

# **Entwicklung eines integralen klimaneutralen Energiekonzepts für die Ortsgemeinde Rodder**

Modul: Masterprojekt  
Professor: Prof. Dr. Eberhard Waffenschmidt  
Semester: SoSe 2022 – WiSe 2022/23  
Studiengang: Master - Erneuerbare Energien  
Fakultät: Anlagen, Energie- und Maschinensysteme  
Hochschule: Technische Hochschule Köln

vorgelegt von: Chris Oliver Wiebicke  
E-Mail: [chris\\_oliver.wiebicke@smail.th-koeln.de](mailto:chris_oliver.wiebicke@smail.th-koeln.de)

vorgelegt von: Jannik Manheller  
E-Mail: [jannik\\_michel.manheller@smail.th-koeln.de](mailto:jannik_michel.manheller@smail.th-koeln.de)

vorgelegt von: Anna Lackner  
E-Mail: [anna.lackner@smail.th-koeln.de](mailto:anna.lackner@smail.th-koeln.de)

Köln, 15.03.2023

# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, die vorgelegte Arbeit in dem gemeldeten Zeitraum ohne fremde Hilfe verfasst und mich keiner anderen als der angegebenen Hilfsmittel und Quellen bedient zu haben.

Köln, den 15. März 2023

Unterschrift

(Chris Wiebicke)

Unterschrift

(Jannik Manheller)

Unterschrift

(Anna Lackner)

# Kurzfassung

**Titel:** Entwicklung eines integralen klimaneutralen Energiekonzepts für die Ortsge-  
meinde Rodder

**Zusammenfassung:** In der Projektarbeit werden verschiedene integrale klimaneutrale  
Energiekonzepte für das Dorf Rodder aufgezeigt. Das Ziel der Projektarbeit ist es, mög-  
liche klimaneutrale Energieversorgungskonzepte zu analysieren, um die Sektoren Strom,  
Verkehr und Wärme zu Dekarbonisierung. Das Projekt hat gezeigt, dass ein signifikanter  
Ausbau der Photovoltaik im Verteilnetz nur mit Batteriespeichern möglich ist. Außerdem  
wird eine Photovoltaik-Freiflächenanlage oder eine Windkraftanlage mit gekoppelten Bat-  
teriespeicher benötigt, um eine Autarkiequote von 100% zu erzielen. Für eine klimaneut-  
rale Versorgung des Wärmesektor, ist eine Kombination aus Solarthermie, Holzhack-  
schnittelanlage und Pufferspeicher eine mögliche Lösung.

**Stichwörter:** *Rodder, klimaneutrales Energieversorgungskonzept, Stromnetzanalyse,  
Nahwärmenetz*

## Abstract

**Title:** Development of an integral climate-neutral energy concept for the local community  
of Rodder

**Abstract:** In the project, different integral climate-neutral energy concepts for the village  
of Rodder are shown. The aim of the project is to analyse possible climate-neutral energy  
supply concepts in order to decarbonise the electricity, traffic and heat sectors. The pro-  
ject has shown that a significant expansion of photovoltaics in the distribution grid is only  
possible with battery storage. In addition, an photovoltaic ground mounted system or a  
wind power plant with coupled battery storage is needed to achieve a autarky rate of  
100%. For a climate-neutral supply of the heating sector, a combination of solar heating,  
a wood chip heating plant and buffer storage is a possible solution.

**Keywords:** *Rodder, climate-neutral energy supply concept, electricity grid analysis, local  
heating grid*

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>II</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Ortsgemeinde Rodder</b> .....	<b>1</b>
<b>3 Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>2</b>
3.1 Stromsektor inkl. Elektromobilität .....	2
3.1.1 Lastprofile & Ladeprofile Elektromobilität .....	2
3.1.2 Erzeugungsprofile Erneuerbare Energien .....	4
3.1.3 Struktur des Verteilnetzes (Niederspannung).....	5
3.1.4 Excel-Tool für Betriebsweise von Batteriespeichern .....	7
3.1.5 Netzsimulation in PandaPower.....	8
3.1.6 Energiesystemmodell in PyPSA .....	9
3.2 Wärmesektor .....	12
3.2.1 Lastprofile.....	12
3.2.2 Erzeugerprofile .....	15
3.2.3 Struktur Nahwärmenetz & Ermittlung Speichervolumen sowie Transmissionswärmeverluste .....	16
3.2.4 Energiesystemmodell in PyPSA .....	18
3.2.5 Exceltool für Ermittlung Lastprofil Holzhackschnitzelanlage.....	19
<b>4 Ergebnisdarstellung Stromsektor</b> .....	<b>20</b>
4.1 Simulation in PandaPower (Verteilnetz) .....	20

4.1.1	Szenario 1 (kein Batteriespeicher) .....	21
4.1.2	Szenario 2 (konventioneller Batteriespeicher) .....	22
4.1.3	Szenario 3 (netzdienliche Betriebsweise Batteriespeicher) .....	25
4.1.4	Vergleich der Betriebsweisen von Batteriespeichern .....	29
4.2	Energiesystemmodell in PyPSA .....	31
4.2.1	Bilanzielle Bestimmung der PV-Freiflächenanlage .....	32
4.2.2	PV-Freiflächenanlage .....	34
4.2.3	Windkraftanlage .....	35
4.2.4	Vergleich der Energiesystemmodelle .....	37
<b>5</b>	<b>Ergebnisdarstellung Wärmesektor .....</b>	<b>39</b>
5.1	Solarthermie & Saisonspeicher .....	39
5.2	Solarthermieanlage, Holzhackschnitzelanlage und Wärmespeicher .....	41
<b>6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>44</b>
<b>7</b>	<b>Fazit &amp; Ausblick .....</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>48</b>
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>	<b>51</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Altersstruktur in Rodder .....	2
Abbildung 2:	elektrischer Jahreslastgang Rodder .....	4
Abbildung 3:	Implementiertes Stromnetz in Pandapower .....	6
Abbildung 4:	Stromnetz und Transformator bei der Vor-Ort-Besichtigung .....	6
Abbildung 5:	schematischer Aufbau des Codes in PandaPower .....	9
Abbildung 6:	Systemskizze des PyPSA-Modells .....	10
Abbildung 7:	Zusammenhang zwischen Netzbezug und Autarkiequote in Abhängigkeit der CO2-Emissionen .....	11

Abbildung 8: Heizlastprofil .....	15
Abbildung 9: thermische Jahresdauerlinie .....	15
Abbildung 10: Erzeugungsprofil Solarthermie auf 1 kWp normiert .....	16
Abbildung 11: Exemplarische Darstellung des Nahwärmenetzes Rodder mit Hackschnitzelheizwerk, Solarthermie und dem saisonalen/täglichen Wärmespeicher.....	17
Abbildung 12: Systemskizze des PyPSA-Modells .....	19
Abbildung 13: Spannungsband ohne Batteriespeicher.....	21
Abbildung 14: konventionelle Betriebsweise eines Batteriespeichers für einen Beispieltag .....	23
Abbildung 15: Spannungsband mit konventionellen Batteriespeichern. ....	24
Abbildung 16: netzdienliche Betriebsweise eines Batteriespeichers .....	25
Abbildung 17: Spannungsband mit netzdienlichen Batteriespeichern. ....	27
Abbildung 18: Transformatorauslastung mit netzdienlichen Speichern .....	27
Abbildung 19: Auslastung Stromleitungen mit netzdienlichen Speichern .....	28
Abbildung 20: Verbrauch .....	31
Abbildung 21: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergößen .....	33
Abbildung 22: PV-Leistung und Speicherkapazität in Abhängigkeit von der Autarkie.....	34
Abbildung 23: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergößen .....	35
Abbildung 24: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch mit einem 4.5 MW Windrad .....	36

Abbildung 25: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch für verschiedene erneuerbare Anlagenleistungen.....	37
Abbildung 26: Solarthermische Leistung und saisonale thermische Speicherkapazität in Abhängigkeit von der Autarkie.....	39
Abbildung 27: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch. Die Werte berücksichtigen verschiedene Solarthermie-Leistungen und Speicherkapazitäten .....	40
Abbildung 28: Heizlast von Rodder gedeckt durch Solarthermie, Tagesspeicher und Hackschnitzelanlage .....	42
Abbildung 29: Gedeckte Heizlast vom 23.03.2021 durch Zusammenspiel von Solarthermie und Hackschnitzelanlage.....	43

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ermittlung des Nutzwärmebedarfs fehlender Umfrageteilnehmer.....	13
Tabelle 2: Nahwärmenetz mit Verteilnetzparameter für Wärmeverlustberechnung.....	17
Tabelle 3: benötigte EE-Leistung und Speicherkapazität für eine klimaneutrale Versorgung von Rodder.....	37
Tabelle 4: untersuchte klimaneutrale Energieversorgungskonzepte für Rodder	46

---

# 1 Einleitung

Um die klimaneutrale Transformation des Energiesystems und die damit verbundene Dekarbonisierung voranzutreiben, müssen erneuerbare Technologien genutzt werden. Nach den Vorgaben des Bundesklimaschutzgesetzes soll Deutschland bis zum Jahr 2045 klimaneutral sein [1]. Dies erfordert den signifikanten Ausbau der Erneuerbaren Energien und der Speicherkapazitäten.

Anhand der Ortsgemeinde Rodder wird in der Projektarbeit exemplarisch dargestellt, wie die Energiewende in den Sektoren Strom, Verkehr und Wärme gelingen kann. Dafür werden verschiedene klimaneutrale Energieversorgungskonzepte aufgezeigt. Diese können dazu beitragen klimaneutrale Alternativen für den Wiederaufbau der durch die Flutkatastrophe zerstörten Energieinfrastruktur zu schaffen.

## 2 Ortsgemeinde Rodder

Die Ortsgemeinde Rodder ist geografisch in der Eifel im Landkreis Ahrweiler zu lokalisieren und gehört zur Verbandsgemeinde Adenau. Die Ortsgemeinde ist ländlich geprägt und wird von Feldern sowie Waldgebieten umgeben. Die Fläche der Ortsgemeinde beträgt 6,38 km<sup>2</sup>. Die Bevölkerung der Ortsgemeinde wird auf 237 Personen (Schätzung 2021) geschätzt. Rodder ist überwiegend von Einfamilienhäusern geprägt. Allerdings gibt es auch eine Schreinerei, eine Gastwirtschaft und zwei landwirtschaftliche Betriebe. Weitere industrielle Großbetriebe sind nicht vorhanden. [2]

Derzeit sind in Rodder 19 Photovoltaikanlagen (PV) auf Hausdächern installiert. Der jährliche Gesamtstromverbrauch ist nicht bekannt. Die Wärmeversorgung von Rodder wird durch dezentrale Wärmeerzeugern wie z.B. Brennwertkesseln gewährleistet. Hauptsächlich werden die Brennwertkessel derzeit mit fossilen Energieträgern wie Öl und Flüssiggas versorgt. Wenige Bewohner besitzen eine Holzheizung oder eine Wärmepumpe. [3, 4]



# 3 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird das methodische Vorgehen für die Analyse der einzelnen Sektoren erläutert. Hierbei wird das Vorgehen während der Projektarbeit dargestellt und der Zusammenhang zwischen erstellten Excel- und Python-Tools erklärt.

## 3.1 Stromsektor inkl. Elektromobilität

### 3.1.1 Lastprofile & Ladeprofile Elektromobilität

Die Vor-Ort Besichtigung in Rodder hat gezeigt, dass das Dorf überwiegend aus Einfamilienhäusern besteht. Aus diesem Grund wurden für die Analyse der Stromsektors mit dem LoadProfileGenerator der TU Chemnitz 20 verschiedene Haushaltslastprofile mit unterschiedlichen Verbrauchsverhalten erstellt. Die Auswahl der Lastprofile erfolgt anhand der recherchierten Altersstruktur (vgl. Abbildung 1)

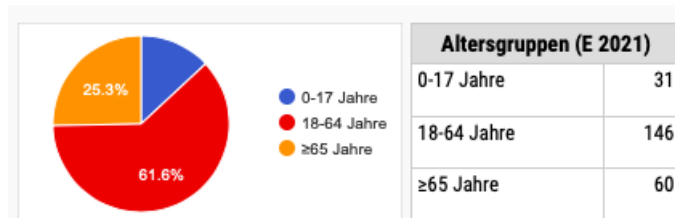


Abbildung 1: Altersstruktur in Rodder [2]

In der gesamten Analyse der Stromsektors wird eine Elektrifizierung der privaten Mobilität durch Elektrofahrzeuge angenommen. Weitere mögliche klimaneutrale Antriebsformen wie die wasserstoffbasierte Brennstoffzelle wurden nicht berücksichtigt. In den erstellten Lastprofilen wird der Stromverbrauch der E-Autos berücksichtigt. Im Anhang B ist eine Übersicht der erstellen Lastprofile zu finden. Außerdem wurde in dem Projekt die Dekarbonisierung des ÖPNV nicht betrachtet. Es existiert lediglich ein Linienbus, der vereinzelt über den Tag in Rodder hält. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass in der Zukunft Elektrobusse in Rodder geladen werden.

---

Bei den in den Lastprofilen hinterlegten Ladeprofilen der E-Autos variiert die durchschnittlich täglich gefahrene Strecke von 15 bis 30 km. Zudem wird angenommen, dass die Elektroautos in Rodder mit einer Leistung von 11 kW geladen werden. Bei fünf Lastprofilen wird angenommen, dass die Personen das Elektroauto nur auf der Arbeit laden. Der Stromverbrauch der 20 erstellten Lastprofile variiert zwischen 2.000 und 15.000 kWh/a je nach Nutzerverhalten. Das Lastprofil mit den 15.000 kWh/a steht exemplarisch für den Verbrauch der kleinindustriellen Verbraucher (Hotel & Schreinerei).

Basierend auf der Altersstruktur (Abbildung 1) kann die ungefähre Anzahl an Autos in Rodder bestimmt werden:

- Altersgruppe  $\geq 65$  Jahre: 30 Autos (da 2 Personen sich 1 Auto teilen)
- Altersgruppe 18-64 Jahre: 98 Autos (da  $\frac{2}{3}$  der Personen sich 1 Auto teilen)
- Altersgruppe 0-17 Jahre: Keine Autos (da noch nicht fahrberechtigt)

Im weiteren Verlauf wird davon ausgegangen, dass wenn der gesamte private PKW-Verkehr in Rodder dekarbonisiert wird, insgesamt 128 E-Autos in Rodder vorhanden sind. Die mit dem LoadProfileGenerator erstellten Last- und Ladeprofile der E-Autos basieren auf unterschiedlichen Nutzerverhalten (Kinder, Erwachsene, Senioren), sodass es zu keiner starken Überlagerung der Spitzenlasten kommt (geringer Gleichzeitigkeitsfaktor). So laden beispielsweise Senioren das E-Auto tagsüber und die arbeitenden Personen in der Regel abends.

