchenspezifischen Energieverbrauch, dem Umsatz und der Beschäftigtenzahl von Unternehmen in Bayern und Deutschland abgeschätzt und anschließend dem vorhandenen Potenzial zur Wind- und Sonnenenergienutzung gegenübergestellt.

Das Ergebnis der Betrachtung ist, dass eine komplette Selbstversorgung mit elektrischer Energie zwar möglich ist, allerdings nur bei ausreichend hoher Speicherkapazität. Der ergänzende Einsatz von regenerativen Energieformen erscheint sinnvoller und bietet die Möglichkeit einen Großteil des erforderlichen Energiebedarfs zu decken. Im Bereich der Wärmeversorgung bereitet vor allem die Bereitstellung von Prozesswärme aufgrund der hohen erforderlichen Temperatur Probleme, weshalb hier nach aktuellem Stand lediglich ein unterstützender Einsatz von erneuerbaren Energien denkbar und in diesem Bereich noch viel Entwicklungsbedarf vorhanden ist.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis	V
1. Einleitung	1
2. Zielsetzung und Forschungsfragen	2
3. Energiebedarf eines Industriegebiets	4
3.1. Industrie in der EMN	4
3.2. Erstellung des Modellgebiets	6
3.3. Bestimmung des Energiebedarfs	7
3.3.1. Branchenspezifischer Energieverbrauch	7
3.3.2. Anwendung auf Modellgebiet	10
4. Analyse des vorhandenen regenerativen Potenzials.....	14
5. Gegenüberstellung von Bedarf und Potenzial	16
5.1. Versorgung mit Strom	16
5.2. Versorgung mit Wärme	25
6. Fazit	28
Quellenverzeichnis	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Europäische Metropolregion Nürnberg mit den betrachteten Industriegebieten	5
Abbildung 2: Luftaufnahmen der Industrie- und Gewerbegebiete Mitterteich, Dietenhofen, Sonnefeld und Pavelsbach	6
Abbildung 3: Strombedarf des Modellgebiets basierend auf Daten der MDN von 2017.....	12
Abbildung 4: Wärmebedarf des Modellgebiets basierend auf Daten der MDN und der N-ERGIE von 2017	13
Abbildung 5: Solarstrahlung in der EMN 2017.....	14
Abbildung 6: Windgeschwindigkeiten in einer Höhe von 80m in der EMN 2017.....	14
Abbildung 7: Leistungsbeiwert in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für Nordex N117/2400.....	15
Abbildung 8: Theoretischer Speicherinhalt bei Stromversorgung nur mit Photovoltaik im Vergleich.....	17
Abbildung 9: Theoretischer Speicherinhalt bei Stromversorgung nur mit Windkraftanlagen im Vergleich.....	18
Abbildung 10: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 2 WKA und einem 5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%	20
Abbildung 11: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 3 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%.....	21
Abbildung 12: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 3 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 20 %	21
Abbildung 13: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 4 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%.....	22
Abbildung 14: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%.....	23
Abbildung 15: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15% (Winter)	23
Abbildung 16: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15% (Sommer).....	24
Abbildung 17: Speicherinhalt und zusätzlich erforderliche Energiebezüge bei einem 0,15 GWh Speicher.....	26

Abbildung 18: Speicherinhalt und zusätzlich erforderliche Energiebezüge bei einem 0,15 GWh Speicher (nur Raumwärme)	27
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Branchen und nutzbare Flächen der betrachteten Betriebe	7
Tabelle 2: Beschäftigte und Umsatz des verarbeitenden Gewerbes in Bayern 2017 nach Wirtschaftsklassen	8
Tabelle 3: Primärenergieverbräuche nach Wirtschaftsklassen bezogen auf Umsatz und Beschäftigtenzahl in Bayern 2017	9
Tabelle 4: Primärenergieverbräuche nach Wirtschaftsklassen bezogen auf Umsatz und Beschäftigtenzahl in Deutschland 2017	10
Tabelle 5: Abgeschätzter Wärme- und Strombedarf der untersuchten Unternehmen	11
Tabelle 6: Kombinationen aus PV, Windkraft und einem Speicher	19

1. Einleitung

Seit dem Beginn der Industrialisierung und der fortschreitenden technischen Entwicklung wird von der Weltbevölkerung eine Vielzahl von Gasen freigesetzt, die den natürlichen Treibhauseffekt der Atmosphäre verstärken. Durch den damit einhergehenden Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur werden voraussichtlich schwerwiegende Änderungen im Klimageschehen ausgelöst, welche großen Einfluss auf den Menschen und die Ökosysteme der Erde haben. Den größten Anteil am anthropogenen Treibhauseffekt hat Kohlenstoffdioxid (CO₂), weshalb von der Bundesregierung das Ziel formuliert wurde, dessen Ausstoß verbindlich zu minimieren und eine Energiepolitische Entwicklung in Richtung einer nachhaltigen Energiewirtschaft zu fördern (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018).

Die Europäische Metropolregion Nürnberg (nachfolgend EMN genannt) möchte bei der Durchführung dieser Energiewende eine richtungsweisende Position einnehmen. Es wurde deshalb im Jahr 2012 ein Klimapakt verabschiedet, welcher darauf abzielt die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 um 80 % bezogen auf die Emissionen von 1990 zu reduzieren. Maßnahmen die das Erreichen dieses Ziel unterstützen sollen sind beispielsweise der erweiterte Einsatz von erneuerbaren Energien zur Strom- und Wärmeerzeugung, der verstärkte Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen oder die Reduktion des Pendleraufkommens in der EMN (Metropolregion Nürnberg, 2017).

Vor diesem Hintergrund werden von den Studierenden des Bachelorstudiums Maschinenbau mit Vertiefungsrichtung Energietechnik an der Technischen Hochschule Nürnberg verschiedene Fragestellungen im Rahmen einer Projektarbeit unter der Leitung von Professor Dr.-Ing. Matthias Popp ausgearbeitet und untersucht.

2. Zielsetzung und Forschungsfragen

In den Jahren 1990 bis 2016 waren Industrieprozesse und die Energiebereitstellung für Industrieunternehmen im Durchschnitt für ca. 21 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen in Deutschland verantwortlich (Umweltbundesamt, 2016). Die Umstellung auf regenerativ erzeugte Energieformen bei der Versorgung von Industrieunternehmen ist somit ein wichtiger Schritt im Rahmen der CO₂ Einsparung. In dieser Projektarbeit wird untersucht, welche Möglichkeiten sich hierbei speziell im Fall eines Industriegebietes im ländlichen Raum der EMN ergeben. Die lokale Anhäufung von Betrieben bietet dabei die besondere Möglichkeit, die verbauten Flächen energietechnisch effizient zu nutzen und die vorhandene Energie unternehmensübergreifend einzusetzen.

Für die Untersuchung ist es zunächst erforderlich den Bedarf eines solchen Gebiets bestimmen zu können. Im Zuge dessen werden einige Industriegebiete in der EMN betrachtet, um daraus ein beispielhaftes Gebiet zusammenzustellen, das die Grundlage dieser Betrachtungen bildet. Anschließend wird auf Basis der jeweiligen Gewerbezweige, des Umsatzes und der Beschäftigtenzahl der Energiebedarf der angesiedelten Unternehmen abgeschätzt und dessen zeitlicher Verlauf simuliert. Dabei wird auf Daten zum branchenbezogenen Energieverbrauch des bayerischen Landesamts für Statistik und des Statistischen Bundesamts, sowie auf die Lastverläufe der Main-Donau-Netzgesellschaft zurückgegriffen.

Der Bedarf des beispielhaften Gebiets wird dem verfügbaren regenerativen Energiepotenzial gegenübergestellt um eine Aussage darüber treffen zu können, ob die benötigte Energie im direkten Umfeld eines Industriegebiets bereitgestellt werden kann, beziehungsweise in welchem Maß der Bedarf damit gedeckt werden kann. Das vorhandene Potenzial wird aus den Wind- und Sonneneinstrahlungsdaten der MERRA-2 Datenbank der NASA bestimmt. Anschließend wird untersucht welche Kombination aus Solaranlagen, Windkraftanlagen und einem Energiespeicher eine Selbstversorgung des Industriegebiets ermöglichen, beziehungsweise den Einsatz herkömmlicher Energieträger minimieren können.

Die folgenden Fragen dienen als Grundlage der Arbeit und sollen in ihrem Verlauf auf Basis von wissenschaftlichen Erkenntnissen beantwortet werden:

- Wie sieht ein beispielhaftes Industriegebiet im ländlichen Raum der EMN bezogen auf den Strom- und Wärmebedarf in Abhängigkeit der angesiedelten Industrie aktuell aus?
- Wie kann dieser Bedarf mit regional vorhandenen Möglichkeiten nachhaltig gedeckt werden und ein gegebenenfalls auftretender Energieüberschuss effizient genutzt werden?
- Wie können regenerative Energiepotenziale ergänzend zu konventioneller Energiebereitstellung die Nachhaltigkeit eines Industriegebiets im ländlichen Raum der EMN verbessern?

Im Zuge der Beantwortung dieser Fragen wird eine Möglichkeit zur einfachen branchenspezifischen Bestimmung des Strom- und Wärmebedarfs von Industrieunternehmen untersucht. Dieser Bedarf ist häufig nur aufwändig für jeweils einzelne Unternehmen zu bestimmen und eine leichtere überschlagsmäßige Abschätzung kann beispielsweise die Planung von Energieversorgungsanlagen erleichtern.

3. Energiebedarf eines Industriegebiets

Zunächst muss der Bedarf eines Industriegebiets bestimmt werden. Die besondere Herausforderung ist, dass es im Allgemeinen keine Daten zum Energieverbrauch einzelner Unternehmen gibt und diese in der Regel keine Auskunft darüber geben. Um ein beispielhaftes Gebiet erstellen und somit eine allgemeingültige Aussage über die Möglichkeit der regenerativen Selbstversorgung treffen zu können, wird zunächst untersucht welche Industriezweige in der EMN angesiedelt sind und anschließend werden einige vorhandene Industriegebiete betrachtet.

3.1. Industrie in der EMN

Bei einem Industriegebiet handelt es sich laut Definition um ein Gebiet, das im Flächennutzungsplan einer Gemeinde als Standort für Industrieunternehmen bestimmt ist. Der Fokus liegt hierbei meist auf Industriebetrieben, die einen hohen Grad an Umweltverschmutzung oder Lärm verursachen und somit von Wohngebieten oder anderen Betrieben separiert niedergelassen sind (Neumair & Haas, 2018). Gebiete, die im normalen Sprachgebrauch als Industriegebiete bezeichnet werden sind allerdings häufig Gewerbegebiete, in denen sich neben Industrieunternehmen mit einem verträglichen Maß an Lärm- und Schadstoffemissionen zumeist noch Handels-, Handwerks- oder Bauunternehmen angesiedelt sind. In dieser Untersuchung liegt der Fokus auf Betrieben des verarbeitenden Gewerbes und aus den betrachteten Beispielgebieten werden lediglich die Unternehmen untersucht und in das Modellgebiet aufgenommen, die diesem zugeordnet werden können.

In Abbildung 1 ist eine Übersicht der Metropolregion Nürnberg dargestellt. Mit dem Landkreis Sonneberg ist darin auch ein Landkreis aus Thüringen vertreten. Die Daten des Energieverbrauchs und der Umsatz- und Beschäftigtenverhältnisse dieses Kreises werden in der statistischen Auswertung der Einfachheit wegen nicht betrachtet, da vom bayerischen Landesamt für Statistik diesbezüglich keine Werte vorliegen. Da es sich nur um einen von 33 Kreisen handelt, der nicht in die Betrachtung einfließt, wäre der zusätzliche Rechercheaufwand in Bezug auf den Mehrwert an Informationen zu hoch.