In der Abbildung 2 ist der aus den 20 erstellten Lastprofile resultierende Jahreslastgang für Rodder dargestellt.

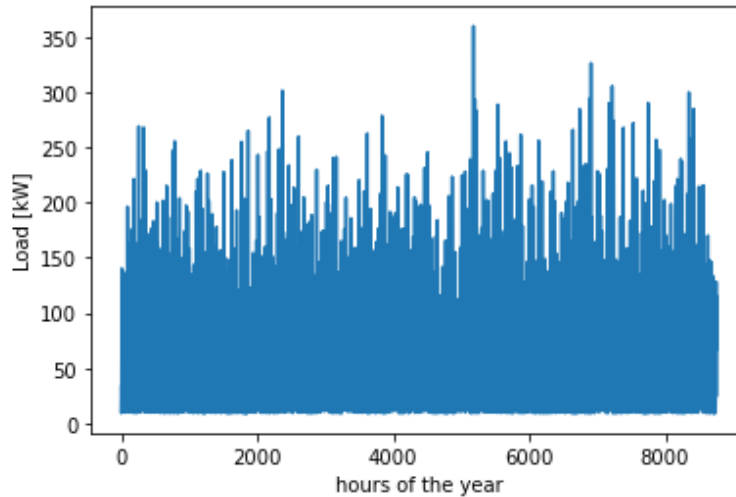


Abbildung 2: elektrischer Jahreslastgang Rodder [eigene Darstellung]

Der jährliche Gesamtstromverbrauch liegt bei 597 MWh. Dies entspricht einem durchschnittlichen Stromverbrauch eines Haushalts von 5.000 kWh pro Jahr (inklusive Elektromobilität).

### 3.1.2 Erzeugungprofile Erneuerbare Energien

Im Projekt wurden verschiedene Erzeugungprofile genutzt, um Simulationen durchzuführen. Es wurden Profile für PV-Haudachanlagen, einer PV-Freiflächenanlage und einer Windkraftanlage verwendet. Im Folgenden wird erläutert, wie die Erzeugungprofile erstellt wurden.

- Berechnung PV-Haudachanlagen (kWp)
  - **Möglichkeit 1:** Markstammdatenregister (MaStR) (Bundesnetzagentur, 2023)
    - Anzeigen, aller PV-Anlagen bis bis 30kW (Gesamtleistung 10/2022: 186.766,47 kW Anzahl: 22.130 Anlagen = Durchschnittsleistung 8,44 kWp)
  - **Möglichkeit 2:** Solarkataster Rheinland-Pfalz. (Geoplex GIS GmbH, 2020)
    - 1) Ablesen für jedes Haus in Rodder: Solarer Ertrag und mögliche Leistung

---

2) Annahme Korrekturfaktor von 40% (Solarkataster berücksichtigt Gesamtdachfläche, Abzug von Sperrflächen (z.B. Fenster, Abluftrohre, Blitzableitern) -> 60% der Leistung kann erwartet werden

3) Entfernung der drei größten und drei kleinsten Werte (aufgrund von starkem Ausschlag nach oben, wegen Dachfläche des Bauernhofes

4) Ergebnis: Südost: 11,0 kWp; Südwest: 11,5 kWp; Süd: 11,8 kWp

5.) Erstellung der drei PV mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Leistungen in PV\*SOL.

- **Entscheidung: Möglichkeit Zwei**, aufgrund höherer Genauigkeit und höhere Dimensionierung durch Entwicklung der Effizienz von PV-Modulen. Die PV-Erzeugungsprofile sind im Anhang C zu finden.

Die Erzeugerprofile der PV-Freiflächenanlage und der Windkraftanlage wurden mit Renewables ninja erstellt [5]. Die Leistung der Freiflächenanlage wurde für spätere Simulationen auf eine Leistung von 1 kWp normiert. Für die Windkraftanlage wurde eine Enercon E-115 4,5 MW mit einer Nabenhöhe von 120 m gewählt. Die Windkraftanlage hat einen jährlichen Ertrag von 8,7 GWh. Das Erzeugungsprofil der Enercon E-115 ist im Anhang C zu finden.

### 3.1.3 Struktur des Verteilnetzes (Niederspannung)

Als Ausgangspunkt für die Betrachtung des Verteilnetzes dient der Stromnetzplan von Rodder, der von dem Verteilnetzbetreiber Westnetz zur Verfügung gestellt wurde. Bei dem Niederspannungsnetz handelt es sich um ein offenes Ringnetz mit zwei Transformatoren. In der Abbildung 3 ist das in PandaPower implementierte Stromnetz dargestellt. Außerhalb des Dorfes befindet sich ein landwirtschaftlicher Betrieb mit einem eigenen Transformator (rechts in der Abbildung).



Abbildung 3: Implementiertes Stromnetz in Pandapower [eigene Darstellung]

Bei allen drei Transformatoren handelt es sich um den Typ 0,25 MVA 20/0,4 kV. Die vorhandenen Kabeltypen sind NAYY 4x150 SE, NAYY 4x95 SE, NAYY 4x50 SE, NAYY 4x35, NYY 4x16 und Freileitungen mit dem Typ X70. Ein Großteil der Stromleitungen in Rodder sind Freileitungen des Typs X70 (Abbildung 4).



Abbildung 4: Stromnetz und Transformator bei der Vor-Ort-Besichtigung [eigene Darstellung]

Aktuell befinden sich in Rodder 19 installierte Photovoltaik-Anlagen auf privaten Wohngebäuden, was einem Photovoltaik-Potenzial von ca. 10% entspricht. Die installierte Leistung dieser Anlagen beträgt 0,2 MW. Das verbleibende Potenzial für weitere Photovoltaik-Anlagen beträgt 2,1 MW (90%). [4]

### 3.1.4 Excel-Tool für Betriebsweise von Batteriespeichern

Der Ladezustand der Batteriespeicher kann in PandaPower mit der Timeseries-Calculation nicht in stündlicher Auflösung über ein Jahr bestimmt werden. Da in dem Projekt jedoch auch Batteriespeicher in den Wohngebäuden berücksichtigt werden, wurden zwei Excel-Tools erstellt. Diese dienen als Grundlage, um die in Kapitel 3.1.1 erstellten Lastprofile mit den in Kapitel 3.1.2 erstellten PV-Profilen für jede Stunde im Jahr gegenüberzustellen und daraus den Ladezustand des Batteriespeichers zu bestimmen. Das Ziel der Excel-Tools ist die Erstellung von Lastprofilen, in denen die Nutzung von PV und Batteriespeichern berücksichtigt wird, um diese abschließend in PandaPower für die Netzsimulation verwenden zu können.

Im ersten Excel-Tool wird eine konventionelle Betriebsweise von Batteriespeichern berücksichtigt (Speicher wird geladen, wenn der Verbrauch durch die PV-Anlage gedeckt wird und es einen PV-Überschuss gibt). Hierbei wird das Stromnetz nicht entlastet, da die Einspeisespitzen zur Mittagszeit weiterhin bestehen bleiben (siehe Paper). In dem Excel-Tool können neben der Speicherkapazität auch die Entladetiefe und der Ein- und Ausspeicherwirkungsgrad angegeben werden. Für das Projekt wurden Speicher mit einer Kapazität von 5,8 und 12 kWh und einer Entladetiefe von 90% sowie einem Wirkungsgrad von 95% angesetzt. [6]

Im zweiten Excel-Tool wird eine netzdienliche Betriebsweise von Batteriespeichern berücksichtigt (Speicher wird geladen, wenn PV-Leistung maximal ist). Hierdurch belasten die Einspeisespitzen zur Mittagszeit nicht das Stromnetz. In dem Excel-Tool wird davon ausgegangen, dass die maximale Einspeiseleistung auf 70% der Nennleistung begrenzt wird. Als Output wird in dem Tool je nach hinterlegtem Last- und Erzeugerprofil die notwendige Speicherkapazität berechnet, um die maximale Einspeiseleistung der PV-Anlage auf 70% zu begrenzen.

Die beiden erstellten Excel-Tools sind im digitalen Anhang zu finden.

### 3.1.5 Netzsimulation in PandaPower

Das Ziel der Netzsimulation im Niederspannungsnetz mit PandaPower besteht darin, den Einfluss der PV-Anlagen auf den Hausdächern sowie der Elektromobilität auf das Niederspannungsnetz zu untersuchen. Mit den Ergebnissen der Simulation kann der maximal mögliche Ausbau der Photovoltaikanlagen (in kWp) auf den Hausdächern und der Einfluss der Elektromobilität untersucht werden, ohne eine lokale Netzüberlastung zu verursachen. Es wird analysiert, wie der Ausbau der Photovoltaikanlagen und der Elektromobilität das Niederspannungsnetz in Rodder beeinflussen und mit welchen Betriebsstrategien von Batteriespeichern (siehe erstellte Excel-Tools) eine lokale Netzüberlastung verhindert werden kann.

Die Auswirkungen auf das Stromnetz werden hinsichtlich der Spannungsabweichung und der Leitungs- und Transformatorauslastung in stündlicher Auflösung untersucht. Ob ein kritischer Netzzustand vorliegt, wird anhand von Referenzwerten bewertet. Nach der DIN EN 50160 muss die Spannung an den Knotenpunkten des Niederspannungsnetzes von  $\pm 6\%$  gegenüber der Nennspannung eingehalten werden. Die Stromleitungen sind auf den Nennstrom ausgelegt. Nach netzplanerischen Restriktionen sollten die Stromleitungen im Normalbetrieb nur zu 50% ausgelastet sein. Zusätzlich wird eine Transformatorauslastung von 70% im Normalbetrieb angenommen, um einen Puffer für kurzfristige Spitzen zu gewährleisten. [7, 8]

Für die Simulation wird für die Lastprofile ein Leistungsfaktor  $\cos(\varphi)$  zwischen 0,9 und 0,95 angesetzt. Bei den PV-Anlagen wird eine Q(U)-Regelung am Wechselrichter angenommen. Hierbei wird in Abhängigkeit von der Netzspannung entweder induktive oder kapazitive Blindleistung bezogen. Im Verbraucher-Zählpfeilsystem kann durch induktiven Blindleistungsbezug die Netzspannung gesenkt werden.



In der Abbildung 5 ist schematisch der Aufbau des Codes in PandaPower dargestellt.

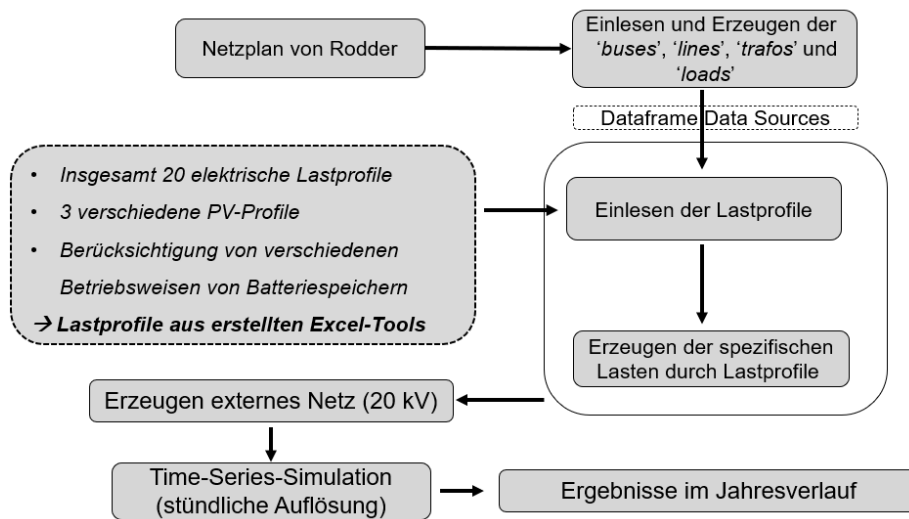


Abbildung 5: schematischer Aufbau des Codes in PandaPower [eigene Darstellung]

Der Python-Code für PandaPower ist im digitalen Anhang zu finden.

### 3.1.6 Energiesystemmodell in PyPSA

Basierend auf der Analyse des möglichen Ausbaus von PV auf den Hausdächern im Verteilnetz, werden in einem nächsten Schritt mögliche Energieversorgungskonzepte dargestellt, um Rodder in jeder Stunde im Jahr klimaneutral versorgen zu können. Hierbei wird der Zubau von einer PV-Freiflächenanlage und einer Windkraftanlage in Kombination mit einem gekoppelten Batteriespeicher im Mittelspannungsnetz untersucht. Im Gegensatz zum Verteilnetz werden hierbei nicht die Auswirkungen auf das Mittelspannungsnetz untersucht, sondern der Fokus liegt auf der Ausarbeitung und Konzeptionierung von gesamtheitlichen klimaneutralen Energiesystemmodellen.

Für die Analyse möglicher klimaneutraler Energieversorgungskonzepte wurde im Rahmen des Projektes ein pythonbasiertes Energiesystemmodell in PyPSA entwickelt. Mit Hilfe des Modells werden in Abhängigkeit der jährlichen elektrischen Autarkiequote die notwendigen Systemkomponenten wie Leistung EE-Erzeuger, Speicherkapazität Batteriespeicher sowie Lade/Entladeleistung des gekoppelten Batteriespeichers modelliert.



Im Folgenden wird der Aufbau des PyPSA-Modells kurz erläutert. Die Abbildung 6 zeigt den Aufbau des Energiemodells für das System der PV-Freiflächenanlage mit gekoppelten Batteriespeicher. Wenn die elektrische Last von Rodder zu einem Zeitpunkt höher ist als die PV-Erzeugung und der Batteriespeicher entladen ist, dann wird der Verbrauch aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen. In dem Modell ist für den Netzbezug ein Emissionsfaktor für den öffentlichen Strommix von 420 g/kWh hinterlegt [9].

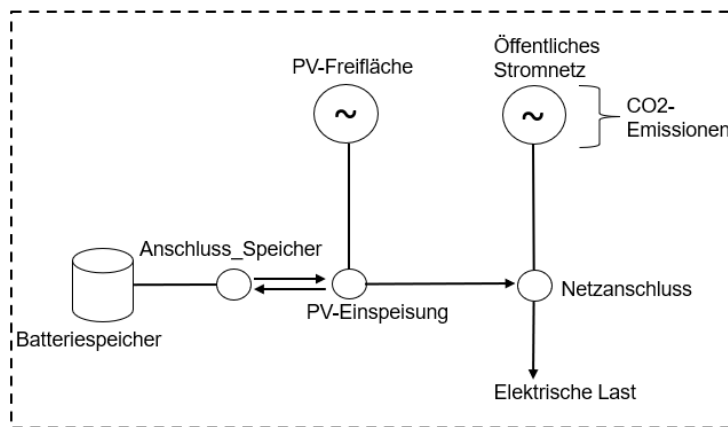


Abbildung 6: Systemskizze des PyPSA-Modells [eigene Darstellung]

Ferner wird in dem PyPSA-Modell eine Randbedingung vorgegeben (global constraint). Diese begrenzt den Einsatz der Primärenergie auf der Erzeugerseite. In dem Modell werden in einem iterativen Prozess schrittweise die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Systems reduziert und hierdurch der Strombezug aus dem öffentlichen Netz gesenkt (da nur der öffentliche Netzbezug CO<sub>2</sub> emittiert). Anhand der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und dem daraus resultierenden sinkendem Netzbezug, modelliert PyPSA wie auf der Erzeugerseite die Erneuerbaren Energien und Speicherkapazitäten ausgebaut werden müssen, um den Wegfall des Netzbezugs zu kompensieren. Für jeden iterativen Teilprozess wird anhand der eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen die Autarkiequote für Rodder bestimmt. Die folgenden Abbildungen zeigen in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Emissionen den Zusammenhang zwischen öffentlichem Strombezug aus dem Stromnetz (grid\_usage) und der Autarkiequote.

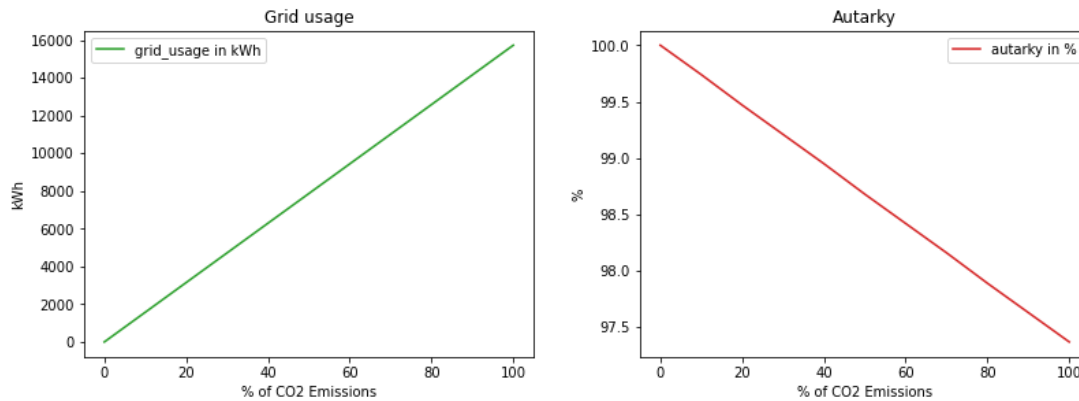


Abbildung 7: Zusammenhang zwischen Netzbezug und Autarkiequote in Abhängigkeit der CO2-Emissionen [eigene Darstellung]

Es ist zu erkennen, dass mit sinkenden CO2-Emissionen der Netzbezug (grid\_usage) sinkt. Gleichzeitig steigt mit sinkenden CO2-Emissionen die Autarkie an, weil kein Netzbezug aus dem öffentlichen Netz notwendig ist. Eine Autarkie von 100% resultiert in 0% CO2-Emissionen (EE decken gesamten Verbrauch von Rodder). In dem entwickelten PyPSA Modell wird folglich anhand der sinkenden CO2-Emissionen und dem daraus resultierenden sinkenden Netzbezug in iterativen Schritten auf der Erzeugerseite die notwendige EE-Leistung und Speicherkapazität modelliert, um in jeder Stunde im Jahr den Verbrauch von Rodder klimaneutral decken zu können. Der Code des PyPSA Modells ist im digitalen Anhang zu finden.

## 3.2 Wärmesektor

Für die Wärmeversorgung von Dörfern gibt es die unterschiedlichsten Konzepte. Im Rahmen der Projektarbeit wurden Wärmepumpen nicht berücksichtigt, da diese bei steigenden Vorlauftemperaturen einen schlechteren Wirkungsgrad aufweisen und das Stromnetz in Rodder zusätzlich belasten würden [10]. Zudem sind in dem Dorf die Gebäude teilweise schlecht gedämmt, sodass ein ökonomischer Betrieb von Wärmepumpen fraglich ist. Rodder ist von vielen Grünflächen und Wäldern umgeben. Diese Eigenschaft soll in der Projektarbeit genutzt werden. Folgende klimaneutrale Wärmeversorgungskonzepte werden genauer betrachtet und simuliert:

- Szenario 1: Solarthermie + Saisonspeicher
- Szenario 2: Solarthermie (Grundlastversorgung) in Kombination mit einer Holzhackschnitzelanlage (Spitzenlast) sowie einem Pufferspeicher

### 3.2.1 Lastprofile

Für die Ermittlung des Wärmebedarfs von Rodder wurde von dem Ingenieurbüro ibs Energie für eigene Untersuchungen eine Umfrage erstellt. In dieser konnten alle Hausbesitzer die Art der Wärmeerzeuger (Brennstoffart & Brennstoffverbrauch) angeben. Die von dem Ingenieurbüro erhobenen Daten wurden dem Masterprojektteam von dem Ortsbürgermeister zur Verfügung gestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Umfrage, wurde der thermische Verbrauch von Rodder ermittelt. Die Befragung des Ingenieurbüros ergab, dass im Referenzjahr der thermische Verbrauch von Rodder 1.760 MWh beträgt.

Um die fehlenden Daten des thermischen Verbrauchs der Hausbesitzer, die an der Umfrage nicht teilgenommen haben (keine Brennstoffverbrauch angegeben) zu ergänzen wurden Mittelwerte der vorhandenen Daten je nach Brennstoffart gebildet und in der Umfragetabelle ergänzt.

Für den Ölverbrauch ergibt sich ein Nutzwärmewert von 17.389 kWh, basierend auf einer Bestandsaufnahme von 49 mit Öl beheizten Häusern. Für die Holzheizung/Kamine wurden 19.440 kWh ermittelt, basierend auf einem Bestand von drei

Häusern. Der Stromverbrauch lag bei 5.502 kWh für acht Häuser. Bei diesem Wert ist zu beachten, dass teilweise Wärmepumpen mit einem hohen Wirkungsgrad im Bestand sind und die Teilnehmer mit Stromheizungen oft noch eine Holzheizung besitzen, die in der Wärmebedarfsrechnung ebenfalls berücksichtigt wurden aber nicht in der folgenden Tabelle auftauchen. Der Gasverbrauch liegt bei Besitzern von Gasheizungen bei 30.458 kWh für sechs Häuser. Die folgende Tabelle zeigt die Ermittlung des Nutzwärmebedarfs für die fehlenden Umfrageteilnehmer aus der Befragung.

Tabelle 1: Ermittlung des Nutzwärmebedarfs fehlender Umfrageteilnehmer [eigene Darstellung] [11], [12]

Ermittlung Nutzwärme =				
Heizwert [kWh] * Jahresnutzungsgrad * Durchschnittsverbrauch Rodder [kWh]				
Heizungsart	Heizwert [kWh]	Jahresnutzungsgrad	Durchschnittsverbrauch Rodder [kWh]	Ergebnis
Öl [Liter]	10,05	0,75	2307	17.389
Holz [Raummeter]	1800	0,6	18	19.440
Elektro [kWh]	1	0,9	6113	5.502
Gas [kWh]	10,36	0,9	3267	30.458

Basierend auf den ermittelten jährlichen Wärmeverbräuchen, kann anschließend ein Wärmelastprofil erstellt werden. Dies wurde in folgenden vier Schritte ermittelt:

1.) Ermittlung der Temperatur-Tagesmittelwerte Rodder 2021

- Die Daten für die tägliche Durchschnittstemperatur basieren auf einer vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Wetterstation in der Nähe von Rodder. [13]

## 2.) Ermittlung der Summen der Heizgradtage im Jahr aus Wetterdaten

- In diesem Schritt wird angenommen, dass die Bausubstanz des Dorfes Rodder älter ist und daher bereits ab einer durchschnittlichen Außentemperatur ab unter 15 °C geheizt werden muss. Um die Summe der Heizgradtage zu ermitteln, werden folgende Schritte durchgeführt:
- Differenz zwischen Heizgrenztemperatur und durchschnittliche Außentemperatur AVG bilden (15 °C – Durchschnittstemperatur Tag)
- Summe aus allen Heizgradtage bilden: HGT pro Jahr 2837.53

## 3.) Ermittlung täglicher Wärmebedarf: Tägliche Heizgradtage durch Summe aller Heizgradtage

- Um den jährlichen Wärmebedarf von Rodder auf einen anteiligen Energiebedarf pro Tag zu berechnen, werden die täglichen Heizgradtage durch die Summe aller Heizgradtage geteilt. Die sich daraus ergebende Prozentwert für jeden Tag wird mit dem jährlichen Energiebedarf für Rodder verrechnet. Daraus ergibt sich der tägliche Wärmebedarf für das Dorf Rodder.

Beispielrechnung: Wintertag mit -2°C durchschnittlicher Außentemperatur

$$15^{\circ}\text{C} - (-2^{\circ}\text{C}) = 17$$

$$\frac{17}{2837,53} = 0,00599$$

$$0,00599 * 1.760.806 \text{ kWh} = 10.549,21 \text{ kWh}$$

Anteil HGT \* Jahresheizwärmemenge -> Jahreswärmemenge auf 365 Tage verteilt

## 4.) Tageswärmebedarf auf stündlichen Wärmebedarf aufteilen

- In Schritt vier wurden die Tage in Wintertag, Übergangstag und Sommer tag unterteilt, da sich je nach Jahreszeit das Tageslastprofil einer Heizung ändert. Die Jahreszeiten wurden wie Folgt bestimmt:
- Wintertag: durchschnittliche Tagesaußentemperatur < 5°C

- Übergangszeit: durchschnittliche Tagesaußentemperatur von 5-12°C
- Sommerzeit: durchschnittliche Tagesaußentemperatur >12°C

5.) Lastprofilerstellung: Stundenwerte des Jahres richtig anordnen

- Im nächsten Schritt wurden, der jeweilige Tägliche Wärmebedarf mit dem entsprechenden Tageslastprofil verrechnet, wodurch sich aus den 365 Tageswerten 8760 Stundenwerte pro Jahr ergaben. Diese 8760 Werte wurden mit dem Power Query-Editor so umgewandelt, dass die 8760 Stundenwerte in der richtigen Reihenfolge in einer Spalte aufgelistet wurden.

Daraus ergibt sich das Folgende Heizlastprofil und die thermische Jahresdauerlinie für Rodder:

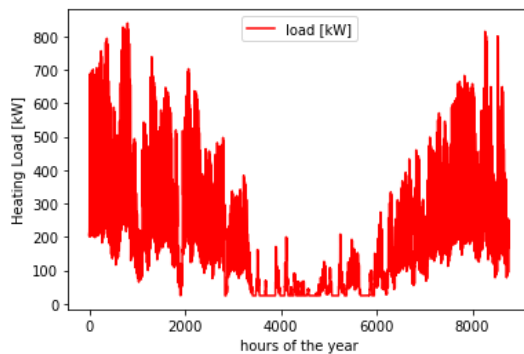


Abbildung 8: Heizlastprofil [eigene Darstellung]

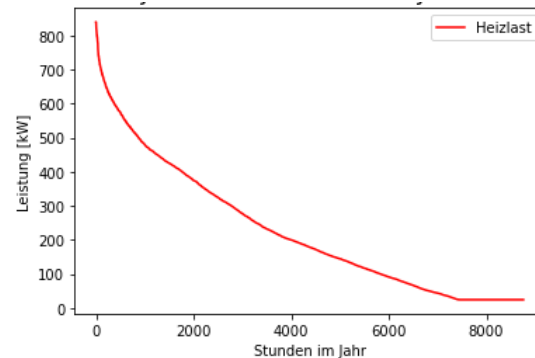


Abbildung 9: thermische Jahresdauerlinie [eigene Darstellung]

Die Excel-Dateien für die Berechnungen der Verbraucherlastprofile sind im digitalen Anhang zu finden.

### 3.2.2 Erzeugerprofile

Für das Erzeugungsprofil einer Freifläche-Solarthermieanlage wurde als Referenzmodell das Modell Vitosol 200-T von Viessmann verwendet. Dieser Freiflächen-Vakuum-Röhrenkollektor ist für die Verwendung in Nahwärmenetzen konzipiert. Ein Kollektor ist 5,05 m<sup>2</sup> groß, hat einen optischen Wirkungsgrad von 61,7% und kann Temperaturen bis 120°C erzeugen. [14]

Weiterhin werden für die Erstellung des Erzeugerprofils die Werte für die Globalstrahlung in Rodder benötigt. Diese wurden aus Messdaten einer nahegelegenen vom Deutschen Wetterdienst betriebenen Messstation aus dem Referenzjahr

2021 entnommen, da die Daten für 2022 noch nicht vollständig vorhanden waren. [15]

Aus den Globalstrahlungsdaten und dem optischen Wirkungsgrad des Referenzkollektors, kann dann das Erzeugerprofil einer Solarthermieanlage über ein Jahr erstellt werden. Die Abbildung 10 zeigt das auf 1 kWp normierte erstellte Erzeugungsprofil der Solarthermieanlage.

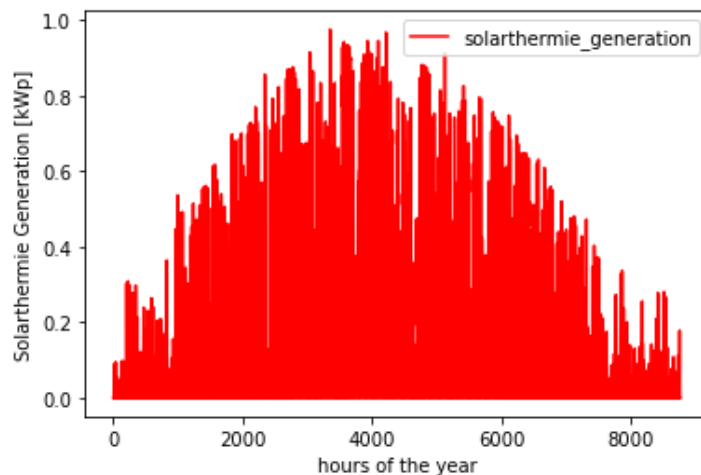


Abbildung 10: Erzeugungsprofil Solarthermie auf 1 kWp normiert [eigene Darstellung]

Die Excel-Dateien für die Berechnungen der Erzeugerlastprofile sind im digitalen Anhang zu finden.

### 3.2.3 Struktur Nahwärmenetz & Ermittlung Speichervolumen sowie Transmissionswärmeverluste

Durch die Betrachtung eines zentralen Nahwärmenetzes inklusive Speichersysteme entstehen weitere Verluste, die vorher bei den einzelnen dezentralen Wärmeerzeugern keine Rolle gespielt haben. Vor allem die wasserführenden Leitungsrohre haben aufgrund der Temperaturdifferenz zum Erdreich und ihrem großen Oberflächen-Volumen Verhältnis einen Wärmeverlust.