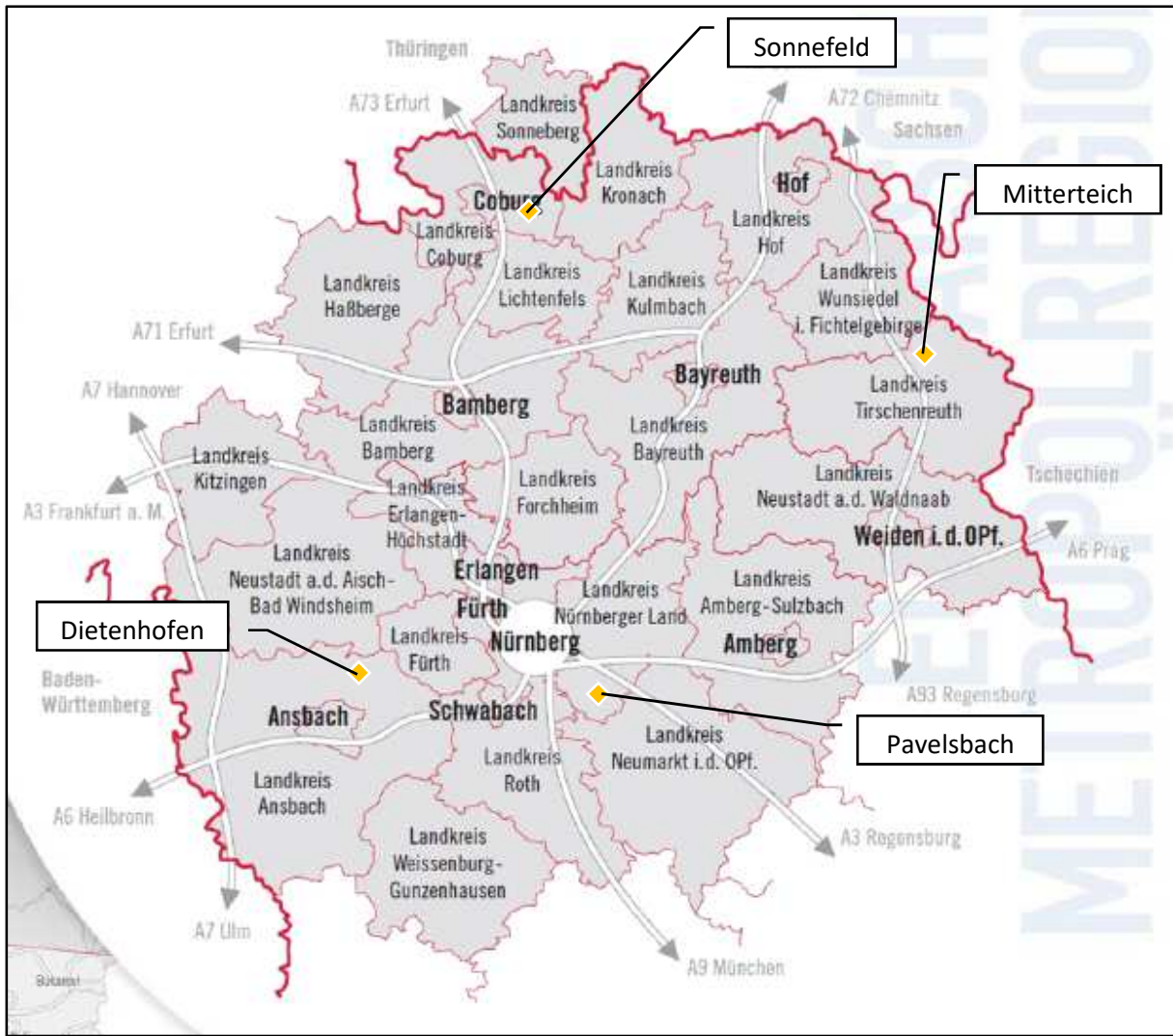


Abbildung 1: Europäische Metropolregion Nürnberg mit den betrachteten Industriegebieten (Europäische Metropolregion Nürnberg, 2016)

3.2. Erstellung des Modellgebiets

Im folgenden Abschnitt werden vier Industriegebiete in der EMN untersucht, um deren verwertbare Daten anschließend für die Erstellung eines Modellgebiets heranziehen zu können. Diese wurden zufällig ausgewählt und die dort ansässigen Betriebe des verarbeitenden Gewerbes untersucht. In Abbildung 2 ist für jedes der Gebiete eine Luftbildansicht zu sehen, in welcher die Grundstücke der jeweiligen Unternehmen dargestellt sind. Dabei sind die freien Dachflächen grün und andere freie Flächen, die beispielsweise aus Park- oder Lagerplätzen bestehen, orange gefärbt. Die jeweiligen Nummern erlauben die Zuordnung zu den einzelnen Betrieben in Tabelle 2.



Abbildung 2: Luftaufnahmen der Industrie- und Gewerbegebiete Mitterteich (oben links), Dietenhofen (oben rechts), Sonnefeld (unten links) und Pavelsbach (unten rechts) (Bayerische Vermessungsverwaltung, 2018)

Dabei ist zu beachten, dass nur die verfügbaren Flächen und der Energiebedarf derjenigen Betriebe in die spätere Betrachtung einfließen, bei denen eine ausreichende Datengrundlage bezüglich Beschäftigtenzahl oder Umsatz vorhanden ist. In Tabelle 1 ist eine Übersicht über die verwendeten Betriebe tabellarisch aufgelistet. Die Luftaufnahmen sind dem Energie-Atlas Bayern entnommen und durch nachzeichnen der jeweiligen Gebäude- und Grundstücksgrundrisse wurden die nutzbaren Flächen ermittelt.

Nr.	Unternehmen	Branche	Dachfläche [m ²]	Gesamtfläche [m ²]
Standort: Mitterteich				
1	Glapor	Schaumglasprodukte	35.923	59.746
Standort: Dietenhofen				
2	Branofilter	Filterherstellung (Papier & Kunststoff)	10.328	26.815
3	Karl Linhardt GmbH	Maschinenbau	2.452	8.623
4	August Benker e.K.	Verpackungen (Papier & Kunststoff)	3.009	6.752
Standort: Sonnefeld				
5	Terra-Tec	Maschinenbau	6.612	8.726
6	Kaeser Kompressoren	Maschinenbau	7.347	16.116
7	Sobaplast	Kunststoffhersteller	1.632	3.805
8	Hauck	Kunststoff- & Metallverarbeitung	16.746	25.776
9	dressel prototec	Metallverarbeitung	3.457	8.647
Standort: Pavelsbach				
10	IREMA Filter GmbH	Filterherstellung (Papier & Kunststoff)	4.850	13.349
11	Schaller GmbH	Elektronik- & Metallverarbeitung	3.525	8.302
12	Bock 1 GmbH & Co KG	Möbelherstellung (Kunststoff)	41.021	77.332
Fläche Gesamt:			136.902	263.989

Tabella 1: Branchen und nutzbare Flächen der betrachteten Betriebe

3.3. Bestimmung des Energiebedarfs

Im folgenden Abschnitt wird erläutert, wie der Energiebedarf des Modellgebiets ermittelt wird. Dabei werden zunächst die zugrunde liegenden Daten vorgestellt und ausgewertet und das Ergebnis anschließend auf das Modellgebiet angewendet.

3.3.1. Branchenspezifischer Energieverbrauch

Um den Energiebedarf in Abhängigkeit bestimmter Unternehmenskriterien abschätzen zu können, werden verschiedene Statistiken zum Energieverbrauch und zur Beschäftigten- und Umsatzzahl herangezogen. Das Ziel ist einen branchenspezifischen mittleren Energieverbrauch bezogen auf die Beschäftigtenzahl und auf die Umsatzzahl zu erhalten.

Zunächst wird untersucht, in welchen Wirtschaftsklassen wie viele Personen beschäftigt sind und welcher Umsatz im Jahr erwirtschaftet wird. Dabei werden zunächst die Daten für Bayern aus dem Jahr 2017 betrachtet, welche den aktuellsten Stand der zugänglichen Datenerfassung wiedergeben (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2018). In Tabelle 2 sind diese in Abhängigkeit ihrer Wirtschaftsklasse aufgelistet. Die Wirtschaftsklassen wurden 2008 von der Bundesagentur für Arbeit definiert, um Unternehmensdaten in amtlichen Statistiken vergleichbar darstellen zu können (Bundesagentur für Arbeit, 2017). WZ2008 bezeichnet dabei die Kennziffer, welche von der Bundesagentur für die jeweilige Gruppe festgelegt wurde.

WZ 2008	Bezeichnung	Beschäftigte	Umsatz in Tsd.€
10	H. v. Nahrungs- u. Futtermitteln	112 990	25 932 967
11	Getränkeherstellung	15 597	3 801 906
12	Tabakverarbeitung	k. A.	k. A.
13	H. v. Textilien	13 272	2 748 124
14	H. v. Bekleidung	10 083	2 136 670
15	H. v. Leder, Lederwaren u. Schuhen	11 408	1 688 809
16	H. v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (ohne Möbel)	16 686	4 044 335
17	H. v. Papier, Pappe u. Waren daraus	21 307	5 754 801
18	H. v. Druckerzeugnissen, Vervielfältigung v. Ton-, Bild-, Datenträgern	19 169	2 968 727
19	Kokerei u. Mineralölverarbeitung	k. A.	k. A.
20	H. v. chem. Erzeugnissen	55 054	16 263 071
21	H. v. pharmazeutischen Erzeugnissen	7 691	1 883 924
22	H. v. Gummi- u. Kunststoffwaren	78 158	14 166 179
23	H. v. Glas-, -waren, Keramik, Verarbeitung v. Steinen u. Erden	47 545	8 584 622
24	Metallerzeugung u. -bearbeitung	26 085	7 195 219
25	H. v. Metallerzeugnissen	106 725	17 429 640
26	H. v. DV-Geräten, elektronischen u. optischen Erzeugnissen	86 703	31 896 726
27	H. v. elektr. Ausrüstungen	119 774	28 391 590
28	Maschinenbau	227 235	52 189 870
29	H. v. Kraftwagen u. Kraftwagenteilen	205 425	109 608 211
30	Sonstiger Fahrzeugbau	31 479	11 076 223
31	H. v. Möbeln	22 108	4 305 134
32	H. v. sonst. Waren	29 016	5 340 787
33	Reparatur u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen	22 100	3 578 432
C	Verarbeitendes Gewerbe Gesamt	1 288 853	368 834 089

Tabelle 2: Beschäftigte und Umsatz des verarbeitenden Gewerbes in Bayern 2017 nach Wirtschaftsklassen

Diese Daten werden nun den Energieverbräuchen der jeweiligen Wirtschaftsklassen gegenübergestellt, welche ebenfalls vom Landesamt für Statistik veröffentlicht wurden (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2018). Dabei sind die Wirtschaftszweige 10 und 11 (Nahrungsmittel- und Getränkeherstellung), sowie 20 und 21 (chemische und

pharmazeutische Erzeugnisse) jeweils zu einem Zweig zusammengefasst. Für die Wirtschaftszweige 12, 14, 15, 19, 27 und 30 wurden für Bayern keine spezifischen Daten zum Energieverbrauch veröffentlicht. Für die fehlenden Wirtschaftszweige kann der umsatz- und beschäftigtenbezogene Energieverbrauch aus den Daten für Gesamtdeutschland berechnet werden, wo die Daten für alle Wirtschaftszweige vorliegen (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018). Mit den Daten aus Tabelle 2 und den entsprechenden Daten für Deutschland werden die Verbräuche auf die Beschäftigtenzahl und den Umsatz bezogen. Des Weiteren ist das Verhältnis von Stromverbrauch zum gesamten Primärenergieverbrauch dargestellt.

WZ 2008	Bezeichnung	PEV in GJ je Beschäftigte	PEV in GJ je Mio.€ Umsatz	Stromanteil am PEV
10, 11	H. v. Nahrungs-, Futtermittel & Getränken	295	1.278	27%
13	H. v. Textilien	264	1.275	44%
16	H. v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (ohne Möbel)	1.121	4.250	15%
17	H. v. Papier, Pappe u. Waren daraus	2.538	9.098	30%
18	H. v. Druckerzeugnissen, Vervielfältigung v. Ton-, Bild-, Datenträgern	189	1.240	42%
20, 21	H. v. chem. U. pharmaz. Erzeugnissen	1.143	3.933	35%
22	H. v. Gummi- u. Kunststoffwaren	180	983	63%
23	H. v. Glas-, -waren, Keramik, Verarbeitung v. Steinen u. Erden	1.260	6.478	16%
24	Metallerzeugung u. -bearbeitung	640	3.020	54%
25	H. v. Metallerzeugnissen	102	633	56%
26	H. v. DV-Geräten, elektronischen u. optischen Erzeugnissen	65	157	69%
28	Maschinenbau	82	385	49%
29	H. v. Kraftwagen u. Kraftwagenteilen	106	174	50%
31	H. v. Möbeln	86	443	41%
32	H. v. sonst. Waren	70	378	57%
33	Reparatur u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen	26	158	38%

Tabelle 3: Primärenergieverbräuche nach Wirtschaftsklassen bezogen auf Umsatz und Beschäftigtenzahl in Bayern 2017

WZ 2008	Bezeichnung	PEV in GJ je Beschäftigte	PEV in GJ je Mio.€ Umsatz	Stromanteil am PEV
12	Tabakverarbeitung	227	171	40%
14	H. v. Bekleidung	40	167	38%
15	H. v. Leder, Lederwaren u. Schuhen	64	352	39%
19	Kokerei u. Mineralölverarbeitung	22.757	5.797	6%
27	H. v. elektr. Ausrüstungen	68	292	58%
30	Sonstiger Fahrzeugbau	90	232	42%

Tabelle 4: Primärenergieverbräuche nach Wirtschaftsklassen bezogen auf Umsatz und Beschäftigtenzahl in Deutschland 2017

Es handelt sich bei den ermittelten Werten jeweils um den Primärenergieverbrauch (PEV). Dieser beschreibt den insgesamt erforderlichen Einsatz von Energieträgern zur Bereitstellung der benötigten Energie, also den tatsächlichen Verbrauch der Unternehmen zuzüglich der Umwandlungs- und Übertragungsverluste. Um abschätzen zu können, wie viel Energie vom Modellgebiet tatsächlich benötigt wird, ist es erforderlich den Primärenergieverbrauch auf den Endenergieverbrauch (EEV) umzurechnen. Hierfür wird eine Publikation herangezogen, in welcher der Primär- und Endenergieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes für das Jahr 2016 dargestellt ist (Statistisches Bundesamt (Destatis), 2017). Daraus ergibt sich der folgende Umrechnungsfaktor.

$$UF_{EEV} = \frac{EEV}{PEV} = \frac{2598247 \text{ TJ}}{3813800 \text{ TJ}} = 68,13 \%$$

Der Endenergieverbrauch berechnet sich aus dem Stromverbrauch, welcher keinen großen Verlusten mehr unterliegt, sowie dem restlichen Primärenergieverbrauch multipliziert mit dem Umrechnungsfaktor.