Die Rohrleitungen zur Versorgung aller Wohnhäuser mit Wärme mittels Nahwärmenetz wurden in einem Netzplan geplant und dann mittels Google Maps vermessen. Die Abbildung 11 stellt den im Rahmen des Projektes erstellten Nahwärmenetzplan mit den Wärmeerzeugern und Speichern dar.



Abbildung 11: Exemplarische Darstellung des Nahwärmenetzes Rodder mit Hackschnitzelheizwerk, Solarthermie und dem saisonalen/täglichen Wärmespeicher [eigene Darstellung]

Dabei sind sowohl die Leitungen des Vorlaufs als auch die des Rücklaufs berücksichtigt worden. Ebenfalls ist zu beachten, dass die Hauptleitung aber andere Rohrdurchmesser als die Nebenleitungen und die Hausanschlussleitungen besitzen. Die Tabelle stellt die genutzten Parameter (Leitungslänge, Rohrdurchmesser und Dämmung) zur Auslegung des Nahwärmenetzes dar.

Tabelle 2: Nahwärmenetz mit Verteilnetzparameter für Wärmeverlustberechnung [eigene Darstellung]

Leitungen	Vor- und Rücklauf [m]	Rohrdurchmesser [mm]	Dämmung [W/m <sup>2</sup> *K]
Hauptleitung	1440	75/142	0,196
Linker arm	290	40/91	0,154
rechter arm	648	40/91	0,154
Neubaugebiet	300	40/91	0,154
Hausanschlüsse	582	25/77	0,117
Summe Rohrleitung:	<b>3260</b>		



---

Der Saisonspeicher und der Pufferspeicher werden aufgrund ihrer Größe und der über das Jahr konstant bleibenden Erdreichtemperatur 2 m tief in der Erde vergraben. Dort besitzt das Erdreich über das Jahr hinweg 8-12°C (Mittelwert 10°C). [16] Dies ist im Winter von Vorteil, da im Erdreich geringere Wärmeverluste des Speichers einhergehen.

Aufgrund des günstigen Oberflächenvolumenverhältnisses sowie der Dämmung des Speichers mit einem geringen Wärmedurchgangskoeffizienten von 0,12 W/m<sup>2</sup>\*K und der zusätzlichen konstanten Erdreichtemperatur von 10°C in dem 2 m tiefen Erdreich, sind die Entladeverluste/Wärmeverluste des Speichers sehr gering. Bei der Berechnung werden eventuell vorhandene Wärmebrücken durch die Rohrleitungen vernachlässigt. Im Anhang D sind für einen Saisonspeicher beispielhaft die ermittelten thermischen Entladeverluste dargestellt.

Der jeweiligen thermischen Entladeverluste (% pro Stunde) je nach Speichergröße des Puffer- und Saisonspeichers werden in der PyPSA und Excelsimulation (siehe folgende Kapitel) berücksichtigt. Die Rohrleitungswärmeverluste des Nahwärmenetzes werden gleichmäßig über das Jahr auf das bereits in Kapitel 3.2.1 vorhandene Heizlastprofil von Rodder aufgeteilt. Hierdurch werden in der späteren Simulation die anfallenden thermischen Verluste im Nahwärmenetz berücksichtigt.

Die Excel-Dateien für die Berechnungen der Leitungs- und Speicherverluste sind im digitalen Anhang zu finden.

#### 3.2.4 Energiesystemmodell in PyPSA

Auf Basis der vorherigen Berechnungen wird anschließend das erste Energieversorgungskonzept dargestellt, um Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutraler zu versorgen. Hierbei wird eine Solarthermie-Freiflächenanlage in Kombination mit einem saisonalen Wärmespeicher betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Ausarbeitung und Konzeptionierung eines gesamtheitlichen klimaneutralen Energiesystemmodellen.

Für die Analyse eines klimaneutralen Energieversorgungskonzeptes wurde im Rahmen des Projektes ein pythonbasiertes Energiesystemmodell in PyPSA

entwickelt. Für die Analyse der thermischen Versorgung wurde der PyPSA-Code aus dem Stromsektor teilweise angepasst und modifiziert. Der Aufbau und die Funktion des PyPSA-Energiesystemmodells für den Wärmesektor entsprechen allerdings dem im Kapitel 3.1.6 erläuterten Aufbau.

Mit Hilfe des Modells werden in Abhängigkeit der jährlichen thermischen Autarkiequote die notwendigen Systemkomponenten wie Leistung der Wärmeerzeuger und Speicherkapazität des Saisonspeichers modelliert. Die Abbildung 12 zeigt den Aufbau des Energiemodells für das System der Solarthermie-Freiflächenanlage mit gekoppelten Saisonspeicher.

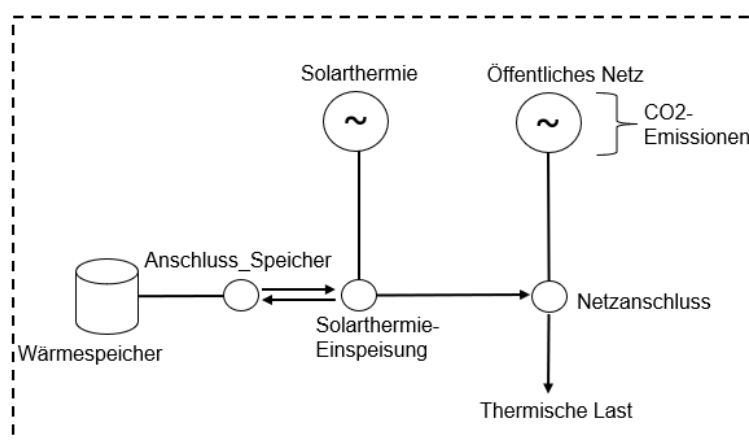


Abbildung 12: Systemskizze des PyPSA-Modells [eigene Darstellung]

### 3.2.5 Exceltool für Ermittlung Lastprofil Holzhackschnitzelanlage

Das zweite Energieversorgungskonzept, um Rodder zu jeder Stunde im Jahr mit klimaneutraler Wärme zu versorgen besteht aus den Anlagenkomponenten einer Solarthermie-Freiflächenanlage mit Pufferspeicher (Grundlastabdeckung) und einer Holzhackschnitzelanlage zur Abdeckung der Spitzenlasten. Der Fokus liegt dabei auf der Ausarbeitung und Konzeptionierung eines gesamtheitlichen klimaneutralen Energiesystemmodellen.

Für die Analyse des zweiten klimaneutralen Energieversorgungskonzeptes wurde im Rahmen des Projektes ein excelbasiertes Energiesystemmodell entwickelt. Durch Festlegen der Verbräuche über das Heizlastprofil von Rodder, der Solarthermie-Anlagenleistung auf 700 kW und der Speicherkapazität des Pufferspeichers auf 100 m<sup>3</sup> kann die Leistung der Holzhackschnitzelanlage in stündlicher

---

Auflösung über ein Jahr ermittelt werden. Die Hackschnitzelanlage wird immer dann betrieben, wenn der thermische Verbrauch nicht von der Solarthermieanlage und dem Pufferspeicher gedeckt werden kann.

Das Excel-Tool zur Ermittlung des Erzeugungsprofils der Hackschnitzelanlage ist im digitalen Anhang zu finden.

## 4 Ergebnisdarstellung Stromsektor

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der klimaneutralen Versorgung des Stromsektors vorgestellt.

### 4.1 Simulation in PandaPower (Verteilnetz)

Das Ziel der Simulation mit PandaPower besteht darin, den maximal möglichen Ausbau der Photovoltaikanlagen auf den Hausdächern und den Einfluss der Elektromobilität zu untersuchen, ohne eine lokale Netzüberlastung zu verursachen. Hierbei werden drei verschiedene Szenarien analysiert und ausgewertet.

Im ersten Szenario wird davon ausgegangen, dass keine Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen in den Häusern vorhanden sind. Es erfolgt eine PV-Überschusseinspeisung.

Im zweiten Szenario werden Batteriespeicher mit konventioneller Betriebsweise berücksichtigt. Wenn es eine PV-Überproduktion gibt und der Eigenverbrauch gedeckt ist, wird der Speicher geladen. Wenn der Speicher voll ist, erfolgt eine PV-Netzeinspeisung.

Im dritten Szenario wird die Betriebsweise der Batteriespeicher netzoptimiert angepasst. Hierbei wird die maximale Einspeiseleistung der PV-Anlage begrenzt und der Batteriespeicher erst bei Erreichen dieser Grenze geladen.

Abschließend werden beide Speicher-Betriebsweisen miteinander verglichen und eine Empfehlung gegeben.

#### 4.1.1 Szenario 1 (kein Batteriespeicher)

Die Simulation mit PandaPower zeigt, dass im ersten Szenario ohne Batteriespeicher auf 50% der Hausdächer Photovoltaikanlagen (~540 kWp) im Verteilnetz ohne eine Netzüberlastung installierbar sind. Die Abbildung 13 zeigt die Spannung über das Jahr für jeden Netzknoten. Es ist zu erkennen, dass auch unter Berücksichtigung der Elektromobilität die Spannungsabweichung nach unten überwiegend eingehalten werden kann. Nur einmal sinkt die Netzspannung, aufgrund einer hohen Last, unter den kritischen Wert von -6% (roter Kreis).

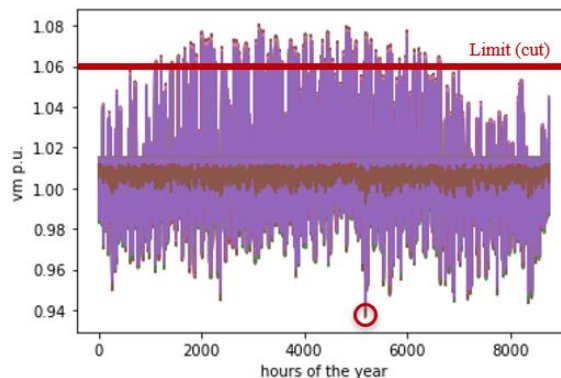


Abbildung 13: Spannungsband ohne Batteriespeicher. Durch die Abregelung gehen jährlich 18,9 MWh verloren. [eigene Darstellung]

Durch Demand Response könnten perspektivisch aber Lastspitzen verschoben werden und eine zu starke Spannungssenkung verhindert werden. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Nutzung von Elektromobilität das Niederspannungsnetz nicht überlastet. Dies ist auf die verwendeten Lastprofile mit den unterschiedlichen Ladeverhalten zurückzuführen (geringer Gleichzeitigkeitsfaktor).

Die Spannungsabweichung nach oben, durch die PV-Erzeugung, belastet das Stromnetz insbesondere im Sommer. Die Netzspannung liegt regelmäßig über dem kritischen Wert von +6%. Da in diesem Szenario keine Batteriespeicher berücksichtigt werden, müssen die PV-Anlagen abgeregelt werden, wenn die Spannungsgrenze überschritten wird (rote Linie). Durch die Abregelung der PV-Anlagen gehen 18,9 MWh pro Jahr verloren. Dies entspricht 2,85% der jährlichen Erzeugung. Die energetischen Verluste durch die Abregelung könnten durch Demand Response verringert werden, wenn flexible Verbraucher wie beispielsweise Waschmaschinen oder das Laden von E-Autos in Zeiten mit einer hohen PV-

---

Erzeugung genutzt werden. Die Berechnung der energetischen Verluste kann der Excel-Datei im digitalen Anhang entnommen werden

Die maximale Auslastung des Transformators liegt bei 110%. Da es sich bei dem Stromnetz um ein offenes Ringnetz handelt, kann bei einer Überlastung eines Transformators der Trennschalter geöffnet werden und der zweite Transformator kann kurzzeitig die Last übernehmen. Die maximale Auslastung der Stromleitungen liegt bei 68%. Die Werte für die Auslastung des Transformators und der Stromleitungen beziehen sich darauf, wenn die PV-Anlagen nicht abgeregelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Auslastung bei entsprechender Abregulierung sinken wird. Die Ergebnisdiagramme für den Transformator und die Stromleitung sind im Anhang A zu finden.

#### 4.1.2 Szenario 2 (konventioneller Batteriespeicher)

In diesem Szenario werden Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen mit einer einfachen und konventionellen Betriebsweise berücksichtigt.

Die Abbildung 14 illustriert für einen Beispieltag die Betriebsweise eines Speichers mit einer Kapazität von 5 kWh. Sobald es eine PV-Überproduktion gibt und der Verbrauch gedeckt ist, wird der Speicher geladen (zwischen 6 und 9 Uhr). Wenn der Speicher voll ist, erfolgt eine PV-Netzeinspeisung (ab 9 Uhr). Diese Betriebsweise zielt auf die Maximierung des Eigenverbrauchs und der Autarkie ab. Diese Betriebsart entlastet nicht das Stromnetz, da bei maximaler PV-Erzeugung (12 Uhr) der Speicher bereits vollgeladen ist. Die Einspeisespitze belastet weiterhin das Stromnetz. Am Abend, wenn der Verbrauch größer als die PV-Erzeugung ist, wird der Speicher wieder entladen (ab 17 Uhr).

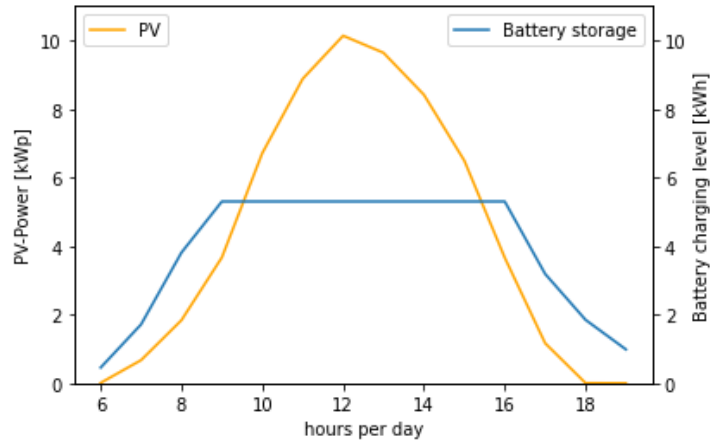


Abbildung 14: konventionelle Betriebsweise eines Batteriespeichers für einen Beispieltag [eigene Darstellung]

Für die Simulation in PandaPower wurden Batteriespeicher mit einer Kapazität von 5,8 und 12 kWh angenommen. Zudem wurde angenommen, dass jedes Haus mit einer Photovoltaikanlage auch einen Batteriespeicher besitzt. Die detaillierte Zuordnung der verwendeten synthetischen Lastprofile zu den PV-Erzeugungsprofilen und den jeweiligen Speicherkapazitäten können der Excel-Datei „*Betriebsweise\_einfacher\_Speicher*“ im digitalen Anhang entnommen werden.