3.3.2. Anwendung auf Modellgebiet

In diesem Abschnitt wird die soeben vorgestellte Methode auf die Unternehmen des Modellgebiets angewendet. Dabei ist es erforderlich den Umsatz oder die Beschäftigtenzahl der Betriebe zu kennen. Diese wurden zum Teil den Internetseiten der jeweiligen Unternehmen oder den Internetseiten von Kompass (KOMPASS S.A., 2018), der IHK Bayern (Industrie- und Handelskammer Bayern, 2018) oder Bayern International (Bayerische Gesellschaft für Internationale Wirtschaftsbeziehungen mbH, 2018) entnommen. Sind die Beschäftigtenzahl und der Umsatz bekannt, wird ein Mittelwert aus den beiden errechneten

Energieverbräuchen ermittelt, ansonsten mit dem jeweiligen bekannten Wert gerechnet. Bei den Unternehmen, die nicht eindeutig einer Wirtschaftsklasse zugeordnet werden können, wird jeweils der Mittelwert des Verbrauchs berechnet, der sich bei den jeweiligen Wirtschaftsklassen ergibt. Nachfolgend ist ein Berechnungsbeispiel anhand der Unternehmensdaten der Firma Bock 1 GmbH & Co KG vorgestellt. Das Unternehmen ist in der Branche Möbelindustrie eingeordnet und hat am Standort in Pavelsbach ungefähr 600 Mitarbeiter und einen geschätzten Jahresumsatz von 30 Mio. € (Die Deutsche Wirtschaft, 2018). Der Energiebedarf wird mit den Werten der Wirtschaftsklasse 32 aus Tabelle 3 wie folgt berechnet.

$$\text{Wärmebedarf}_{\text{Umsatz}} = 443 \frac{\text{GJ}}{\text{Mio.€}} \cdot 30 \text{ Mio.€} \cdot (1 - 41,11\%) \cdot UF_{\text{EEV}} = 5.332 \text{ GJ}$$

$$\begin{aligned} \text{Wärmebedarf}_{\text{Beschäftigte}} &= 86 \frac{\text{GJ}}{\text{Person}} \cdot 600 \text{ Personen} \cdot (1 - 41,11\%) \cdot UF_{\text{EEV}} \\ &= 20.703 \text{ GJ} \end{aligned}$$

$$\text{Wärmebedarf} = \frac{5.332 \text{ GJ} + 20.703 \text{ GJ}}{2} = 13.017 \text{ GJ}$$

$$\text{Strombedarf}_{\text{Umsatz}} = 443 \frac{\text{GJ}}{\text{Mio.€}} \cdot 30 \text{ Mio.€} \cdot 41,11\% = 5.464 \text{ GJ}$$

$$\text{Strombedarf}_{\text{Beschäftigte}} = 86 \frac{\text{GJ}}{\text{Person}} \cdot 600 \text{ Personen} \cdot 41,11\% = 21.213 \text{ GJ}$$

$$\text{Strombedarf} = \frac{5.464 \text{ GJ} + 21.213 \text{ GJ}}{2} = 13.339 \text{ GJ}$$

In Tabelle 5 sind die berechneten Wärme- und Stromverbräuche für alle betrachteten Unternehmen mit den jeweiligen Wirtschaftsklassen dargestellt.

Nr.	Unternehmen	WZ2008	Wärmebedarf [GJ/a]	Strombedarf [GJ/a]
1	Glapor	23	25.165	6.886
2	Branofilter	17	141.689	87.127
3	Karl Linhardt GmbH	25	1.828	3.437
4	August Benker e.K.	22	1.010	2.512
5	Terra-Tec	28	721	1000
6	Kaeser Kompressoren	28	2.873	3.983
7	Sobaplast	22	590	1.467
8	Hauck	30 und 31	768	799
9	dressel prototec	25	1.928	3.624
10	IREMA Filter GmbH	17 und 29	27.123	17.235
11	Schaller GmbH	32	1.094	2.140
12	Bock 1 GmbH & Co KG	31	13.017	13.339
Bedarf Gesamt:			217.806	143.546

Tabelle 5: Abgeschätzter Wärme- und Strombedarf der untersuchten Unternehmen

Es ergeben sich somit für das gesamte Modellgebiet ein jährlicher Wärmebedarf von 217.806 GJ und ein jährlicher Strombedarf von 143.546 GJ. Dies entspricht einem mittleren Wärmeverbrauch von 6.907 kW und einem mittleren Stromverbrauch von 4.552 kW. Der zeitliche Verlauf des Bedarfs soll nun anhand bestehender Lastverläufe innerhalb der EMN simuliert werden.

Zunächst wird hierfür der Lastverlauf des Stromnetzes der Main-Donau Netzgesellschaft (MDN) aus dem Jahr 2017 betrachtet. Dieser wurde aus der Summe der dezentralen Netzeinspeisung und der Höchstlast aus dem Übertragungsnetz ermittelt und anschließend auf stündliche Werte reduziert, um die Datenmenge zu verringern und im weiteren Verlauf eine bessere Vergleichbarkeit mit den Wetterdaten zu gewährleisten. Im Jahr 2017 beträgt der Mittelwert des Stromverbrauchs für das gesamte Gebiet der MDN 1.009.944 kW (Main-Donau Netzgesellschaft mbH, 2018). Der Verbrauchsverlauf wird nun auf das Modellgebiet skaliert, in dem er mit dem Verhältnis der beiden mittleren Verläufe multipliziert wird.

$$\text{Skalierungsfaktor Strom} = \frac{4.552 \text{ kW}}{1.009.944 \text{ kW}} = 4,5072 \cdot 10^{-3}$$

Der Stromverbrauch des Modellgebiets ist in Abbildung 3 dargestellt.

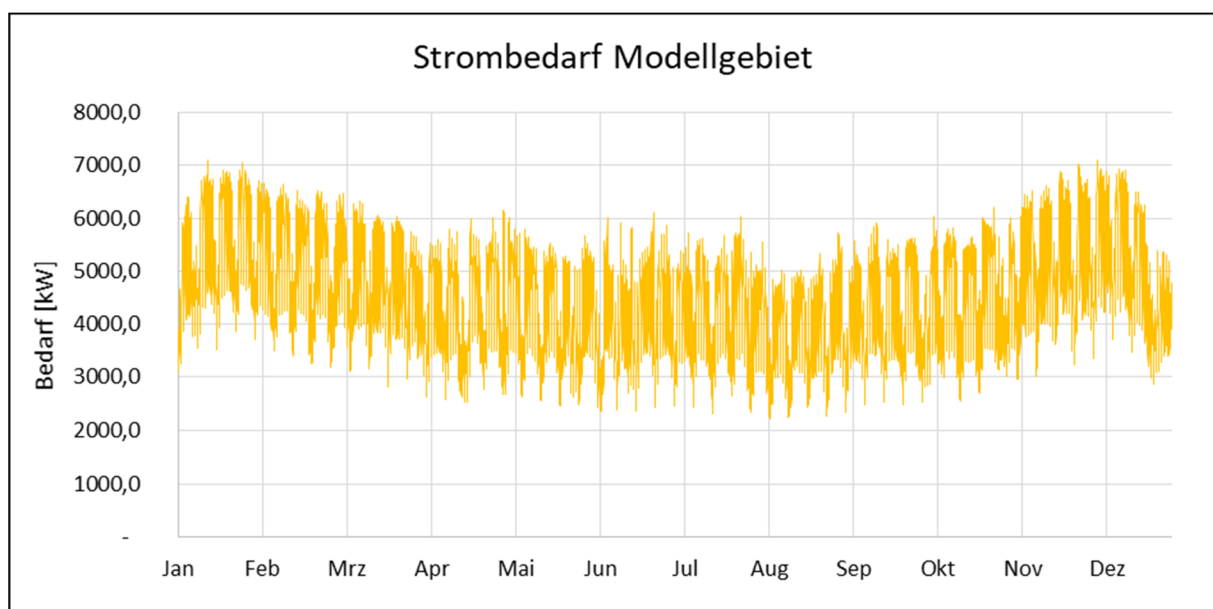


Abbildung 3: Strombedarf des Modellgebiets basierend auf Daten der MDN von 2017

Der zeitliche Verlauf des Wärmebedarfs wird in zwei Teilen betrachtet, da in Industrieunternehmen zum einen die Gebäude geheizt werden müssen und zum anderen ein von der Umgebungstemperatur unabhängiger Prozesswärmebedarf besteht. Der Anteil der Prozesswärme am gesamten Wärmeverbrauch der Industrie lag im Jahr 2016 bei 90,7 %

(Umweltbundesamt, 2018), was für unser Modellgebiet einen mittleren Prozesswärmebedarf von 6.266 kW und einen mittleren Raumwärmebedarf von 640 kW ergibt. Die Prozesswärme wird für die Durchführung von Fertigungsprozessen benötigt, welche zwar in vielen Betrieben auch nachts ablaufen, allerdings in geringerem Ausmaß. Der Verlauf des Prozesswärmebedarfs orientiert sich deshalb wie der Stromverbrauch an den Daten der Main-Donau Netzgesellschaft, da dieser Verlauf dem Wärmebedarf wahrscheinlich ähnelt. Der Verlauf des Wärmebedarfs für Warmwasser und Gebäudeheizung wird mit den Fernwärmedaten der N-ERGIE bestimmt, da diese zum Großteil den Wärmebedarf der privaten Haushalte wiedergeben (N-ERGIE Aktiengesellschaft, 2018). Zunächst wird geschaut, welcher Wärmebedarf bei Temperaturen von über 20 °C vorliegt. Es handelt sich dabei höchstwahrscheinlich um die Großkunden des Fernwärmenetzes, weil bei solchen Temperaturen im Normalfall keine Gebäudebeheizung mehr erfolgt. Der Verbrauchsverlauf wird nun um 30.000 kW reduziert, was auf einen Mittelwert von 128.670 kW führt. Um die Verbräuche auf das Modellgebiet zu skalieren werden wieder die Mittelwerte der betrachteten Verläufe ins Verhältnis gesetzt.

$$\text{Skalierungsfaktor Prozesswärme} = \frac{6.266 \text{ kW}}{1.009.944 \text{ kW}} = 6,2047 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Skalierungsfaktor Raumwärme} = \frac{640 \text{ kW}}{128.670 \text{ kW}} = 4,9753 \cdot 10^{-3}$$

Aus den Lastverläufen der Main-Donau Netzgesellschaft und der N-ERGIE ergeben sich somit die in Abbildung 4 dargestellten Wärmebedarfsverläufe für das Modellgebiet.

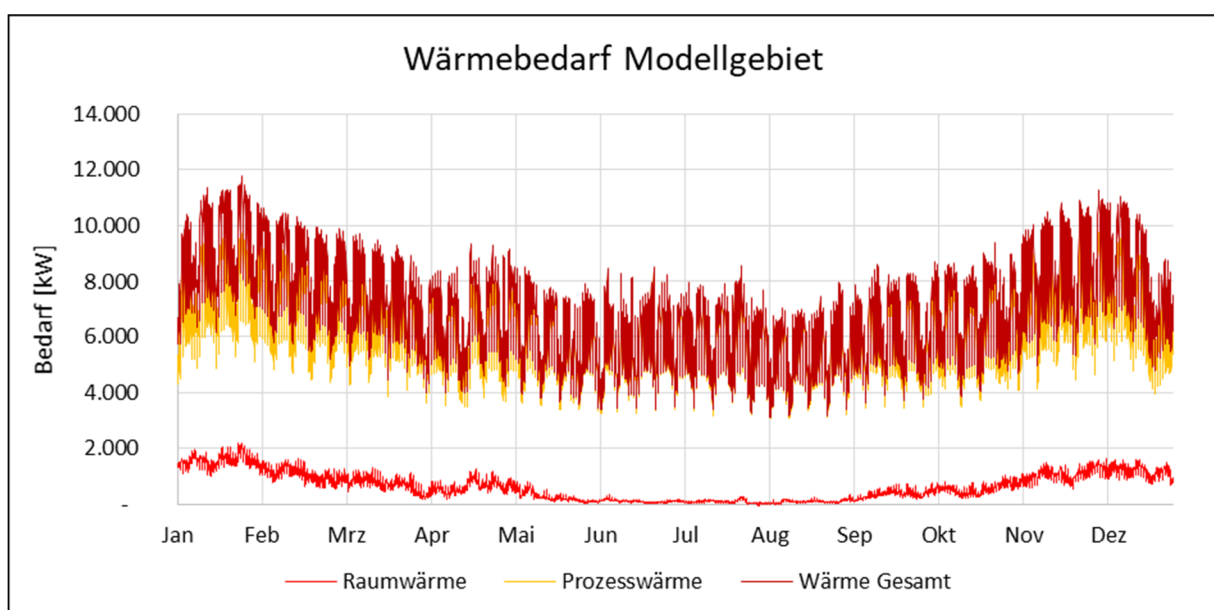


Abbildung 4: Wärmebedarf des Modellgebiets basierend auf Daten der MDN und der N-ERGIE von 2017

4. Analyse des vorhandenen regenerativen Potenzials

In diesem Abschnitt wird untersucht, welche regenerativen Energiepotenziale in dem Modellgebiet vorhanden sind. Die verfügbare Solar- und Windenergie wird jeweils mit den MERRA-2 Wetterdaten der NASA und dem von Professor Dr. Popp bereitgestellten Analysetool ermittelt. Es werden die Wetterdaten aus dem Jahr 2017 für die EMN herangezogen. In den Abbildungen 5 und 6 sind die eintreffende Globalstrahlung in der Ebene, sowie die Windgeschwindigkeiten in 80m Höhe im zeitlichen Verlauf für 2017 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Solarstrahlung jede Nacht auf 0 W/m² abnimmt, was in der Abbildung nicht so gut zu erkennen ist.

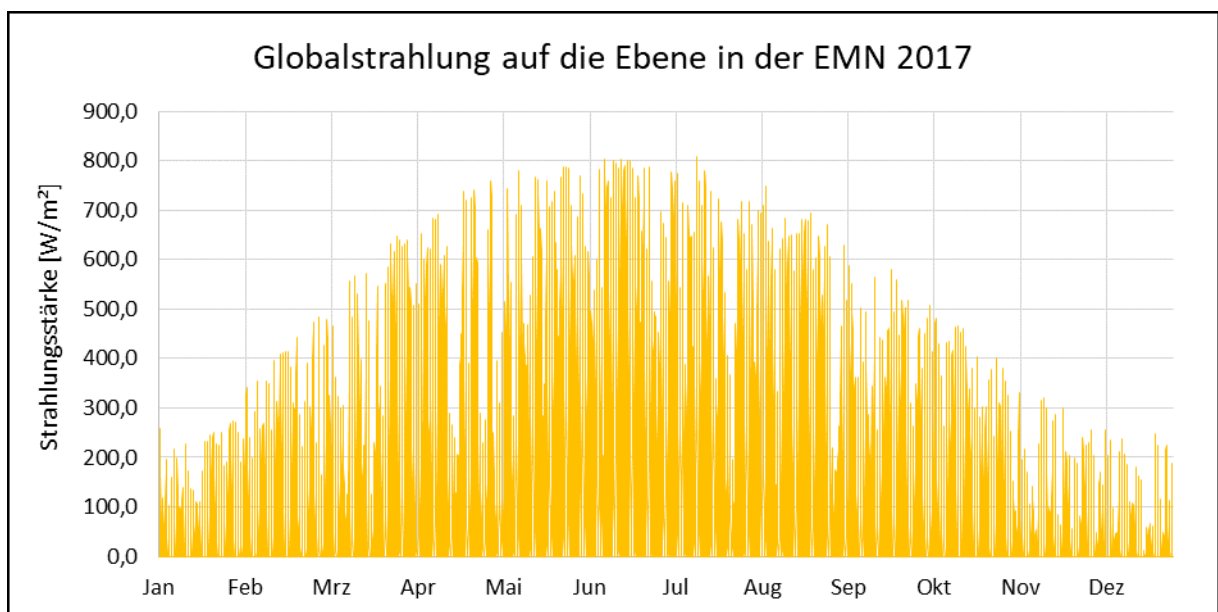


Abbildung 5: Solarstrahlung in der EMN 2017

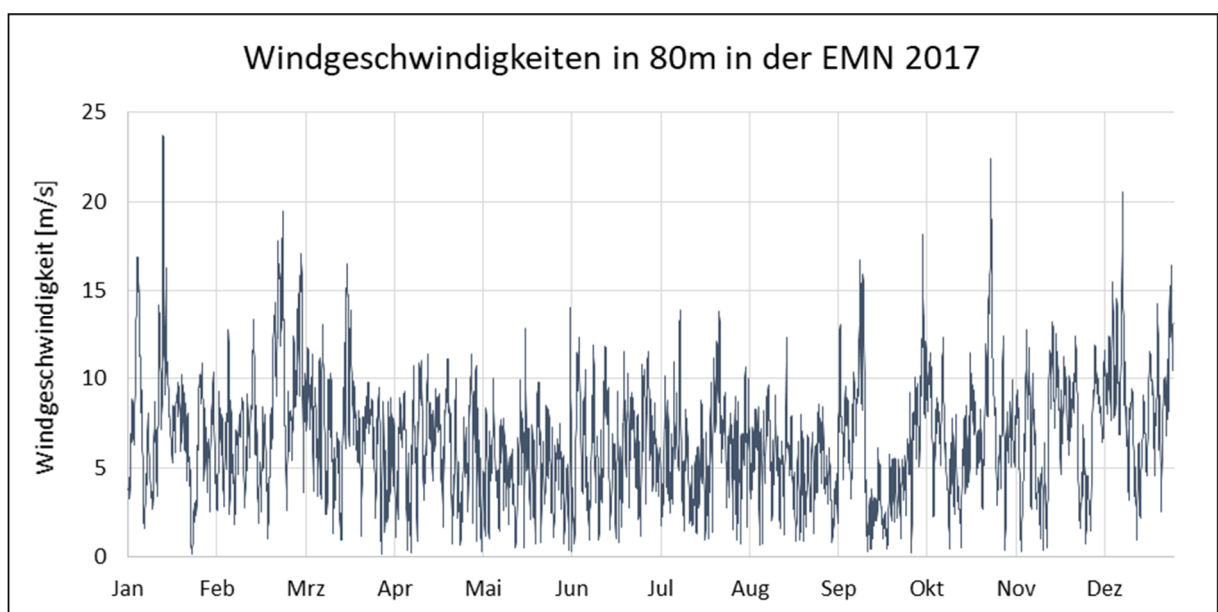


Abbildung 6: Windgeschwindigkeiten in einer Höhe von 80m in der EMN 2017

Die im Modellgebiet eintreffende Solarenergie berechnet sich aus der Strahlungsleistung multipliziert mit der jeweiligen betrachteten Fläche. Die mittlere Strahlungsstärke im Fall eines Energieeintrages, also wenn die Bestrahlungsstärke größer als 0 W/m² ist, beträgt im betrachteten Zeitraum 237,0 W/m². Die nutzbare Energie ist aufgrund des Umwandlungswirkungsgrades der eingesetzten Solarthermie- oder Photovoltaikkollektoren, sowie der maximalen Leistung, auf welche diese begrenzt sind, jedoch deutlich geringer als die tatsächlich eintreffende Energie. Wie viel Windenergie genutzt werden kann hängt von der Art der eingesetzten Windkraftanlage (WKA) ab, da diese für bestimmte Windgeschwindigkeiten unterschiedliche Ausnutzungsgrade vorweisen. Es wird eine Anlage gewählt, deren Leistungsbeiwert sich an der Nordex N117/2400 orientiert. Der Verlauf des Leistungsbeiwertes über der Windgeschwindigkeit ist in Abbildung 7 dargestellt und wurde dem Excel-Tool von Prof. Dr. Popp entnommen.

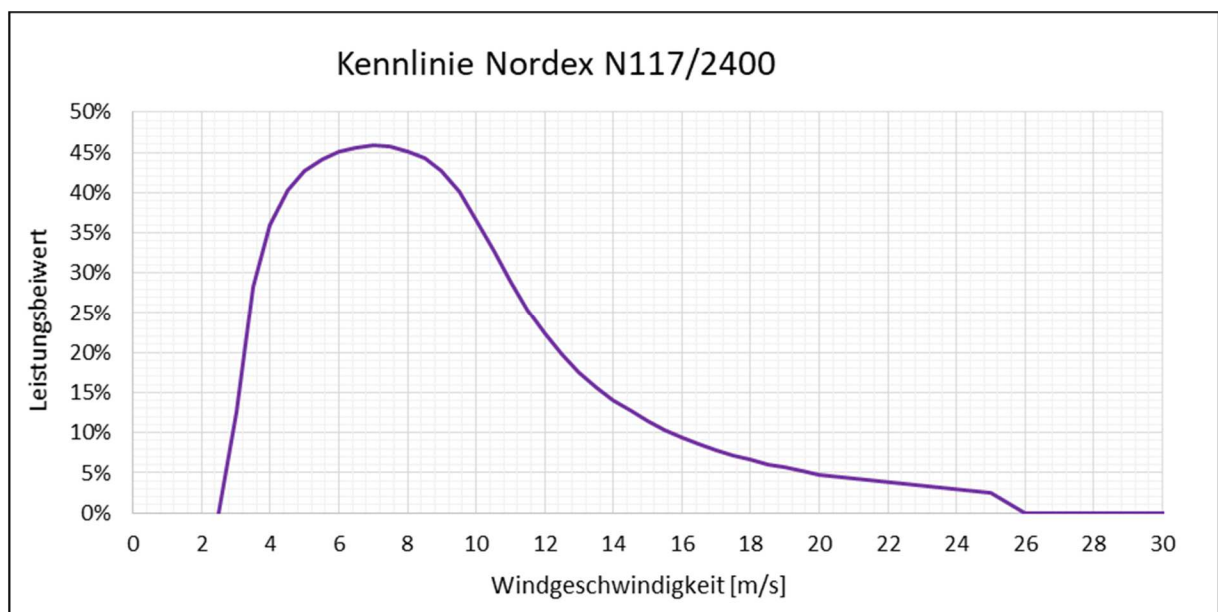


Abbildung 7: Leistungsbeiwert in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit für Nordex N117/2400

Die im Wind spezifische Leistung berechnet sich aus der betrachteten Fläche, der mittleren Luftdichte und der jeweiligen Windgeschwindigkeit wie folgt.

$$P_W = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3$$

Im weiteren Verlauf wird die mittlere Luftdichte zur Vereinfachung als konstant angenommen. Dabei wird die Luft bei 10 °C und 1 bar betrachtet, was eine mittlere Dichte von 1,230 kg/m³ liefert (Quasching, 2015). Die von einer Windkraftanlage entnommene Leistung ermittelt sich mit dem Rotordurchmesser d_R und dem jeweiligen Leistungsbeiwert c_p wie folgt.

$$P_N = c_p(v) \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} d_R^2 \cdot v^3$$

Mit dem Verlauf des Leistungsbeiwertes in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit und dem Verlauf der Windgeschwindigkeit in der EMN für das Jahr 2017 kann somit der Verlauf der nutzbaren Windenergie für die Anlage vom Typ Nordex N117/2400 bestimmt werden.

5. Gegenüberstellung von Bedarf und Potenzial

Im folgenden Abschnitt wird der in Kapitel 3.3.2. ermittelte Energiebedarf den vorhandenen Energiepotenzialen gegenübergestellt und untersucht, welche Kombination aus Solarenergie, Windkraftanlagen und einem Energiespeicher für die Versorgung des Modellgebiets verwendet werden kann, beziehungsweise den Einsatz von konventionellen Energieträgern bestmöglich ergänzt. Zunächst wird die Bereitstellung von elektrischer Energie betrachtet und beurteilt, durch welche Kombination sich die günstigsten Ergebnisse erzielen lassen. Anschließend wird untersucht, wie Geothermie zur Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt werden könnte.

5.1. Versorgung mit Strom

Zur Stromerzeugung können die Solarenergie und die Windenergie verwendet werden. Die nutzbare Solarenergie berechnet sich aus der Gesamtfläche der verbauten Photovoltaikanlagen multipliziert mit deren Wirkungsgrad und der jeweiligen Bestrahlungsstärke. Zur Vereinfachung werden Einflüsse der Windgeschwindigkeit und der Umgebungstemperatur vernachlässigt und ein konstanter Modulwirkungsgrad von 15 % und 20 % im Einsatz verglichen. Die in der Betrachtung verwendeten Windkraftanlagen sind vom Typ Nordex N117/2400 mit einem Rotordurchmesser von 117m und einem Leistungsbeiwertsverlauf wie in Abbildung 7.

Die zur Photovoltaiknutzung zur Verfügung stehende Fläche bestimmt sich aus der Dachfläche abzüglich einem Anteil an nordgeneigten Flächen und freien Flächen für Fenster oder ähnliches. Die betrachteten Dachflächen sind zum größten Teil Flachdächer, auf welche die Solarmodule direkt platziert werden, so dass eine Neigung von 0° vorliegt. Neben der Nutzung der Dachflächen wird untersucht, welches Potenzial die Nutzung der gesamten zur Verfügung stehenden Fläche des Modellgebiets beinhaltet. Um den Anteil der nicht nutzbaren Flächen zu berücksichtigen werden jeweils nur 80 % der beiden Flächen für die Berechnung verwendet. Es stehen somit folgende Flächen für die Module zu Verfügung:

- Nur Dachflächen: ca. 104.000 m² (Fall DF)
- Mit derzeit freien Flächen: ca. 204.000m² (Fall GF)

Ein Energiespeicher soll den am Tag entstehenden Überschuss für die Nacht nutzbar machen, da dort ein tägliches Defizit entsteht. Dabei wird in Anlehnung an einige bestehende Batteriespeichersysteme ein Lade- und Entladewirkungsgrad von je 90% angenommen, was einem Gesamtwirkungsgrad von 81 % entspricht (Quasching, 2015). Dies wird simuliert, indem der vorhandene Energieüberschuss jeweils nur zu 90 % in den Speicher eingetragen wird, also ein Überschuss von 1000 kWh zu einer Speichererhöhung von 900 kWh führt und die Deckung des vorhandenen Defizits immer nur 90 % der entnommenen Energie entsprechen, also die Deckung eines Defizits von 900 kWh den Speicherinhalt um 1000 kWh reduziert. Speicherverluste werden hierbei nicht betrachtet. Die Auswirkung der maximalen Speicherkapazität wird anschließend ebenfalls untersucht.

Zunächst wird verglichen, welche Möglichkeiten sich bei ausschließlicher Photovoltaiknutzung durch einen veränderten Modulwirkungsgrad und die erweiterte Nutzung der Gesamtfläche ergeben. In Abbildung 8 ist der theoretische Speicherinhalt im Jahresverlauf dargestellt.