Die Simulation mit PandaPower zeigt, dass im zweiten Szenario mit konventionellem Batteriespeicher, wie im Szenario 1 ohne Speicher, ebenfalls auf 50% der Hausdächer Photovoltaikanlagen (~540 kWp) im Verteilnetz ohne eine Netzüberlastung installierbar sind. Die Abbildung 15 zeigt die Spannung über das Jahr für jeden Netzknoten. Es ist zu erkennen, dass durch die Speicher der Spannungsabfall reduziert werden kann und kein kritischer Netzzustand mit einer Spannung von -6% eintritt.

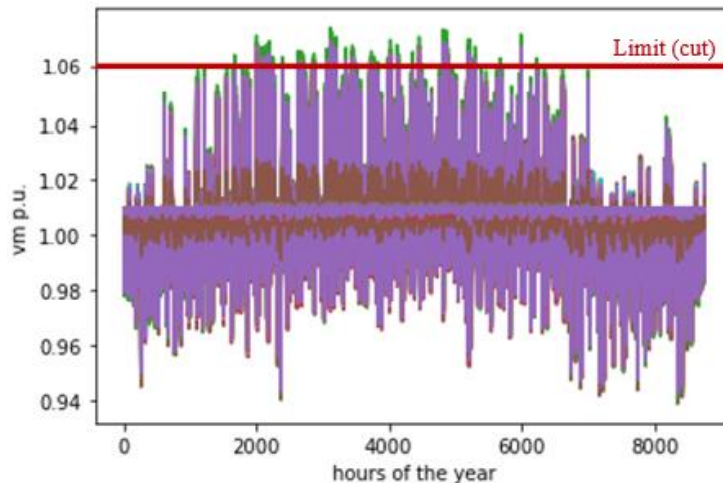


Abbildung 15: Spannungsband mit konventionellen Batteriespeichern. Der Spannungsabfall kann durch Speicher reduziert werden. Eine Netzentlastung bei PV-Einspeisung findet nicht statt. Durch die Abregelung gehen jährlich 12,7 MWh verloren. [eigene Darstellung]

Wie bereits erläutert, wird das Netz durch die konventionelle Betriebsweise der Speicher nicht entlastet. Die Einspeisespitzen zur Mittagszeit bleiben weiterhin bestehen. Hierdurch steigt die Netzspannung insbesondere im Sommer auf über +6% an. Trotz der Berücksichtigung von Batteriespeichern müssen die Photovoltaikanlagen abgeregelt werden, wenn die Spannungsgrenze überschritten wird (rote Linie). Durch die Abregelung der PV-Anlagen gehen 12,7 MWh pro Jahr verloren. Dies entspricht 1,91% der jährlichen Erzeugung. Die energetischen Verluste durch die Abregelung könnten durch Demand Response verringert werden, wenn flexible Verbraucher in Zeiten mit einer hohen PV-Erzeugung genutzt werden. Die Berechnung der energetischen Verluste kann der Excel-Datei im digitalen Anhang entnommen werden

Die maximale Auslastung des Transformators liegt bei 105%. Die maximale Auslastung der Stromleitungen liegt bei 65%. Die Werte für die Auslastung des Transformators und der Stromleitungen beziehen sich darauf, wenn die PV-Anlagen nicht abgeregelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Auslastung bei entsprechender Abregelung sinken wird. Die Ergebnisdiagramme für den Transformator und die Stromleitung sind im Anhang A zu finden.

### 4.1.3 Szenario 3 (netzdienliche Betriebsweise Batteriespeicher)

In diesem Szenario werden die Batteriespeicher mit einer netzdienlichen Betriebsweise betrachtet. Die Abbildung 16 illustriert für einen Beispieltag die netzdienliche Betriebsweise eines Batteriespeichers.

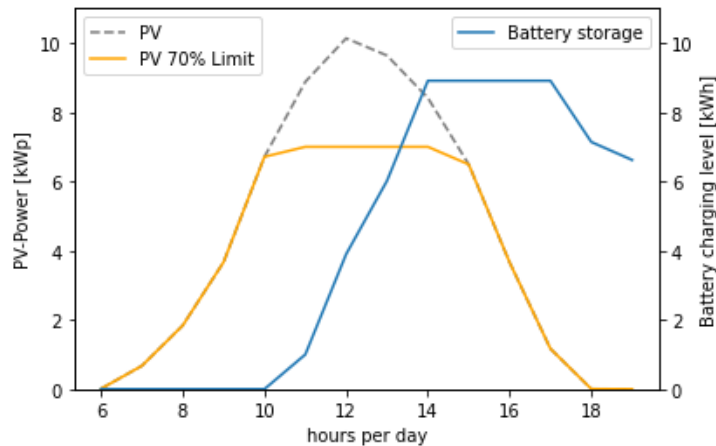


Abbildung 16: netzdienliche Betriebsweise eines Batteriespeichers für einen Beispieltag. Der Speicher entlastet das Netz [eigene Darstellung]

Die maximale Einspeiseleistung der Photovoltaikanlage wird auf 70% der Nennleistung ( $P_{Peak}$ ) begrenzt (gelbe Kurve). Der Batteriespeicher wird nur geladen, wenn die Leistung der Photovoltaikanlage die maximale Einspeiseleistung erreicht. In der Abbildung ist zu erkennen, dass der Batteriespeicher zwischen 10 und 14 Uhr geladen wird, wenn die Einspeiseleistung der Photovoltaikanlage maximal ist. Sobald die Leistung der Photovoltaikanlage unter die maximale Einspeiseleistung von 70%  $P_{Peak}$  sinkt, erfolgt eine Netzeinspeisung und der Speicher wird nicht mehr geladen (ab 14 Uhr). Die Speicherfüllstand bleibt konstant, bis der Verbrauch nicht mehr durch die Photovoltaikanlage gedeckt werden kann und der Speicher entladen wird (ab 17 Uhr).

Für die Simulation in PandaPower wird angenommen, dass jedes Haus mit einer Photovoltaikanlage auch einen Batteriespeicher besitzt. Die detaillierte Zuordnung der verwendeten synthetischen Lastprofile zu den PV-Erzeugungsprofilen können der Excel-Datei „Betriebsweise\_netzdienlicher\_Speicher“ im digitalen Anhang entnommen werden.



---

Die Simulation mit PandaPower zeigt, dass im dritten Szenario mit einer netzdienlichen Betriebsweise von Batteriespeichern mehr Photovoltaikanlagen auf den Hausdächern im Verteilnetz installiert werden können. Durch die netzdienliche Betriebsweise der Batteriespeicher kann auf 75% der Hausdächer eine Photovoltaikanlage ohne eine Netzüberlastung installiert werden. Aufgrund der netzdienlichen Betriebsweise der Batteriespeicher können, im Vergleich zu den Szenarien 1 und 2, 25% mehr Photovoltaikanlagen auf den Hausdächern in Rodder installiert werden. Die installierbare Leistung der Photovoltaik steigt somit von ~540 kWp (Szenario 1 & 2) auf ~810 kWp an.

In der Simulation mit PandaPower wurden keine Speicherkapazitäten vorgegeben. Mit Hilfe eines erstellten Excel-Tools (vgl. Kapitel 3.1.4) wurde für jedes Verbraucherlastprofil die maximal notwendige Speicherkapazität bestimmt, um die maximale Einspeiseleistung der Photovoltaik auf 70% von  $P_{Peak}$  zu begrenzen. Je nach Lastprofil und Erzeugungsprofil der Photovoltaik müssen die Batteriespeicher eine Kapazität zwischen 5 und 21 kWh besitzen, um die Einspeiseleistung der Photovoltaik auf 70% von  $P_{Peak}$  zu begrenzen.

Die Abbildung 17 zeigt die Spannung über das Jahr für jeden Netzknoten. Es ist zu erkennen, dass durch die netzdienliche Betriebsweise der Speicher das Stromnetz entlastet wird. Es tritt kein kritischer Zustand mit einer Spannungsabweichung von  $\pm 6\%$  auf. Die Batteriespeicher kappen die Einspeisespitzen der Photovoltaikanlagen. Wie auch in den ersten beiden Szenarien führt die Elektromobilität nicht zu einer Überlastung des Stromnetzes. Grundsätzlich könnte aber durch Demand Response das Stromnetz auch entlastet werden, indem flexible Verbraucher (z.B. E-Mobilität) in Zeiten mit einer hohen PV-Erzeugung genutzt werden.

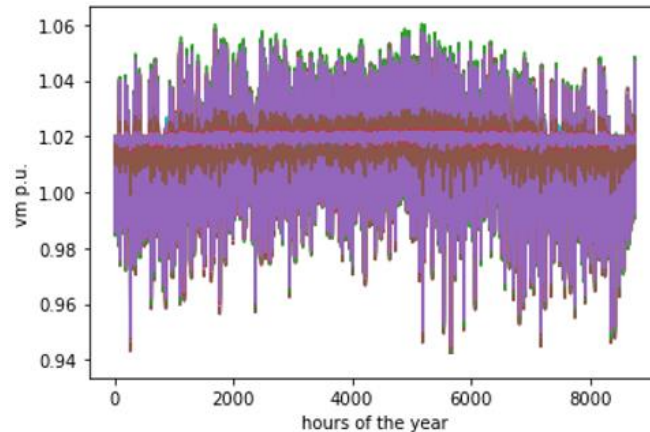


Abbildung 17: Spannungsband mit netzdienlichen Batteriespeichern. Die Speicher entlasten das Stromnetz und es tritt kein kritischer Netzzustand durch E-Mobilität oder Photovoltaik ein. [eigene Darstellung]

In der Abbildung 18 ist Auslastung der Transformatoren dargestellt. Die Transformatoren 0 und 1 befinden sich in Rodder. Der Transformator 2 versorgt nur einen landwirtschaftlichen Betrieb außerhalb des Dorfes.

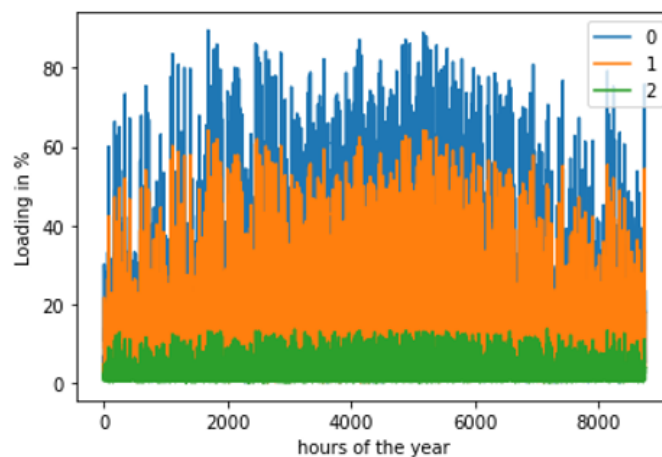


Abbildung 18: Transformatorauslastung mit netzdienlichen Speichern. Die Speicher reduzieren die Auslastung durch PV-Erzeugung [eigene Darstellung]

Die Auslastung der Transformatoren wird durch die Scheinleistung bestimmt. Die Scheinleistung wird nach dem Pythagoras aus der Wirkleistung und der Blindleistung berechnet. Die Blindleistung ist von dem Leistungsfaktor  $\cos(\varphi)$  abhängig. In der Simulation wurde für alle Verbraucher ein  $\cos(\varphi)$  zwischen 0,9 und 0,95 verwendet. Für die Photovoltaikanlagen wurde ein induktiver  $\cos(\varphi) = 0,95$  genutzt. Um die Scheinleistung und somit die Auslastung der Transformatoren zu bestimmen, müssen an jedem Knoten die Wirk- und Blindleistung von hinten nach vorne aufsummiert werden. [17]

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die Transformatoren 0 und 1 am stärksten ausgelastet sind. Nach netzplanerischen Restriktionen sollte ein Transformator im Normalbetrieb nur zu 70% ausgelastet werden, um einen Puffer für kurzfristige Spitzen zu haben. Der Transformator 0 befindet sich in der Mitte des Dorfes (vgl. Kapitel 3.1.3) und ist am höchsten ausgelastet. Kurzzeitig wird der Transformator 0 zu über 70% ausgelastet. Allerdings ist dies kein kritischer Netzzustand, da die Auslastung über 70% in den Worst-Case-Zeitpunkten stattfindet und die Auslastung zu keinem Zeitpunkt im Jahr über 100% liegt. Aufgrund des offenen Ringnetzes kann bei einer Überlastung des Transformators 0 der Trennschalter geöffnet werden und der Transformator 1 kann kurzzeitig die Last übernehmen. Der Transformator 2 hat die geringste Auslastung, da dieser nur einen landwirtschaftlichen Betrieb außerhalb des Dorfes versorgt und sonst keine weiteren Lasten oder Erzeuger angeschlossen sind. Es kann festgehalten werden, dass in dem Szenario mit einer netzdienlichen Betriebsweise der Batteriespeicher die Transformatoren nicht überlasten und kein kritischer Netzzustand auftritt.

Neben der Spannungsabweichung und der Transformatorauslastung wird auch die Auslastung der Stromleitungen berücksichtigt. Nach netzplanerischen Restriktionen sollten diese im Normalbetrieb nicht mehr als 50% ausgelastet sein, um einen Puffer für kurzfristige Spitzen zu haben. Die Stromleitungen sind auf den Nennstrom ausgelegt. Die Abbildung 19 zeigt die Auslastung der Stromleitungen.

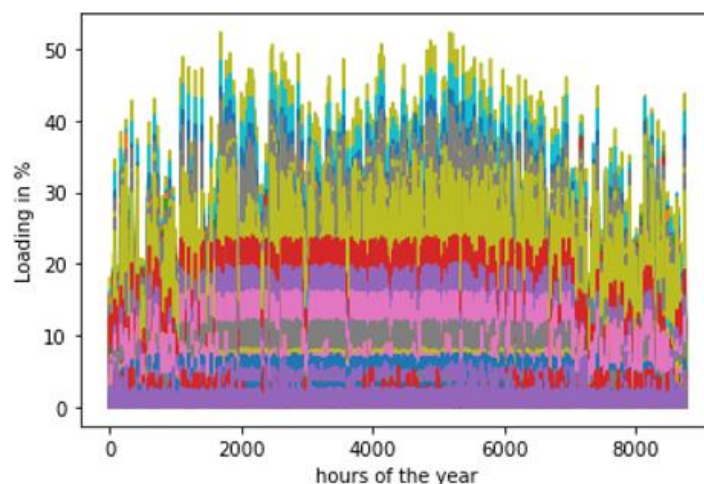


Abbildung 19: Auslastung Stromleitungen mit netzdienlichen Speichern [eigene Darstellung]

---

Es ist zu erkennen, dass die Stromleitungen teilweise zu über 50% ausgelastet werden. Allerdings ist dies kein kritischer Netzzustand, da die Auslastung über 50% in den Worst-Case-Zeitpunkten stattfindet und die Auslastung zu keinem Zeitpunkt im Jahr über 100% liegt. Der maximale Strom auf den Leitungen ist geringer als der Nennstrom für den die Kabel ausgelegt sind.