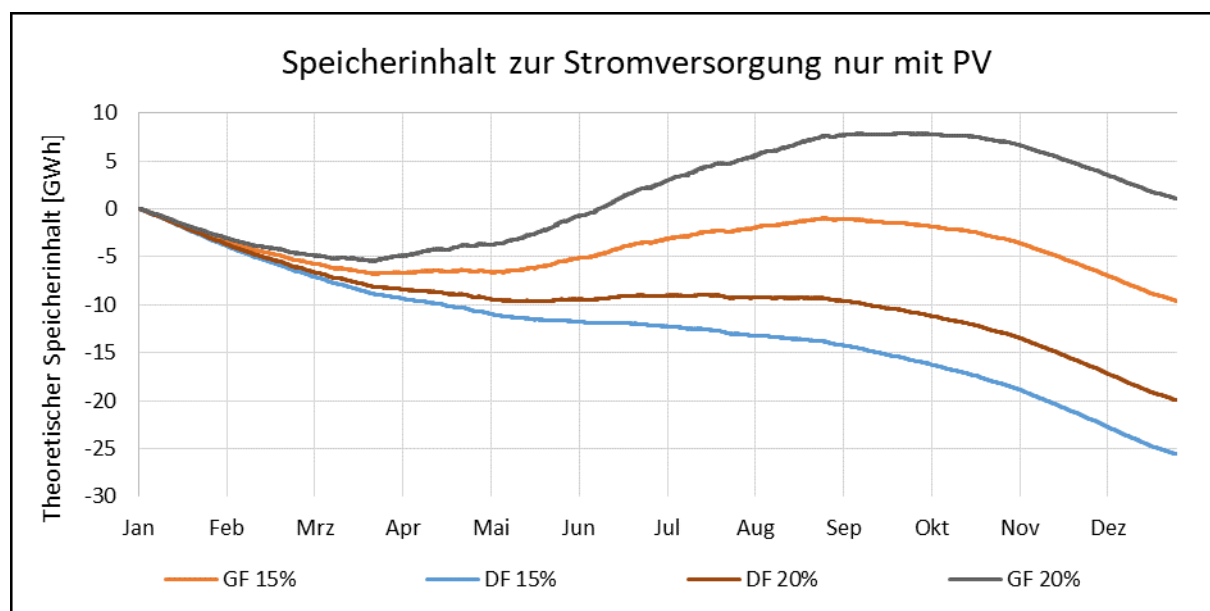


Abbildung 8: Theoretischer Speicherinhalt bei Stromversorgung nur mit Photovoltaik im Vergleich

Es ist zu erkennen, dass lediglich bei der Nutzung der gesamten Fläche des Modellgebiets und einem Modulwirkungsgrad von 20 % am Jahresende ein höherer theoretischer Speicherinhalt vorliegt, als zu Beginn des Jahres. In diesem Fall müssen im Jahresverlauf vom Speicher

insgesamt ca. 22,5 GWh elektrischer Energie zur Verfügung gestellt werden. Dies entspricht etwa 0,56 % der Nettostromerzeugung von 4402 GWh, welche 1996 von allen deutschen Pumpspeicherkraftwerken durchgeführt wurde, was in Bezug auf die Größe des Modellgebiets sehr unrealistisch ist (Quasching, 2015). Die alleinige Stromversorgung mittels Photovoltaik (PV) ist also wie erwartet keine sinnvolle Option. Dem wird nun die Stromerzeugung durch die in Kapitel 4 charakterisierten Windkraftanlagen gegenübergestellt. In Abbildung 9 ist der theoretische Speicherinhalt für 4, 5 und 6 Windkraftanlagen dargestellt.

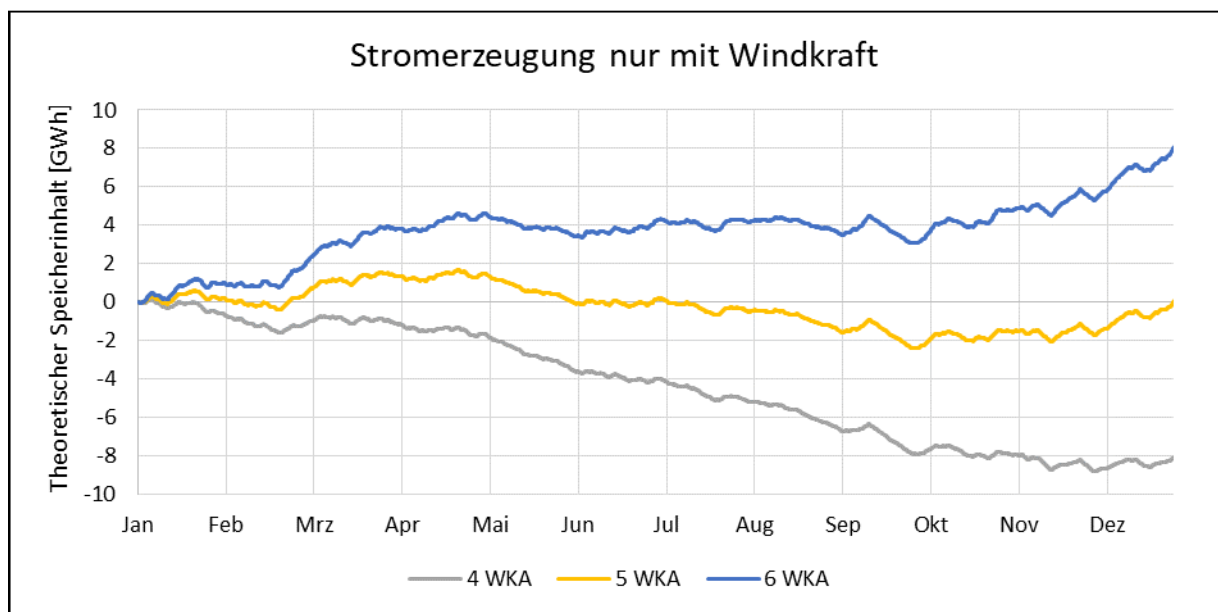


Abbildung 9: Theoretischer Speicherinhalt bei Stromversorgung nur mit Windkraftanlagen im Vergleich

Hier ist ab einer Anzahl von 5 Windkraftanlagen der theoretische Speicherinhalt am Jahresende größer als zu Beginn, also eine übers Jahr gesehen ausreichende Energieversorgung vorhanden. Man kann erkennen, dass die Anzahl der Anlagen eine relativ große Auswirkung auf den Speicherinhalt hat, da die bestehende Windenergie besser genutzt werden kann und somit in Phasen mit guten Windverhältnissen deutlich mehr überschüssige Energie gespeichert werden kann. Es kommt allerdings unabhängig von der Anzahl der Anlagen zu Phasen, in denen die Windenergie aufgrund ungünstiger Windgeschwindigkeiten nicht genutzt werden kann, weshalb bei 6 Anlagen immer noch ca. 6,12 GWh im Jahr zur Verfügung gestellt werden müssen, um die auftretenden Energiedefizite zu decken. Bei 4 Anlagen sind ca. 7,67 GWh und bei 5 Anlagen ca. 6,75 GWh bereitzustellen. Verglichen mit der Solarenergie muss bei der Nutzung der Windenergie deutlich weniger gespeicherte Energie genutzt werden, da diese sowohl im Tagesverlauf als auch im Jahresverlauf viel geringeren Schwankungen unterliegt.

Anschließend werden verschiedene Kombinationen aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen verglichen. Dabei werden zumeist Photovoltaikanlagen mit einem Wirkungsgrad von 15 % in die Betrachtung einbezogen, da dies den in der Realität eingesetzten Modulen entspricht. Außerdem wird das reale Verhalten eines Speichers simuliert und eine maximale Kapazität berücksichtigt, ab der ein Energieüberschuss in das Netz eingespeist oder durch eine entsprechende Anlagenregelung verhindert werden muss. Es treten keine negativen Speicherinhalte mehr auf, sondern bei einem entladenen Speicher wird berechnet, welche Netzbezüge notwendig sind, um das vorhandene Defizit zu decken. Der Anfangszustand des Speichers wird jeweils auf den Jahresendwert gesetzt, da dieser im Folgejahr als Startwert vorhanden wäre. Die Kombinationen werden in Tabelle 6 beschrieben und sind in den nachfolgenden Abbildungen 10 bis 14 sind die jeweiligen Speicherinhalte und erforderlichen Netzbezüge dargestellt.

Bezeichnung	Fläche für PV	η PV	Anzahl WKA	Speicherkapazität
2WKA-DF-S5	Dachfläche	15 %	2	5 GWh
2WKA-GF-S5	Gesamtfläche	15 %	2	5 GWh
3WKA-DFa-S0,5	Dachfläche	15 %	3	0,5 GWh
3WKA-GFa-S0,5	Gesamtfläche	15 %	3	0,5 GWh
3WKA-DFb-S0,5	Dachfläche	20 %	3	0,5 GWh
3WKA-GFb-S0,5	Gesamtfläche	20 %	3	0,5 GWh
4WKA-DF-S0,5	Dachfläche	15 %	4	0,5 GWh
4WKA-GF-S0,5	Gesamtfläche	15 %	4	0,5 GWh

Tabelle 6: Kombinationen aus PV, Windkraft und einem Speicher

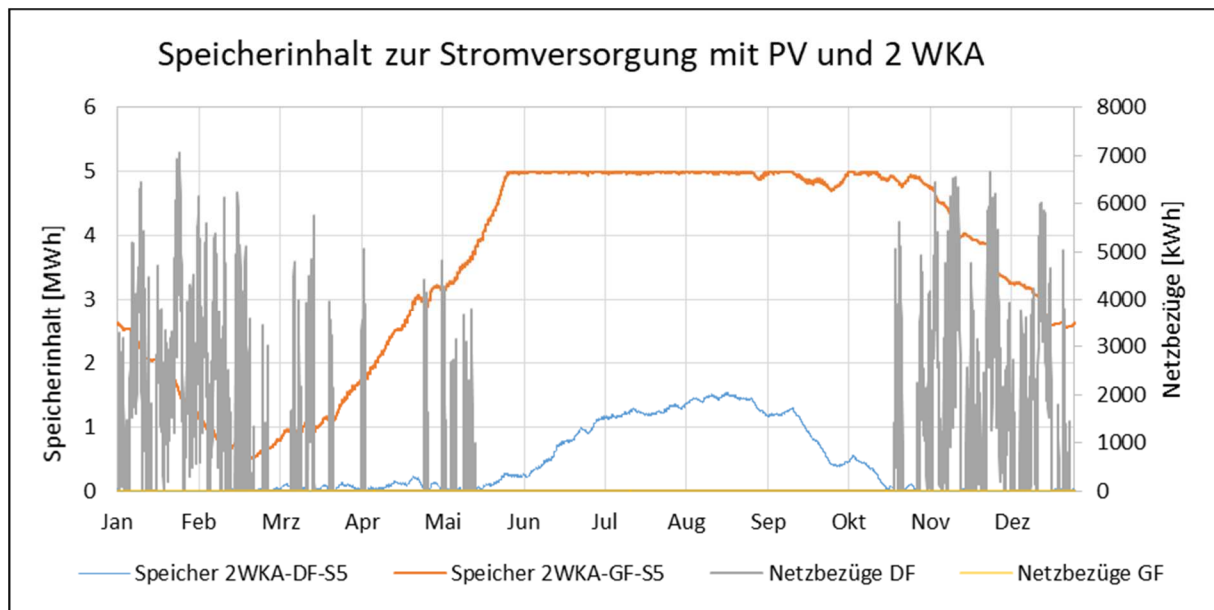


Abbildung 10: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 2 WKA und einem 5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%

Man sieht, dass bei der Kombination aus 2 Windkraftanlagen und der Nutzung der Gesamtfläche für den Einsatz von Photovoltaikanlagen zwar eine elektrische Selbstversorgung möglich ist, allerdings nur, wenn ein sehr großer Speicher mit einer Kapazität von 5 GWh zur Verfügung steht, was im Normalfall nur durch ein größeres Pumpspeicherkraftwerk geboten werden kann. Wie üblich ist also das Problem die langfristige Speicherung des im Sommer auftretenden Solarenergieüberschusses, was unter diesen Voraussetzungen für das Modellgebiet nicht als Möglichkeit in Betracht kommt.

Mit steigender Anzahl an Windkraftanlagen nimmt die erforderliche Speicherkapazität deutlich ab. Im weiteren Verlauf wird eine Speicherkapazität von 0,5 GWh betrachtet, was durch kleinere Pumpspeicherkraftwerke geliefert werden kann.

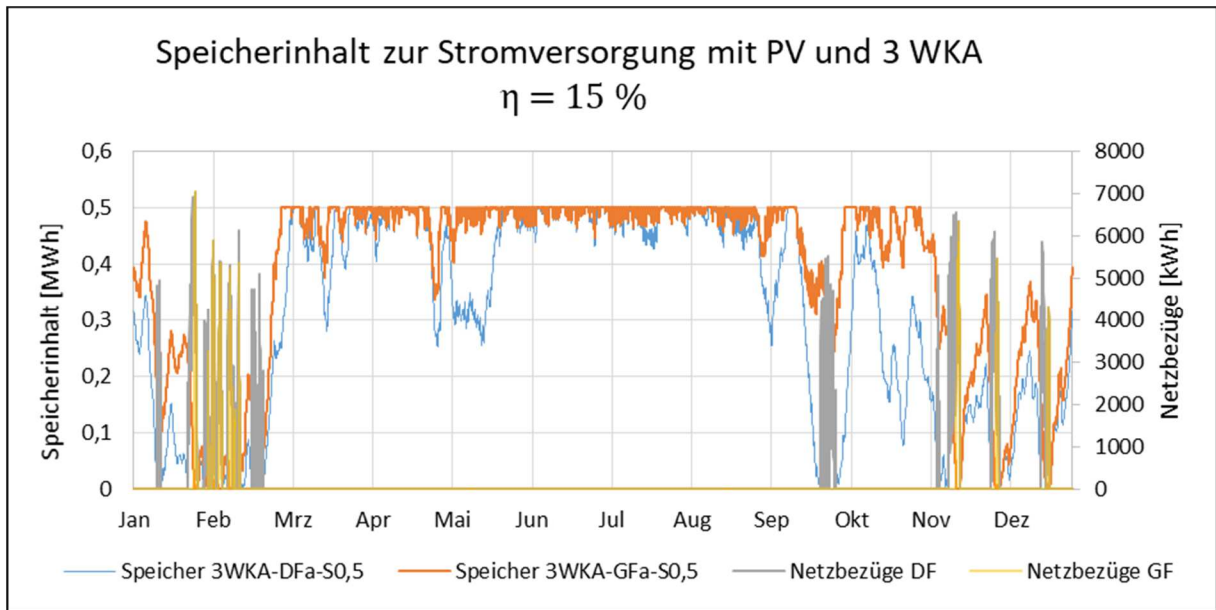


Abbildung 11: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 3 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%

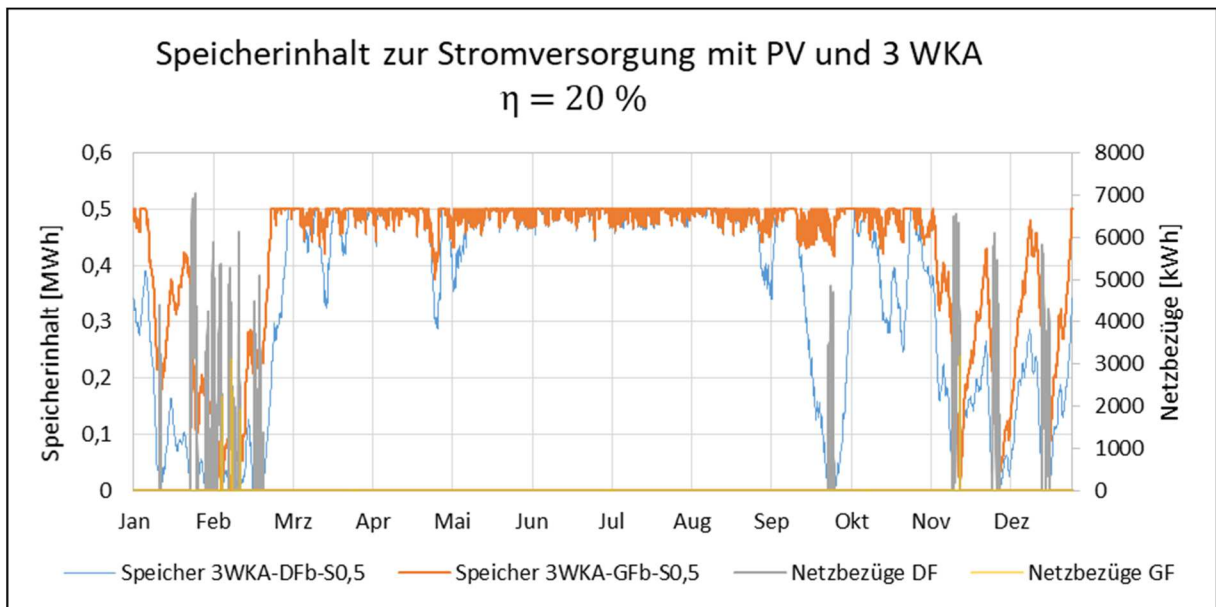


Abbildung 12: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 3 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 20 %

Hier ist gut zu sehen, wie die erforderlichen Netzbezüge sinken, wenn der Wirkungsgrad der Photovoltaikanlagen von 15 % auf 20 % erhöht wird. Mit einem Speicher von 0,5 GWh ist unter diesen Voraussetzungen also fast eine Selbstversorgung des Modellgebiets möglich. Die zusätzlich notwendigen Netzbezüge sinken bei der Wirkungsgradverbesserung im Fall der Dachflächennutzung von 2,68 GWh auf 1,81 GWh und bei Nutzung der Gesamtflächen von 0,73 GWh auf 0,05 GWh. Im Hinblick auf die Kosten der Verbesserung und den ursprünglichen Bedarf von 39,78 GWh ist dies allerdings eine eher geringe Einsparung.

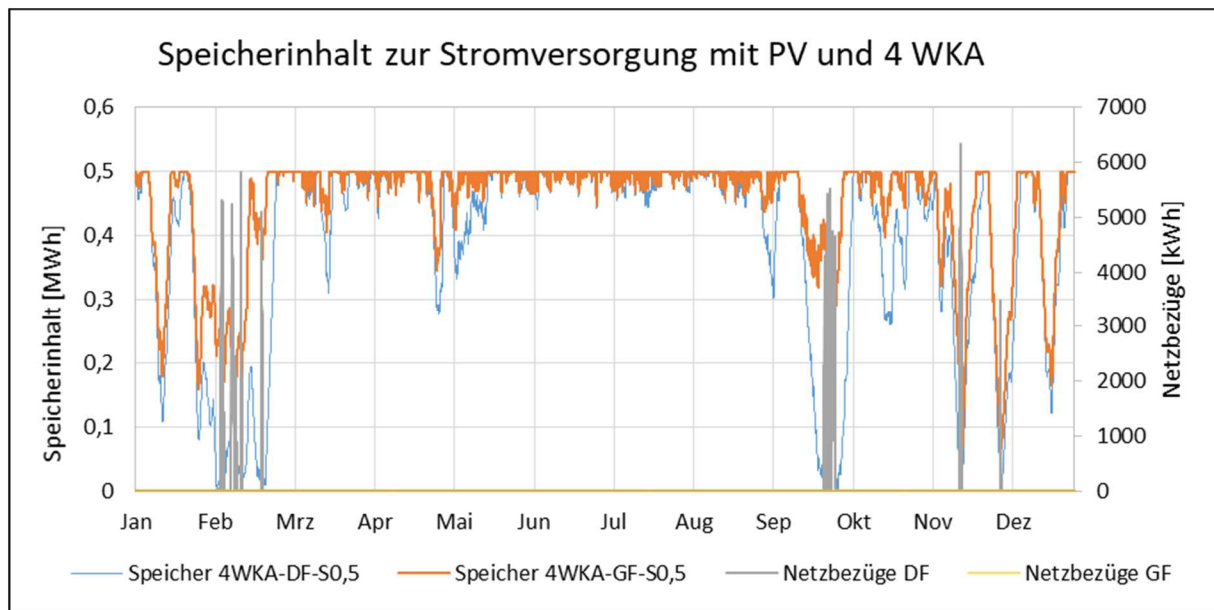


Abbildung 13: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 4 WKA und einem 0,5 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%

Die Kombination aus einem 0,5 GWh Energiespeicher, 4 Windkraftanlagen und der Photovoltaiknutzung der gesamten Fläche ermöglicht die elektrische Selbstversorgung des Modellgebietes ohne jegliche Netzbezüge. Werden nur die vorhandenen Dachflächen mit Photovoltaikanlagen ausgestattet, sind insgesamt Netzbezüge von ca. 0,71 GWh erforderlich. Es kommt allerdings bei beiden Flächen zu einem hohen Energieüberschuss, der gegebenenfalls an das Netz abgegeben werden kann. Bei den Dachflächen können ca. 10,18 GWh aufgrund der maximalen Kapazität nicht mehr gespeichert werden, bei der Nutzung der Gesamtflächen sind es 25,06 GWh.

Liegt der Fokus bei den soeben vorgestellten Kombinationen darauf, komplett auf Netzbezüge verzichten zu können, soll nun untersucht werden, welche Einsparungen sich bei einer ergänzenden regenerativen Versorgung erreichen lassen. Durch den Einsatz von Photovoltaikanlagen mit 15 % Wirkungsgrad auf den bestehenden Dachflächen lassen sich ohne Energiespeicher oder Windkraftanlagen bereits 12,86 GWh Netzbezüge im Jahr einsparen, was 32 % des ursprünglichen Bedarfs entspricht. Werden alle verfügbaren Flächen genutzt lässt sich der Bedarf an Netzbezügen sogar um 16,20 GWh, also 41 % senken. Die Energieüberschüsse, die dabei entstehen und nicht sofort genutzt werden können betragen in den beiden Fällen 4,32 GWh und 16,62 GWh. Wird ein 50 MWh Energiespeicher eingesetzt, der die tagsüber entstehenden Energieüberschüsse für die Nacht nutzbar macht, kann die Einsparung auf 42 % und 63 % des ursprünglichen Bedarfs, also 16,71 GWh und 25,06 GWh, erhöht werden und es entstehen in den beiden Fällen jeweils nicht nutzbare Überschüsse von

0,10 GWh und 7,03 GWh. Werden diese Kombinationen jeweils um eine Windkraftanlage erweitert, so lässt sich der jährliche Bedarf um bis zu 62 % bei Nutzung der Dachflächen, beziehungsweise 77 % bei Nutzung aller Flächen senken. Die nicht nutzbaren Überschüsse belaufen sich in diesem Fall auf 0,58 GWh und 9,59 GWh. Für die Kombination aus Photovoltaikmodulen mit 15 % Wirkungsgrad, einer Windkraftanlage und einem 50 MWh Speicher ist in Abbildung 14 der Jahresverlauf dargestellt.

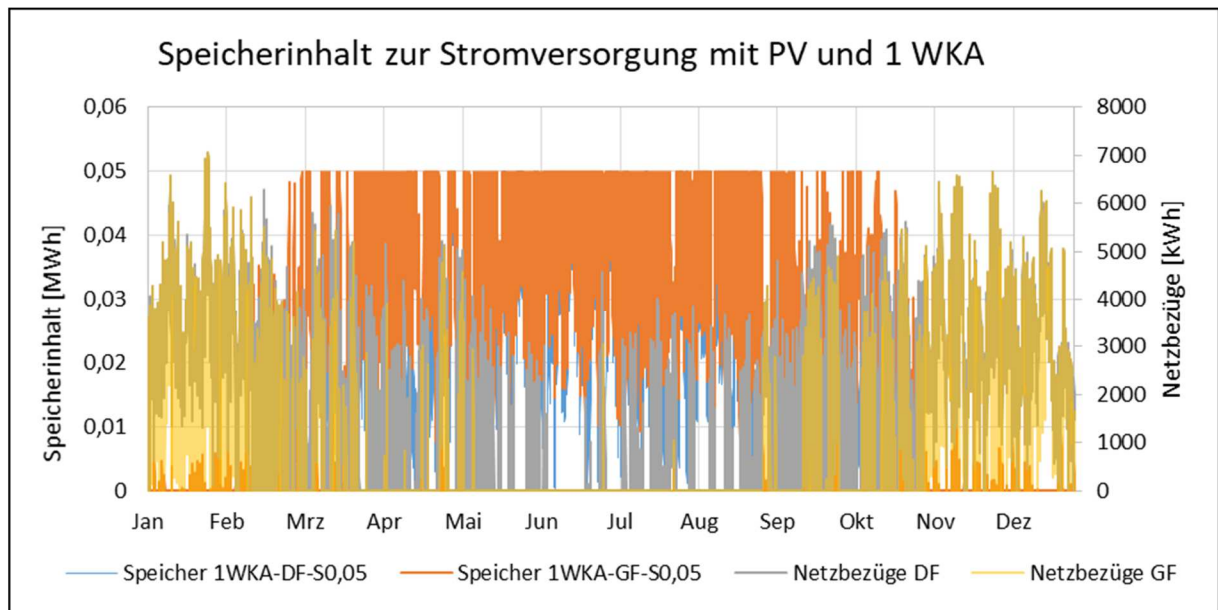


Abbildung 14: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15%

In den Abbildungen 15 und 16 sind eine Woche im Januar und eine im Juni dargestellt, um die Unterschiede sichtbar zu machen und den täglichen Verlauf nachvollziehen zu können.