Grundsätzlich kann zusammengefasst werden, dass durch die netzdienliche Betriebsweise der Batteriespeicher das Stromnetz entlastet wird. Im Vergleich mit den Szenarien ohne Batteriespeicher und mit konventionellem Batteriespeicher können mit der netzdienlichen Betriebsweise 25% mehr Photovoltaikanlagen auf den Hausdächern in Rodder installiert werden. Die installierbare Leistung der Photovoltaik steigt somit von ~540 kWp (Szenario 1 & 2) auf ~810 kWp an.

#### 4.1.4 Vergleich der Betriebsweisen von Batteriespeichern

In den vorherigen Kapiteln wurden zwei verschiedene Betriebsweisen von Batteriespeichern in Kombination mit Photovoltaik dargestellt und die Auswirkungen auf das Stromnetz untersucht. Vor allem in ländlichen Gebieten kann das volle PV-Potenzial aufgrund von Engpässen im Verteilnetz nicht genutzt werden. Es ist deutlich geworden, dass die konventionelle Betriebsweise (Szenario 2) das Stromnetz nicht entlastet, da der Speicher vollgeladen ist, wenn die maximale PV-Erzeugung vorhanden ist. Wenn die Batteriespeicher allerdings in Zeiten mit der maximalen PV-Erzeugung geladen werden, können die Einspeisespitzen gekappt werden und das Stromnetz wird entlastet. Durch die netzdienliche Betriebsweise können mehr Photovoltaikanlagen installiert werden und ein Netzausbau in ländlichen Gebieten kann vermieden werden oder ist erst später notwendig.

Für die meisten Hausbesitzer ist die Maximierung des Eigenverbrauchs am wichtigsten, da die Nutzung des PV-Stroms zum Eigenverbrauch ökonomische Vorteile bietet. Die Maximierung des Eigenverbrauchs und Erhöhung der Autarkie ist ökonomisch vorteilhaft, da die Netzbezugskosten höher sind als die Einspeisevergütung. Die Untersuchung in dem Projekt hat gezeigt, dass die konventionelle Betriebsweise der Batteriespeicher und die damit verbundene Erhöhung der Autarkie nicht das Verteilnetz entlastet.

---

Zum anderen können Batteriespeicher so betrieben werden, dass das Verteilnetz entlastet wird. Hierbei wird jedoch nicht die Erhöhung der Autarkie priorisiert. Es gibt also einen Widerspruch zwischen den beiden Betriebsmodi. Auf der einen Seite sollen Batteriespeicher die Autarkie erhöhen. Auf der anderen Seite sollen Batteriespeicher netzdienlich betrieben werden. Daher wäre eine Kombination der beiden Betriebsarten zu empfehlen. In diesem Fall hat der Speicherbetreiber den Vorteil, dass der Eigenverbrauch der PV-Anlage verbessert wird, und der Netzbetreiber profitiert von einer geringeren Belastung des Netzes.

Grundsätzlich sind zwei intelligente hybride Betriebsarten möglich. Die erste intelligente Betriebsweise legt den Schwerpunkt auf die Autarkie, es wird aber auch die Einspeisung berücksichtigt. In dieser Betriebsweise wird der Speicher so voll wie möglich gehalten. Aber die benötigte Kapazität für die PV-Erzeugung des nächsten Tages wird durch eine bestimmte Entladung ins Netz eingespeist. Dieser Modus benötigt eine Schätzung der überschüssigen PV-Erzeugung des nächsten Tages. Es wird die PV-Erzeugung für den nächsten Tag prognostiziert und die benötigte Speicherkapazität freigehalten. Auf diese Weise wird die Autarkie erhöht und die Einspeisespitzen der Photovoltaik werden in den Speicher eingespeist. Wenn die prognostizierte überschüssige PV-Erzeugung für den nächsten Tag nicht genau ist, kann Energie verloren gehen, wenn nicht genug Speicherkapazität vorhanden ist. [18]

Die zweite intelligente Betriebsweise legt den Schwerpunkt auf die Einspeisung, es wird aber auch die Autarkie berücksichtigt. In dieser Betriebsweise wird der Speicher so weit wie möglich entladen. Aber der Verbrauch des nächsten Tages wird im Speicher gelassen. Dieser Modus benötigt eine Schätzung des Verbrauchs für den nächsten Tag. Es wird der Verbrauch für den nächsten Tag prognostiziert und der benötigte Verbrauch im Speicher belassen. Auf diese Weise werden Energieverluste unwahrscheinlicher, aber die Autarkie kann sinken, wenn aufgrund einer schwachen Vorhersage nicht genügend Energie im Speicher vorhanden ist. [18]

Die erste Betriebsmodus, bei dem der Fokus auf der Autarkie liegt, wird für die meisten Speicherbetreiber und Hausbesitzer vermutlich relevanter sein. Daher

wird empfohlen das in Kapitel 4.1.3 vorgestellte Szenario 3 anzupassen. Die Speicher werden zwar weiterhin zur Netzentlastung genutzt, allerdings wird durch die hybride Betriebsweise auch die Autarkie berücksichtigt.

## 4.2 Energiesystemmodell in PyPSA

Die Photovoltaikanlagen auf den Hausdächern erzeugen nur bilanziell genug Strom, um Rodder über das ganze Jahr klimaneutral zu versorgen. Zu jedem Zeitpunkt im Jahr muss genügend Strom aus Erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen. Daher werden in diesem Kapitel mögliche Lösungen einer klimaneutralen Versorgung des Stromsektors vorgestellt.

Die im weiteren Verlauf vorgestellten Ergebnisse basieren auf dem im Kapitel 4.1.3 vorgestellten Szenario (~810 kWp PV auf den Hausdächern und netzdienliche Betriebsweise der Speicher). Diese Speicher-Betriebsart priorisiert nicht die Autarkie. Wenn die im vorherigen Kapitel erläuterte hybride Betriebsweise der Speicher angenommen werden würde, dann würden die Ergebnisse vermutlich anders sein.

Der in diesem Projekt angenommene jährliche Stromverbrauch von Rodder inklusive der Nutzung von Elektromobilität beträgt 597 MWh (vgl. Kapitel 3.1.1). Aus der Differenz des Verbrauchs sowie der PV-Erzeugung und den Ladeprofilen der Batteriespeicher, kann zu jeder Stunde im Jahr die Last bestimmt werden, die nicht durch PV auf den Hausdächern gedeckt werden kann (Abbildung 20).

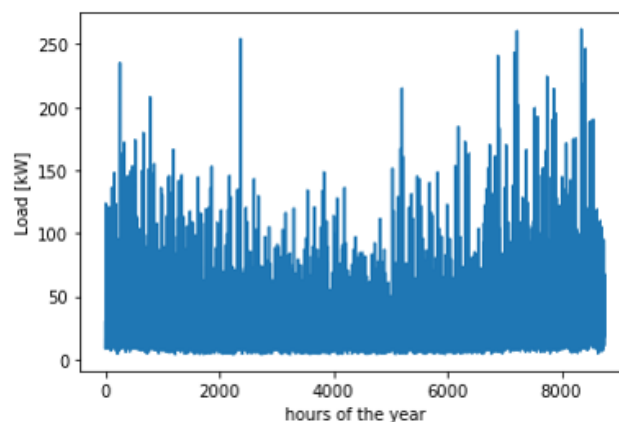


Abbildung 20: Verbrauch, der nicht von den PV-Anlagen auf dem Dach gedeckt werden kann und von anderen erneuerbaren Erzeugern gedeckt werden muss. Vor allem im Winter muss eine größere Menge an Strom erzeugt werden. [eigene Darstellung]

---

Abzüglich der PV-Erzeugung auf den Hausdächern, müssen jährlich 329 MWh aus einer anderen regenerativen Erzeugung bereitgestellt werden, damit Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral versorgt wird. Vor allem im Winter muss mehr Strom produziert werden.

Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten dargestellt, wie Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral versorgt werden kann. Zuerst wird eine PV-Freiflächenanlage mit einem Batteriespeicher gekoppelt. Anschließend wird eine Windkraftanlage mit einem Batteriespeicher gekoppelt und untersucht, wie sich die benötigte Speicherkapazität im Vergleich zu der PV-Freiflächenanlage verändert. Hierzu wird eine pythonbasierten Simulation mit PyPSA durchgeführt. Die möglichen Standorte für die PV-Freiflächenanlage und die Windkraftanlage werden in diesem Projekt nicht untersucht. Die Gemeinde Rodder ist ländlich geprägt und von Feldern sowie Waldgebieten umgeben. Allerdings sind die meisten Flächen nach Aussagen des Bürgermeisters in privater Hand und müssten daher gepachtet oder von der Gemeinde Rodder gekauft werden, um PV-Freiflächenanlagen oder eine Windkraftanlage zu betreiben. [3]

#### 4.2.1 Bilanzielle Bestimmung der PV-Freiflächenanlage

Zunächst kann in einem ersten Schritt bilanziell die benötigte PV-Leistung bestimmt werden, um die 329 MWh zu erzeugen. Mit einem spezifischen Ertrag von 1050 kWh/kwp, würde theoretisch eine 315 kWp PV-Freiflächenanlage ausreichen [15].

In der Abbildung 21 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulation mit PyPSA dargestellt. Die Abbildung zeigt den Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen. Auf der horizontalen Achse ist die Speichergröße im Verhältnis zum im Jahresmittel täglichen Verbrauch dargestellt.

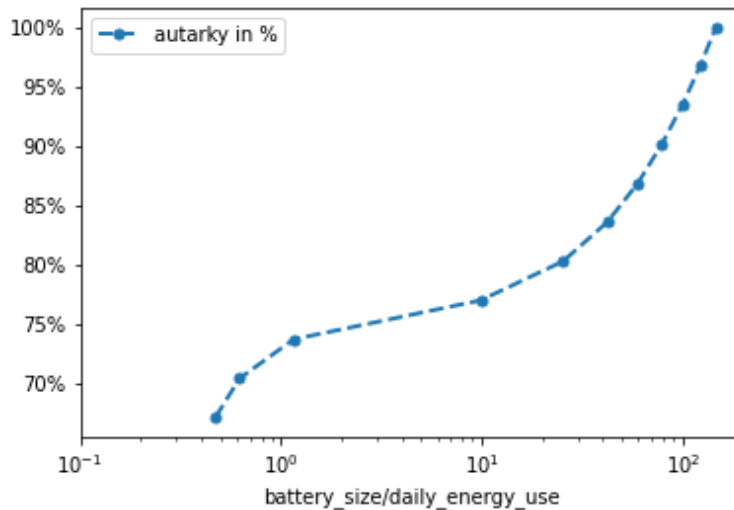


Abbildung 21: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch mit einer 315 kWp PV-Anlage [eigene Darstellung]

Es ist zu erkennen, dass der Autarkiegrad bei einem größer werdenden Speicher ansteigt, bis die Speicherkapazität etwa dem eines Tagesspeichers entspricht. Anschließend bleibt der Autarkiegrad bei steigender Speicherkapazität konstant. Erst bei einem deutlich größeren Speicher steigt der Autarkiegrad wieder an. Dieser Effekt resultiert aus der jahreszeitlich unterschiedlichen PV-Erzeugung und macht einen extrem großen Saisonspeicher für eine Autarkie von 100% notwendig. Vor allem im Winter muss bei wenig PV-Erzeugung über einen längeren Zeitraum der Verbrauch aus dem Speicher gedeckt werden. Um eine Autarkie von 100% zu erreichen, muss der Batteriespeicher der PV-Freiflächenanlage eine 147-fache Kapazität im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Energieverbrauch besitzen. In Kombination mit einer 315 kWp PV-Freiflächenanlage müsste der Batteriespeicher eine Kapazität von ~ 106 MWh besitzen, um Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral zu versorgen.



#### 4.2.2 PV-Freiflächenanlage

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel wird in diesem Kapitel keine konstante PV-Leistung vorgegeben. Die Freiflächenanlage wird mit einem Batteriespeicher gekoppelt.

In der Abbildung 22 ist in Abhängigkeit der Autarkie die benötigte PV-Leistung und die Speicherkapazität dargestellt.

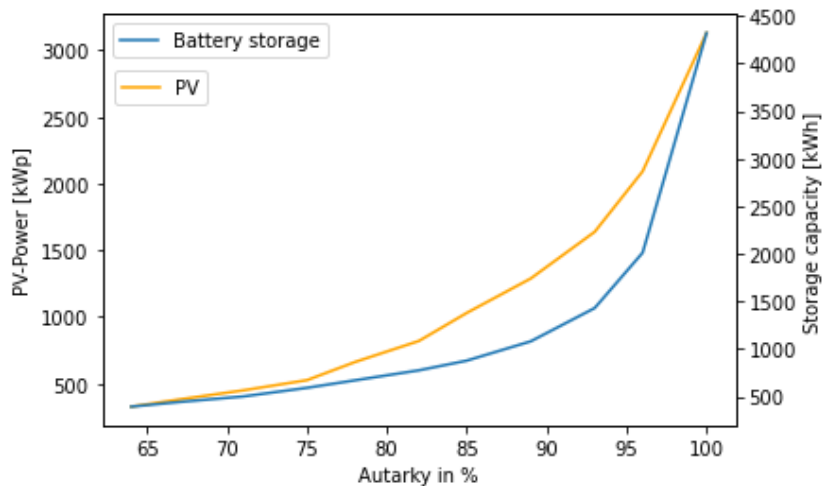


Abbildung 22: PV-Leistung und Speicherkapazität in Abhängigkeit von der Autarkie [eigene Darstellung]

In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit steigender Autarkie die PV-Leistung und die Speicherkapazität ansteigen. Bis zu einer Autarkie von 75% beträgt das Verhältnis zwischen PV und Speichergröße ungefähr eins zu eins. Anschließend steigt die Speicherkapazität schneller an als die PV-Leistung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Großprojekten (> 1 MW) der Zubau von 1 kWh günstiger ist als der Zubau von 1kWp PV [19]. Um eine Autarkie von 100% zu erreichen, ist eine 3,1 MWp PV-Freiflächenanlage und ein 4,3 MWh Batteriespeicher notwendig. Diese Leistung und Kapazität werden benötigt, da auch im Winter über einen längeren Zeitraum eine klimaneutrale Versorgung gewährleistet werden muss.

In der Abbildung 23 ist der Autarkiegrad für verschiedene Speichergrößen dargestellt. In der Abbildung werden die in der oberen Abbildung 22 dargestellten unterschiedlichen PV-Leistungen und Speicherkapazitäten je nach Autarkiegrad dargestellt.