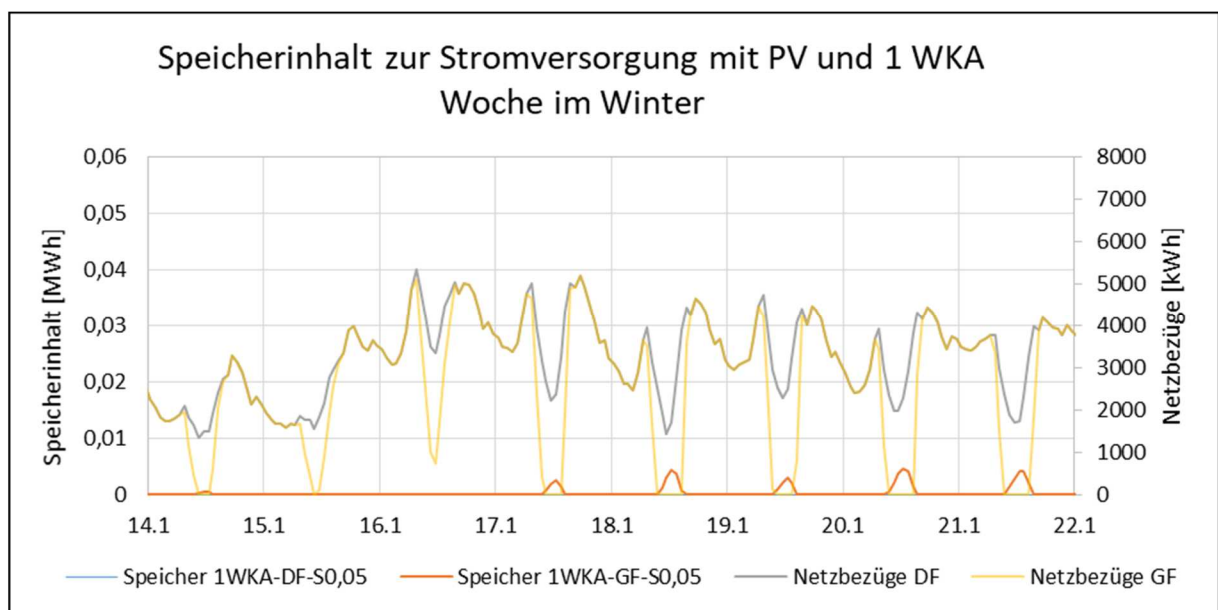


Abbildung 15: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15% (Winter)

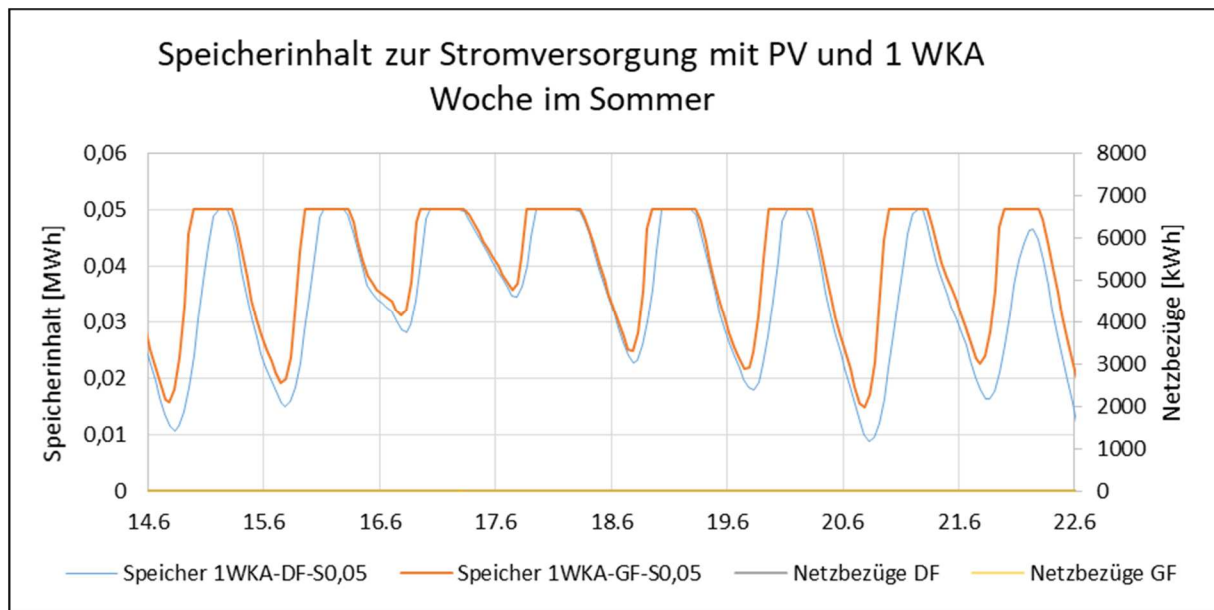


Abbildung 16: Speicherinhalt und Netzbezüge bei 1 WKA und einem 0,05 GWh Speicher mit PV-Wirkungsgrad 15% (Sommer)

In den drei Abbildungen ist gut zu erkennen, dass sich im Jahresverlauf deutliche Unterschiede zwischen Sommer und Winter ergeben. So kann in der Woche im Januar nur ein geringer Teil des Energiebedarfs gedeckt werden und nur wenn die gesamte Fläche genutzt wird, kann ein kleiner Teil des Speichers geladen und der entstandene Energieüberschuss über einen etwas längeren Zeitraum genutzt werden. Werden nur die Dachflächen genutzt, muss in dieser Woche dauerhaft Energie vom Netz bezogen werden. Dem gegenüber steht die Woche im Juni, in der in beiden Fällen kein Netzbezug notwendig ist. Der tagsüber vorhandene Überschuss kann den Speicher komplett aufladen und der nächtliche Bedarf damit gedeckt werden.

Aus den soeben dargestellten Beispielen ist ersichtlich, dass die Selbstversorgung mit Elektrizität für das Modellgebiet zwar möglich ist, allerdings nur in Kombination mit einem großen Energiespeicher und einer gewissen Anzahl an Windkraftanlagen. Der Bau von Windkraftanlagen dieser Größe unterliegt im Normalfall der 10H-Regel, welche festlegt, dass der Standort der Anlage den zehnfachen Abstand ihrer Höhe zu geschützten Wohngebieten nicht unterschreiten darf. Diese Regelung kann gegebenenfalls umgangen werden, wenn die Bevölkerung dies befürwortet (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie). In der Umgebung eines Industriegebietes finden Windkraftanlagen möglicherweise eine höhere Akzeptanz in der Bevölkerung, da dort zumeist kein Anspruch an landschaftliche Unversehrtheit gelegt wird und Wohngebiete in entsprechendem Abstand liegen. Dennoch ist der ergänzende Einsatz von regenerativen

Energieformen zur Deckung des Strombedarfs eines Industriegebietes für die ansässigen Unternehmen wahrscheinlich ein sinnvollerer Ziel als der komplette Verzicht auf zusätzliche Netzbezüge, da in diesem Fall sehr hohe Speicherkapazitäten vorhanden sein müssen die nach derzeitigem Stand nicht sinnvoll realisierbar sind.

5.2. Versorgung mit Wärme

Für die Wärmeversorgung kann das in Kapitel 4 vorgestellte Solarenergiepotenzial mittels Solarthermie genutzt werden. Der Wirkungsgrad von Solarthermiekollektoren hängt von der Bestrahlungsstärke, der Temperatur des Mediums im Kollektor und der Umgebungstemperatur ab. Mit abnehmender Bestrahlungsstärke und steigender Temperaturdifferenz zwischen Kollektormedium und Umgebungsluft wird der Wirkungsgrad immer geringer, weshalb bei hohen erforderlichen Temperaturen eine Nutzung der Solarenergie teilweise sehr schlechte Wirkungsgrade liefert, beziehungsweise ab einem gewissen Temperaturniveau oder zu geringer Bestrahlungsstärke nicht mehr möglich ist.

In Anlehnung an den Wirkungsgradverlauf eines Flachkollektors wird mit der mittleren Bestrahlungsstärke von 237 W/m^2 ein mittlerer Wirkungsgrad von 50 % festgelegt und für die weitere Betrachtung herangezogen (Quasching, 2015). In Abbildung 17 sind der Zustand des Energiespeichers und die zusätzlich erforderlichen Energiebezüge analog zu den in Kapitel 5.2 betrachteten Verläufen für die solarthermische Nutzung der Dachflächen und der Gesamtflächen dargestellt. Dabei wurde ein Wärmespeicher mit 150 MWh Kapazität vorausgesetzt, was etwa 10 % der Kapazität des von der N-ERGIE gebauten Wärmespeichers entsprechen (N-ERGIE Aktiengesellschaft, 2015).

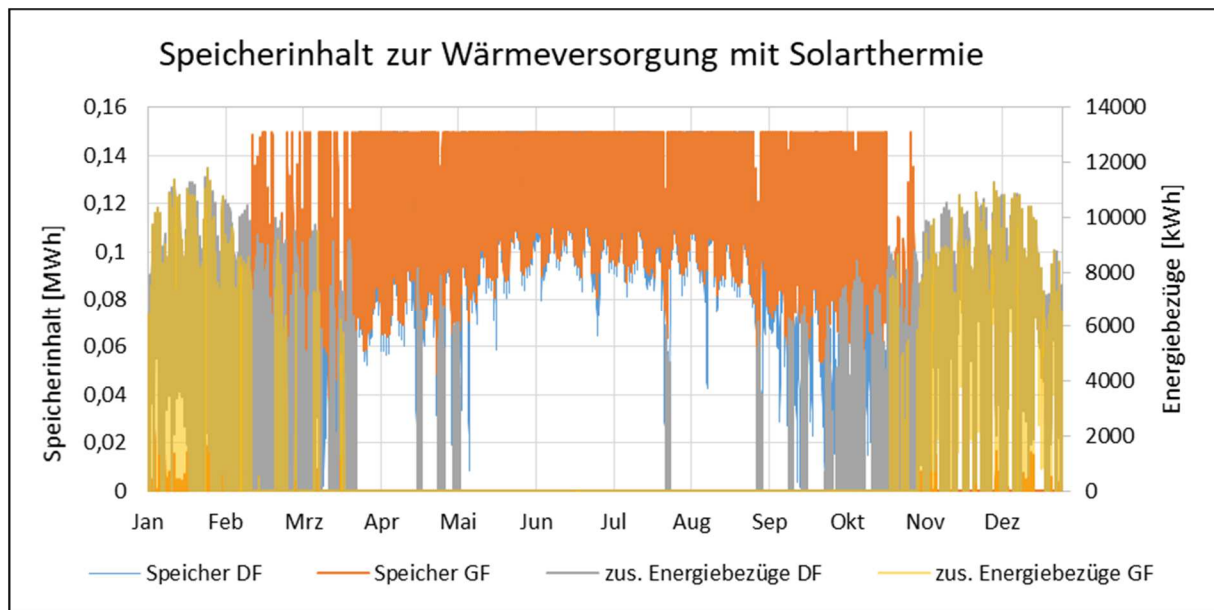


Abbildung 17: Speicherinhalt und zusätzlich erforderliche Energiebezüge bei einem 0,15 GWh Speicher

Man sieht, dass bei der Nutzung der Gesamtflächen in den Sommermonaten theoretisch genug Energie zur Bedarfsdeckung bereitgestellt werden kann. Bezogen auf den ursprünglichen Bedarf könnte der Bezug von Energieträgern zur Wärmebereitstellung um 64 % beziehungsweise 80 % verringert werden. Das Problem ist allerdings, dass ein Großteil der benötigten Energie für die Erzeugung von Prozesswärme benötigt wird. Diese wird in den meisten Industriezweigen bei Temperaturen von über 100 °C, beziehungsweise in vielen Bereichen über 500 °C, benötigt, was von herkömmlichen Solarthermiekollektoren aufgrund der hohen Temperaturdifferenz nicht realisiert werden kann (Quasching, 2015). Der weitaus geringere Bedarf, der nicht für Prozesswärme genutzt wird, kann allerdings gut mittels Solarthermie bereitgestellt werden. In Abbildung 18 wird nun die Deckung des Raumwärmebedarfs mittels Solarthermie untersucht. Dabei werden im Gegensatz zu den bisherigen Betrachtungen die Nutzung der Dachfläche und die Nutzung der halben Dachfläche verglichen. Wegen der geringeren Temperaturdifferenz zwischen Kollektormedium und Umgebungsluft wird der mittlere Wirkungsgrad dabei mit 60 % angenommen.

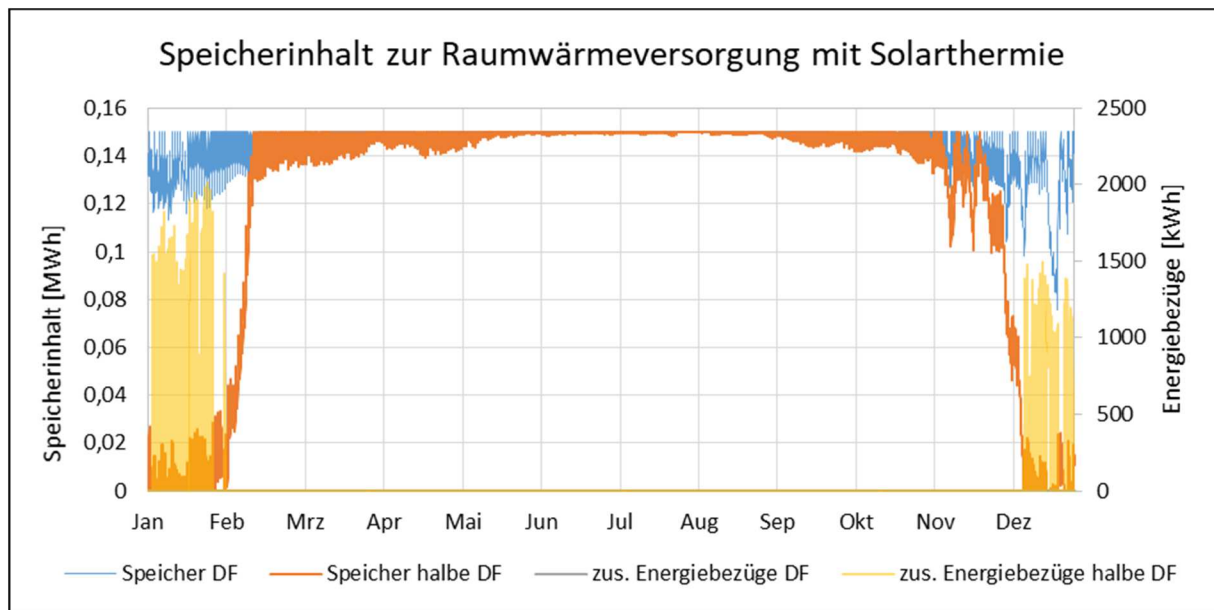


Abbildung 18: Speicherinhalt und zusätzlich erforderliche Energiebezüge bei einem 0,15 GWh Speicher (nur Raumwärme)

Es ist zu erkennen, dass der Raumwärmebedarf bei Nutzung der gesamten Dachflächen vollständig regenerativ gedeckt werden kann. Auch wenn nur die Hälfte der Dachflächen genutzt werden, muss nur von Dezember bis Anfang Februar zusätzlich geheizt werden. Setzt man die Ersparnis allerdings ins Verhältnis zu der, die sich bei der Stromerzeugung mittels Photovoltaikanlagen ergibt, wäre der Einsatz zur reinen Raumheizung eher eine Potenzialverschwendung. Der jährliche Bedarf für die Raumheizung beträgt insgesamt 5,61 GWh, dem eine mögliche Einsparung von 12,86 GWh bei Photovoltaiknutzung der Dachflächen ohne Speicher oder Windkraftanlage gegenübersteht.