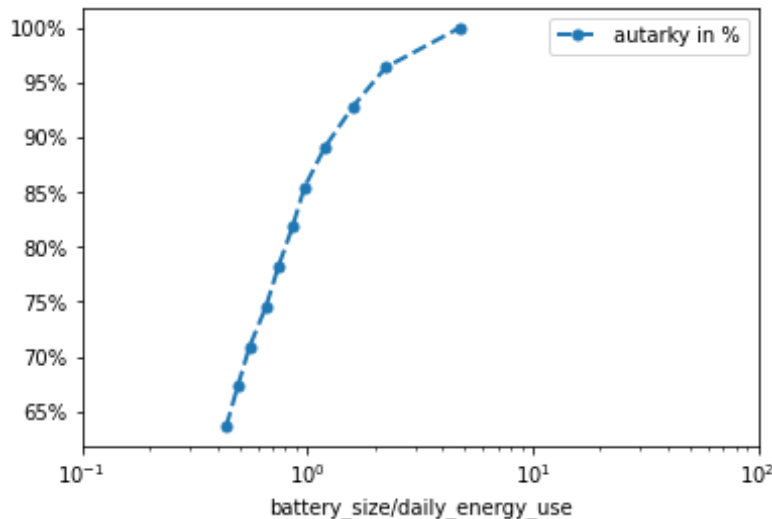


Abbildung 23: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch. Die Werte berücksichtigen verschiedene PV-Leistungen und Speicherkapazitäten [eigene Darstellung]

Der Abbildung kann entnommen werden, dass mit 3,1 MWp PV und einer Autarkie von 100% etwa eine 5-fache Speicherkapazität im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Energieverbrauch notwendig ist. Bei einer Autarkie von beispielsweise 85% entspricht die Speichergröße dem eines Tagesspeichers.

#### 4.2.3 Windkraftanlage

Im Gegensatz zum vorherigen Kapitel, wird in diesem Kapitel eine Windkraftanlage mit einem Batteriespeicher gekoppelt. Es wird dargestellt, welche Auswirkungen der Betrieb einer Windkraftanlage auf die benötigte Speicherkapazität hat, um Rodder in jeder Stunde im Jahr klimaneutral versorgen zu können.

Für die Simulation wird ein Erzeugungsprofil einer Enercon E-115 mit einer Leistung von 4,5 MW und einer Nabenhöhe von 120 m genutzt. Der jährliche Energieertrag beträgt 8,7 GWh.

Wenn nur der in Abbildung 20 dargestellte Verbrauch (329 MWh) gedeckt werden soll, der nicht durch PV auf den Hausdächern gedeckt werden kann, ist ein Speicher mit einer Kapazität von 540 kWh notwendig, um Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral zu versorgen. Der Großteil der von dem Windrad erzeugten Energie wird in das Netz eingespeist.

Von dem Windrad wird deutlich mehr Strom erzeugt als in Rodder jährlich verbraucht wird. Daher wird in einem nächsten Schritt die notwendige

Speicherkapazität untersucht, wenn auf den Hausdächern kein PV installiert ist und das Windrad der einzig erneuerbare Stromerzeuger ist. Das Ziel besteht darin, dass das Windrad Rodder zu jeder Stunde im Jahr ohne Photovoltaik klimaneutral versorgen kann.

Wenn der gesamte jährliche Verbrauch (597 MWh) von Rodder durch das Windrad gedeckt werden soll, ist ein Speicher mit einer Kapazität von 890 kWh und einer Ausspeicherleistung von 340 kW notwendig. Die Abbildung 24 zeigt den Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen. Auf der horizontalen Achse ist die Speichergröße im Verhältnis zum im Jahresmittel täglichen Verbrauch dargestellt.

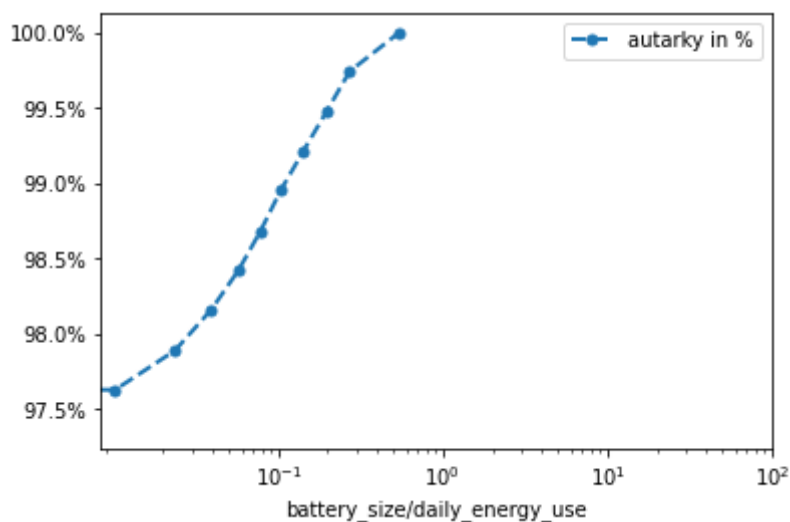


Abbildung 24: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch mit einem 4.5 MW Windrad [eigene Darstellung]

Der Abbildung kann entnommen werden, dass mit dem Windrad bereits auch bei sehr kleinen Speichergrößen eine hohe Autarkie erreicht wird. Dies ist damit zu begründen, dass das Windrad deutlich mehr Strom produziert als in Rodder verbraucht wird. Der Großteil der von dem Windrad erzeugten Energie wird in das Netz eingespeist. Um einen Autarkiegrad von 100% zu erreichen, muss der mit dem Windrad gekoppelte Speicher eine Kapazität eines halben Tagesspeichers besitzen.

#### 4.2.4 Vergleich der Energiesystemmodelle

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus den vorherigen Kapiteln zusammengefasst. In der Tabelle 3 sind die benötigten Anlagenleistungen und Speicherkapazitäten dargestellt, damit eine Autarkie von 100% erreicht wird und Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral versorgt werden kann.

Tabelle 3: benötigte EE-Leistung und Speicherkapazität für eine klimaneutrale Versorgung von Rodder [eigene Darstellung]

Szenario	Leistung EE [MW]	Speicherkapazität [MWh]
PV-Freifläche	0,315	106
PV-Freifläche	3,1	4,3
Windrad*	4,5	0,89

\*bezieht sich auf die Versorgung des gesamten jährlichen Stromverbrauchs (597 MWh) von Rodder

In der folgenden Abbildung ist der Autarkiegrad von Rodder für verschiedene erneuerbare Anlagenleistungen in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergößen dargestellt. Auf der horizontalen Achse ist die Speichergöße im Verhältnis zum im Jahresmittel täglichen Verbrauch dargestellt.

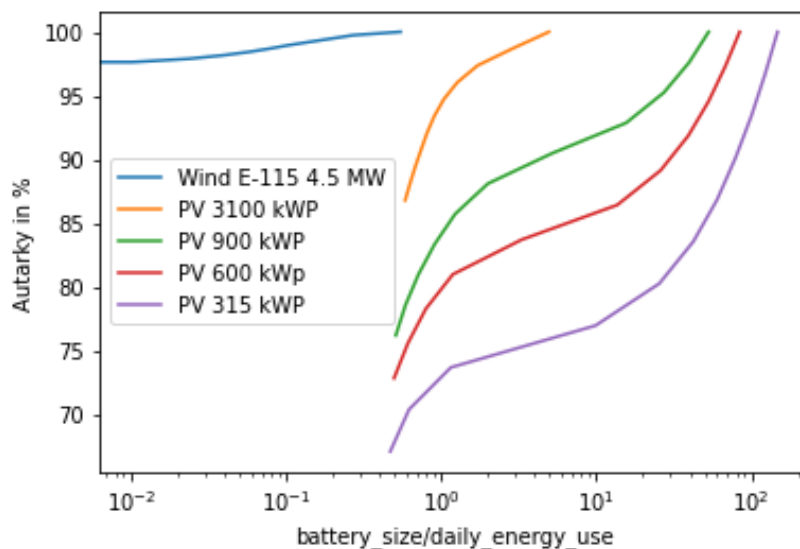


Abbildung 25: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch für verschiedene erneuerbare Anlagenleistungen [eigene Darstellung]

Es ist zu erkennen, dass mit steigender erneuerbarer Anlagenleistung die benötigte Speichergöße kleiner wird. So wird beispielsweise für ein Autarkiegrad von 100% mit 315 kWp PV ein Speicher mit einer 147-fachen Kapazität im Verhältnis

---

zum durchschnittlichen täglichen Energieverbrauch benötigt. Mit 3,1 MW PV hingegen ist ein Speicher mit einer 5-fachen Speicherkapazität im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Energieverbrauch notwendig, um eine Autarkie von 100% zu erreichen. Der Abbildung kann ebenfalls entnommen werden, dass mit einem Windrad auch bei sehr kleinen Speichern bereits eine hohe Autarkie erreicht wird. Eine Erhöhung der Speicherkapazität führt nur zu einer marginalen Steigerung der Autarkie. Dies ist damit zu begründen, dass das Windrad deutlich mehr Strom produziert als in Rodder verbraucht wird. Der Großteil der von dem Windrad erzeugten Energie wird in das Netz eingespeist.

## 5 Ergebnisdarstellung Wärmesektor

Im Jahr 2021 wurden insgesamt 1.760 MWh Heizenergie in der Ortsgemeinde Rodder verbraucht. Basierend auf den ermittelten Transmissionswärmeverluste im geplanten Nahwärmenetz wird dieser auf 1.977 MWh ansteigen.

Die beiden folgenden Szenarien werden dabei verwendet, um den thermischen Verbrauch von Rodder klimaneutral zu jedem Zeitpunkt im Jahr zu decken:

- 1.) Szenario: Solarthermie + Saisonspeicher
- 2.) Szenario: Solarthermie (Grundlastversorgung) in Kombination mit einer Holzhackschnitzelanlage (Spitzenlast) sowie einem Pufferspeicher

### 5.1 Solarthermie & Saisonspeicher

Im Folgenden werden die benötigte Leistung einer Solarthermieanlage und das Volumen eines saisonalen Warmwasserspeichers dargestellt, um die Wärmeversorgung in Rodder klimaneutral zu gestalten.

In der Abbildung 26 ist in Abhängigkeit der Autarkie die benötigte Solarthermieleistung und die Speicherkapazität dargestellt.

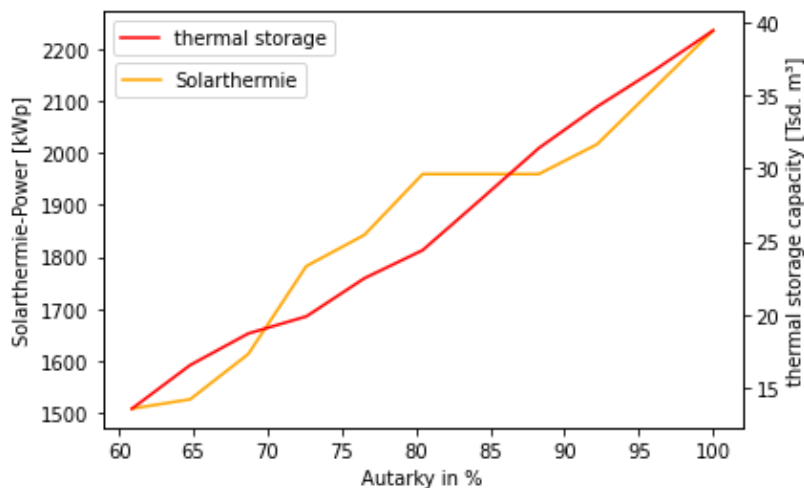


Abbildung 26: Solarthermische Leistung und saisonale thermische Speicherkapazität in Abhängigkeit von der Autarkie [eigene Darstellung]

In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit steigender Autarkie die Solarthermie-Leistung und die Speicherkapazität ansteigen. Es wird deutlich, dass mit steigender Autarkie das Volumen des Saisonspeichers deutlich stärker ansteigt als die Leistung der Solarthermie. Dies liegt an den geringen spezifischen Investitionskosten von saisonalen Warmwasserspeichern mit ca. 2€/kWh [20]. Der Zubau von 1kWh ist günstiger als der Zubau von 1 kWp Solarthermie [20]. Um eine Autarkie von 100% zu erreichen, ist eine 2,2 MWp Solarthermieanlage und ein saisonaler Warmwasserspeicher von 40.000 m<sup>3</sup> notwendig. Das entspricht einer nutzbaren gespeicherten Energiemenge von 1.152 MWh.

Die größten saisonalen Warmwasserspeicher in Deutschland haben ein Volumen von 5.000 bis 10.00 m<sup>3</sup> [20]. Der große Saisonspeicher (40.000 m<sup>3</sup>) wird benötigt, da in diesem Szenario nur Solarthermie als Wärmeerzeuger betrachtet wird und der thermische Verbrauch von Rodder auch im Winter klimaneutral aus dem Saisonspeicher versorgt werden muss.

In der folgenden Abbildung 27 ist der Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen dargestellt. Hierbei werden die in Abbildung 26 unterschiedlichen Leistungen der Solarthermie berücksichtigt. Auf der horizontalen Achse ist die Speichergröße im Verhältnis zum im Jahresmittel täglichen Verbrauch dargestellt.

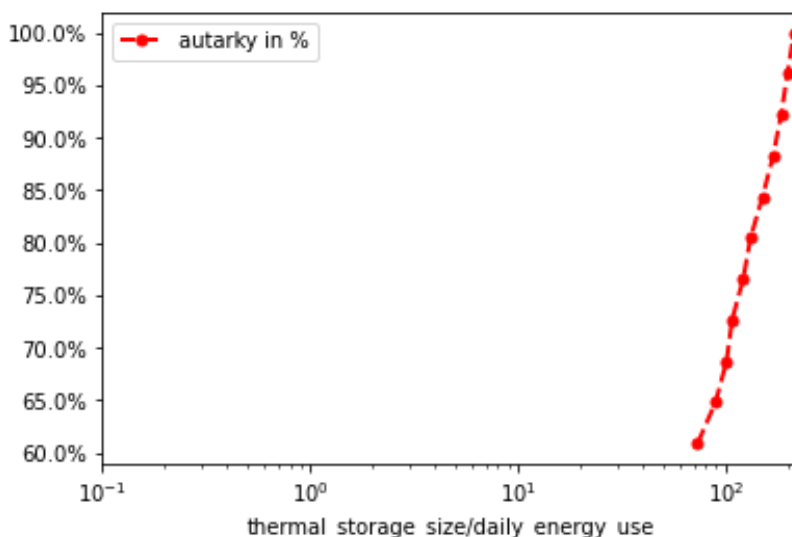


Abbildung 27: Autarkiegrad in Abhängigkeit von verschiedenen Speichergrößen im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch. Die Werte berücksichtigen verschiedene Solarthermie-Leistungen und Speicherkapazitäten [eigene Darstellung]

---

Der Abbildung kann entnommen werden, dass bereits bei einem geringen Autarkiegrad von 60% ein Saisonwärmespeicher notwendig ist, der eine 73-fache Speicherkapazität im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Verbrauch hat. Mit steigender Autarkie steigt die Speicherkapazität an. Dieser Effekt resultiert aus der jahreszeitlich unterschiedlichen Solarthermie-Erzeugung und macht einen extrem großen Saisonspeicher für eine Autarkie von 100% notwendig. Vor allem im Winter muss bei wenig Solarthermie-Erzeugung über einen längeren Zeitraum der Verbrauch aus dem Speicher gedeckt werden. Um eine Autarkie von 100% zu erreichen, muss der saisonale Warmwasserspeicher eine 213-fache Kapazität im Verhältnis zum durchschnittlichen täglichen Wärmeverbrauch besitzen.