Man sieht also, dass sich die regenerative Wärmebereitstellung schwieriger gestaltet als die Versorgung mit Strom. Besonders im Bereich der Prozesswärmebereitstellung kann Solarthermie lediglich ergänzend zu weiteren Energieträgern eingesetzt werden, beispielsweise zur Vorwärmung. Für die Raumheizung lässt sich in Industrieunternehmen durch die Abwärmenutzung bei bestimmten Prozessen wahrscheinlich eine sinnvollere Möglichkeit zur Reduktion der Energiebezüge finden.

6. Fazit

Der für das Modellgebiet ermittelte Strombedarf von 143.546 GJ/a kann mit der lokal vorhandenen Sonnen- und Windenergie vollständig regenerativ gedeckt werden, wenn ein ausreichend hoher Energieanteil von Windkraftanlagen bereitgestellt wird und ein Energiespeicher mit hoher Kapazität vorhanden ist. Praktisch ist es allerdings sinnvoller die regenerativen Energieformen ergänzend zu Netzbezügen einzusetzen, da sich mit einer realisierbaren Speicherkapazität von 50 MWh bereits Einsparungen von bis zu 77 % der ursprünglich erforderlichen Netzbezüge erreichen lassen, wenn die Verfügbare Fläche optimal mit Photovoltaikanlagen ausgestattet ist und zusätzlich eine Windkraftanlage die Stromversorgung unterstützt. Die Stromerzeugung und -verwendung im Umfeld eines Industriegebiets kann durch weitere Entwicklungen in Zukunft allerdings an Bedeutung zunehmen, da der hohe Grad an bereits verbauten Flächen und die ohnehin industrielle Nutzung gute Voraussetzungen schafft, um die vorhandenen Energiepotenziale zu nutzen. Besonders die Entwicklung von lokalen Speichermöglichkeiten mit hohen Kapazitäten kann hier entscheidende Veränderungen bewirken.

Der abgeschätzte Wärmebedarf von 217.806 GJ/a lässt sich theoretisch um bis zu 80 % mittels Solarthermie decken, wenn alle verfügbaren Flächen genutzt werden und ein Wärmespeicher von 100 MWh zur Verfügung steht. Allerdings wird ein Großteil davon für den Einsatz als Prozesswärme mit hohen Temperaturen benötigt, was den möglichen Einsatz von Solarthermie deutlich begrenzt. Diese kann lediglich ergänzend zu weiteren Heizmethoden eingesetzt werden. Wenn man bedenkt, dass in Deutschland im Jahr 2016 der Prozesswärmeeinsatz der Industrie rund 34,6 % des gesamten Wärmebedarfs ausgemacht hat, wird klar, dass die Lösung dieses Problems eine wichtige Aufgabe im Rahmen der Energiewende ist (Umweltbundesamt, 2018).

Es ist zu beachten, dass es sich bei den gewonnenen Ergebnissen um eine allgemeine und theoretische Einschätzung handelt, in der viele Faktoren vereinfacht wurden. Zunächst einmal kann sich der Energiebedarf von Unternehmen, welche im gleichen Wirtschaftszweig eingeordnet sind, je nach Art der eingesetzten Anlagen und Prozesse stark unterscheiden. Soll eine Planungsgrundlage zur Beurteilung der regenerativen Selbstversorgung eines bestimmten Unternehmens oder Industriegebiets erfolgen, ist eine genauere Abschätzung sowohl des zeitlichen Verbrauchsverlaufs als auch des Gesamtverbrauchs erforderlich.

Aufgrund bestimmter Betriebsfaktoren kann der zeitliche Verlauf stark von den in Abbildung 3 und 4 vorgestellten abweichen, zum Beispiel durch Schichtarbeit oder einer zeitlichen Konzentration bestimmter Fertigungsvorgänge. Hinzu kommt, dass besonders bei der Solarthermienutzung das tatsächliche Verhalten von vielen Bedingungen abhängt die hier nicht beachtet wurden, weshalb eine detailliertere Untersuchung notwendig ist, um das Einsatzverhalten angemessen simulieren zu können. Ähnliches gilt auch für die Speicherbetrachtung, in welcher keine Speicherverluste oder Wirkungsgradänderungen berücksichtigt wurden. Außerdem werden mit der Sonnen- und Windenergie zwar die wichtigsten, jedoch nicht alle regenerativen Energieformen betrachtet. Besonders bei der Betrachtung der Wärmeversorgung kann das vorhandene Potenzial durch die Nutzung von Geothermie oder Biogasanlagen deutlich höher ausfallen. Nichtsdestotrotz gibt diese Untersuchung eine erste grobe Einschätzung über die regenerative Selbstversorgung eines Industriegebiets und kann die Grundlage für weitere Betrachtungen bilden.

Abschließend kann gesagt werden, dass die Nutzung von regenerativen Energieformen in der Umgebung von Industriegebieten ein hohes Potenzial zur Dekarbonisierung in der EMN hat. Das Umfeld bietet Unternehmen die Möglichkeit die bereitgestellte Energie sinnvoll zu verteilen und den Flächenbedarf optimal energetisch auszunutzen. Der Verbrauch von konventionellen Energieträgern kann somit stark reduziert werden und wichtige Entwicklungen im Hinblick auf die Zukunft unserer Energieversorgung angekurbelt werden. Die Kombination aus lokalen Arbeitsplätzen, steigenden Gewerbeeinnahmen, nachhaltiger Energiebereitstellung und Sammlung von technischem Know-How bezüglich Energieerzeugung, -verteilung und -speicherung bietet einer Gemeinde viele Vorteile und kann nachhaltig zu einer steigenden Lebensqualität und Strukturentwicklung in der EMN beitragen.

Quellenverzeichnis

Bayerische Gesellschaft für Internationale Wirtschaftsbeziehungen mbH . (11. Dezember 2018). *Eine kostenlose Datenbank, die Sie weltweit präsentiert - Bayern International*. Von <https://www.bayern-international.de/firmendatenbank/> abgerufen

Bayerische Vermessungsverwaltung. (2018). *Karten und Daten zur Energiewende | Energie-Atlas-Bayern*. (B. Staatsregierung, Herausgeber) Abgerufen am 15. November 2018 von [https://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/?lon=4452104.5&lat=5460348.5&zoom=11&base=904&layers=906\(1.0\)~searchResultLayer\(1.0\)~verwaltungseinheitenLayer\(1.0\)~landConsumptionLayer\(1.0\)~vectorgeolocation\(1.0\)~digitize2014\(1.0\)](https://geoportal.bayern.de/energieatlas-karten/?lon=4452104.5&lat=5460348.5&zoom=11&base=904&layers=906(1.0)~searchResultLayer(1.0)~verwaltungseinheitenLayer(1.0)~landConsumptionLayer(1.0)~vectorgeolocation(1.0)~digitize2014(1.0))

Bayerisches Landesamt für Statistik. (10. Dezember 2018). *GENESIS-Online Bayern: Ergebnis - 42111-104s*. Von <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/data?operation=abrufabelleBearbeiten&levelindex=2&levelid=1544444113718&auswahloperation=abrufabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=42111-> abgerufen

Bayerisches Landesamt für Statistik. (15. November 2018). *Landesamt für Statistik: Energie*. Abgerufen am 10. Dezember 2018 von <https://www.statistik.bayern.de/statistik/energie/>

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (kein Datum). *Genehmigung - Wind - Energie-Atlas Bayern*. Abgerufen am 11. Dezember 2018 von https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wind/genehmigung.html

Bundesagentur für Arbeit. (27. September 2017). *Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008*. Abgerufen am 12. Dezember 2018 von <https://statistik.arbeitsagentur.de/Navigation/Statistik/Grundlagen/Klassifikation-der-Wirtschaftszweige/Klassifikation-der-Wirtschaftszweige-2008/Klassifikation-der-Wirtschaftszweige-2008-Nav.html>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2018). *BMWi - Abkommen von Paris*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Industrie/klimaschutz-abkommen-von-paris.html> abgerufen

Die Deutsche Wirtschaft. (19. August 2018). *Bock 1 GmbH & Co. KG, Postbauer-Heng: Kennzahlen und Rang im Mittelstandsrating*. Abgerufen am 11. Dezember 2018 von https://die-deutsche-wirtschaft.de/mit_10000/bock-1-gmbh-co-kg-postbauer-heng-kennzahlen-und-rang-im-mittelstandsrating/

Europäische Metropolregion Nürnberg. (16. Juni 2016). *Metropolregion Nürnberg: Fact Sheet*. Abgerufen am 8. Dezember 2018 von <https://www.metropolregionnuernberg.de/downloads/karten/fact-sheet.html>

Industrie- und Handelskammer Bayern. (11. Dezember 2018). *Firmendaten im Internet*. Von <https://firmen-in-bayern.de/sites/fitby/search/detailSearch.aspx> abgerufen

- Industrie- und Handelskammer Bayern. (30. Oktober 2018). *IHK-Standortportal Bayern*. Von https://standortportal.bayern/de/standortsuche/index.jsp#start=1&q=&f=facet_type:gg&f=facet_type:gi&f=facet_type:tgz abgerufen
- Kollenbroich, B., & Teevs, C. (30. August 2016). *Wohnen in Deutschland: Immer mehr Menschen zieht es aufs Land - SPIEGEL ONLINE*. Abgerufen am 13. November 2018 von <https://www.zukunftsinstitut.de/artikel/wohnen/wem-gehoert-die-zukunft-stadt-oder-land/>
- KOMPASS S.A. (11. Dezember 2018). *Firmenverzeichnis - Kompass*. Von <https://de.kompass.com/> abgerufen
- Main-Donau Netzgesellschaft mbH. (11. Dezember 2018). *Netzrelevante Daten | Main-Donau Netzgesellschaft mbH*. Von <https://www.main-donau-netz.de/header/veroeffentlichungen/strom/netzrelevante-daten.html> abgerufen
- Metropolregion Nürnberg. (2017). *Klimapakt der Europäischen Metropolregion Nürnberg*. Von https://www.nuernberg.de/imperia/md/umweltreferat/dokumente/klimapakt_der_metropolregion_n__rnberg.pdf abgerufen
- N-ERGIE Aktiengesellschaft. (Juni 2015). *N-ERGIE Kraftwerksstandort Nürnberg: Unsere Anlagen*. Von https://www.n-ergie.de/n-ergie/unternehmen/unsere-energie/kraftwerksstandort/!ut/p/z1/nZFNC4JAEIZ_jVdn8nPppmFiIVYg2I5Cw1ZBXVHLv5_RJUFWaW4zPO98vAMUYqB18ipY0he8Tsoxv1Lj5ns73NgB-gG6Clrm_kx0hyiOp0EkAlyiA12jx0IYaF8UW0V0A-Uf_W-ndXoBQMxtI6CiEUZoigH3qC0AgbEAfEyeW abgerufen
- N-ERGIE Aktiengesellschaft. (2018). Fernwärmedaten der N-ERGIE 2017. Nürnberg.
- Neumair, S.-M., & Haas, H.-D. (19. Februar 2018). *Gabler Wirtschaftslexikon*. Von <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/industriengebiet-37646/version-261080> abgerufen
- Quasching, V. (2015). *Regenerative Energiesysteme*.
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (8. Dezember 2017). *Publikation - Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Teil 2: Energie*. Abgerufen am 12. Dezember 2018 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/UmweltoekonomischeGesamtrechnungen/Querschnitt/UmweltnutzungundWirtschaftTabelle5850007177006Teil_2.html
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (3. Mai 2018). *Branchenabhängiger Energieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes | Umweltbundesamt*. Abgerufen am 6. November 2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/industrie/branchenabhaenger-energieverbrauch-des#textpart-3>
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (2018). *Wirtschaftsbereiche - Energie - Verwendung*. Abgerufen am 12. Dezember 2018 von

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/Energie/Verwendung/Tabellen/KohleErdgasStrom.html>

Umweltbundesamt. (10. Januar 2016). *Emissionsquellen* | Umweltbundesamt. Von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#textpart-1> abgerufen

Umweltbundesamt. (7. November 2018). *Energieverbrauch für fossile und erneuerbare Wärme*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-fuer-fossile-erneuerbare-waerme#textpart-1> abgerufen