## 5.2 Solarthermieanlage, Holzhackschnitzelanlage und Wärmespeicher

Im Folgenden werden die benötigten Leistungen einer Solarthermieanlage und einer Holzhackschnitzelanlage sowie das Volumen eines Pufferspeichers ermittelt. Hierbei wird untersucht wie die Nutzung einer Holzhackschnitzelanlage die benötigte Leistung der Solarthermie und die Speichergröße im Vergleich zum Szenario 1 beeinflusst, um eine Autarkie von 100% zu erreichen.

Für die Simulation wurde der Pufferspeicher auf ein Volumen von 100 m<sup>3</sup> mit einer nutzbaren Kapazität von 2910 kWh festgelegt. Diese ergibt sich aus der Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf und dem Speichervolumen. Das Volumen wurde anhand von ausgewählten Referenzprojekten bestimmt, in denen vergleichbare Dörfer wie Rodder ebenfalls durch Solarthermie und Hackschnitzel versorgt werden. [21]

Die durchgeführte Simulation zeigt, dass eine 700 kW Solarthermieanlage und eine 835 kW Holzhackschnitzelanlage notwendig sind, um den thermischen Verbrauch in Rodder das ganze Jahr über klimaneutral zu versorgen.



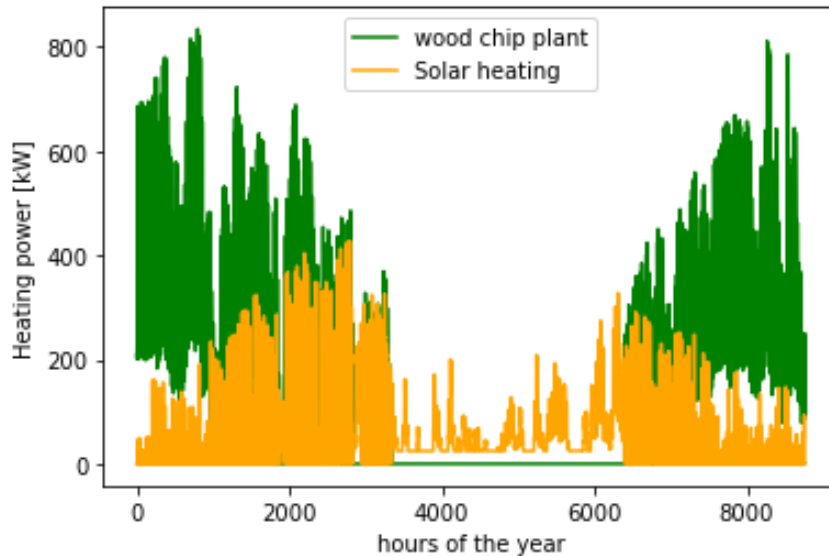


Abbildung 28: Heizlast von Rodder gedeckt durch Solarthermie, Tagesspeicher und Hackschnitzelanlage [eigene Darstellung]

In der Abbildung ist das Heizlastprofil von Rodder zu sehen, welches durch die Erzeugungsprofile der Holz hackschnitzelanlage sowie der Solarthermie und den 100 m<sup>3</sup> Pufferspeicher gedeckt wird. Die Erzeugerleistung der Solarthermieanlage übersteigt die 430 kW nicht, was daran liegt, dass hier das Heizlastprofil von Rodder dargestellt ist. Im Sommer, wo die Solarthermieanlage die 700 kW Spitzenleistung erreichen würde, wird diese Heizleistung nicht vom Dorf benötigt und ist daher in der Abbildung nicht dargestellt.

Die Heizlast von Rodder wird zu jeder Stunde im Jahr durch die Erzeugungsprofile gedeckt. Der thermische Verbrauch wird durch die Solarthermieanlage, der Holz hackschnitzelanlage sowie dem Pufferspeicher gedeckt. Der Abbildung 28 ist zu entnehmen, dass die Solarthermieanlage mit einem 100 m<sup>3</sup> Pufferspeicher hauptsächlich im Sommer von Mitte Mai bis Ende Oktober den gesamten thermischen Verbrauch von Rodder versorgt. Da in den Sommermonaten neben Warmwasser kaum thermische Energie benötigt wird, muss zeitweise die Solarthermieanlage abgeregelt werden, um eine Überhitzung zu vermeiden (bei Überproduktion Solarthermie & wenn Pufferspeicher voll ist) [22]. Die Holz hackschnitzelanlage wird in den Sommermonaten nicht benötigt (Abbildung 28).

Die solare Deckungsrate der 700 kW Solarthermie mit 100 m<sup>3</sup> Speicher beträgt 22%, was eine übliche Deckungsrate für eine solche Anlage mit Pufferspeicher ist. [21]

Die Leistung der Holzhackschnitzelanlage (835 kW) muss trotz der Solarthermieanlage auf die maximal benötigte Heizlast des Dorfes ausgelegt werden. Das liegt daran, weil die maximale Heizlast im Winter zu einem Zeitpunkt auftritt, in dem die Solarthermieanlage keine Wärme erzeugt und der 100 m<sup>3</sup> Speicher leer ist. Zwar kann die Spitzenlast der Holzhackschnitzelanlage nicht signifikant durch die Vergrößerung der Solarthermieanlage und des Tagesspeichers abgesenkt werden, allerdings könnte durch die Vergrößerung der Anlagenkomponenten, der solare Deckungsgrad gesteigert und der damit einhergehende Holzverbrauch gesenkt werden. Weiterhin muss aber die Sinnhaftigkeit der Vergrößerung der Anlagen hinterfragt werden, da die Wirtschaftlichkeit darunter leidet, wenn die Solarthermieanlage im Sommer abgeschaltet werden muss, da der Speicher bereits oft vollgeladen ist.

In Abbildung 29 ist für einen Beispieltag (23. März) exemplarisch die Betriebsweise der Solarthermie und der Holzhackschnitzelanlage dargestellt. Zusätzlich ist die zu deckende thermische Last von Rodder dargestellt. In diesem Zeitraum ist der Pufferspeicher leer.

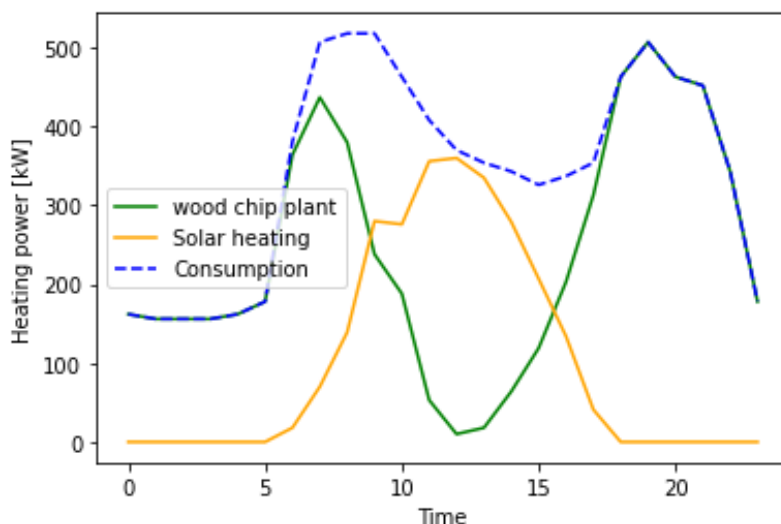


Abbildung 29: Gedeckte Heizlast vom 23.03.2021 durch Zusammenspiel von Solarthermie und Hackschnitzelanlage [eigene Darstellung]

Es ist zu erkennen wie sich die Solarthermieanlage und die Hackschnitzelanlage gegenseitig ergänzen, um den thermischen Verbrauch zu decken. Zu sehen ist in blau die Heizlast des Dorfes Rodder, die durch das Solarthermie Erzeugungsprofil und das Erzeugungsprofil der Holzhackschnitzelanlage über den Tag hinweg

---

gedeckt wird. Die Leistungen beider Anlagentypen zusammen ergibt die benötigte Heizleistung von Roder zu jedem Zeitpunkt.

Um eine thermische Autarkiequote von 100%, in Kombination mit einer 700 kW Solarthermieanlage zu erreichen, muss die Holzhackschnitzelanlage jährlich 1.528 MWh erzeugen. Dies entspricht einem Holzverbrauch von 1.559 Schüttraummeter pro Jahr. Um diese Menge Holz nachhaltig bereitstellen zu können werden 63 ha Wald benötigt, was in etwa 10% der Gesamtfläche von Rodder entspricht [23]. Die Gemeinde Rodder besitzt ca. 200 ha Waldfläche [3]. Außerdem sind alle Waldflächen in Rheinland-Pfalz seit dem Jahr 2000 mit dem PEFC Zertifikat zertifiziert, welches eine nachhaltige Waldbewirtschaftung garantiert [24].

## 6 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und die angewendete Methodik sowie die getroffenen Annahmen des vorliegenden Projektes kritisch diskutiert und mögliche Ungenauigkeiten identifiziert.

Für die Analyse des Strom- und Wärmesektors wurden Excel-Tools sowie Python-Codes für PandaPower und PyPSA zur Modellierung von klimaneutralen Energiesystemmodellen erstellt. Hierbei wurden verschiedene technoökonomische Annahmen getroffen. Diese basieren zwar auf Richtwerten aus der Literatur, allerdings ist fraglich, wie sich die hinterlegten Kapitalkosten (OPEX) sowie die angenommenen Wirkungsgrade der verschiedenen Erzeugungstechnologien künftig entwickeln werden. Außerdem wurden für den Aufbau der Energiesystemmodelle in PyPSA teilweise Annahmen und Vereinfachungen getroffen.

Für die Analyse des Stromsektors wurden mit dem LoadProfileGenerator 20 verschiedene Lastprofile mit unterschiedlichen Verbraucherverhalten erstellt. Bei der Erstellung der Lastprofile wurde die Altersstruktur in Rodder berücksichtigt. Allerdings ist fraglich, ob die erstellten Lastprofile den realen Stromlastgang von

---

Rodder abbilden. Gleiches gilt für die erstellten PV-Erzeugungsprofile. Hierbei wurden verschiedene Anlagenleistungen und Ausrichtungen berücksichtigt.

Für die Analyse des Wärmesektors wurden teilweise Annahmen und Vereinfachungen getroffen. So hat beispielsweise die Vor- und Rücklauftemperatur im Nahwärmenetz einen signifikanten Einfluss auf die Auslegung des Nahwärmenetzes in Rodder. Die realen Vor- und Rücklauftemperaturen sind von der Jahreszeit abhängig. Im Rahmen der Projektarbeit wurde allerdings eine konstante Temperaturdifferenz von 25 °C (Vorlauf 75°C, Rücklauf 50°C) angenommen. Bei den Ermittlungen der Entladeverluste des Saison- und Pufferspeichers wurden Wärmebrücken nicht berücksichtigt, was zu etwas geringeren Entladeverlusten führt. Zu beachten ist, dass in dieser Arbeit keine detaillierte Planung eines Nahwärmenetzes, sondern nur ein erstes Konzept für die klimaneutrale Wärmeversorgung von Rodder erstellt wurde, da dies eine umfangreiche ingenieurtechnische Planung erfordert.

## 7 Fazit & Ausblick

Die Projektarbeit hat gezeigt, dass verschiedene klimaneutrale Energieversorgungskonzepte möglich sind, um die Sektoren Strom, Verkehr und Wärme zu dekarbonisieren. Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der untersuchten und simulierten Energiekonzepte, um Rodder künftig klimaneutral versorgen zu können.

Tabelle 4: untersuchte klimaneutrale Energieversorgungskonzepte für Rodder [eigene Darstellung]

Szenario	Leistung EE	Speicherkapazität
<b>Stromsektor</b>		
<b>PV-Freifläche</b>	<b>3,1 MW</b>	<b>4,3 MWh</b>
<b>Windkraftanlage</b>	<b>4,5 MW</b>	<b>0,89 MWh</b>
<b>Wärmesektor</b>		
<b>Solarthermie</b>	<b>2,2 MW</b>	<b>40.000 m<sup>3</sup></b>
<b>Solarthermie + Holzhackschnitzel</b>	<b>0,7 MW (Solar) 0,83 MW (Hackschnitzel)</b>	<b>100 m<sup>3</sup></b>

In der Analyse des Stromsektors ist deutlich geworden, dass nur ein signifikanter Ausbau der Photovoltaik auf den Hausdächern im Verteilnetz möglich ist, wenn künftig Batteriespeicher mit Photovoltaik gekoppelt werden. Ein konventioneller Betriebsmodus führt zu keiner Entlastung des Netztes. Eine intelligente hybride Betriebsweise der Speicher in der sowohl der Autarkiegrad als auch die Netzentlastung berücksichtigt werden, ist eine Möglichkeit, um den Ausbau der Photovoltaik im Verteilnetz voranzutreiben. Außerdem hat die Projektarbeit gezeigt, dass die Nutzung von Elektromobilität, unter der Annahme der verwendeten Last- und Ladeprofile, zu keiner lokalen Netzüberlastung in Rodder führt. Künftig könnte jedoch auch Demand Response zu einer Stabilisierung des Stromnetztes beitragen.

---

Um den Stromverbrauch von Rodder zu jeder Stunde im Jahr klimaneutral decken zu können, sind neben den PV-Anlagen auf den Hausdächern weitere erneuerbare Erzeuger notwendig. Es ist deutlich geworden, dass mit steigender erneuerbarer Anlagenleistung und weniger starker volatiler Erzeugung die benötigte Speicherkapazität kleiner wird. So wird beispielsweise ein 890 kWh Speicher benötigt, wenn dieser mit einer 4,5 MW Windkraftanlage gekoppelt wird. Wird hingegen eine PV-Freiflächenanlage genutzt, steigt die benötigte Speicherkapazität an.

Die Analyse des Wärmesektors hat gezeigt, dass verschiedene erneuerbare Versorgungskonzepte möglich sind. In der Projektarbeit wurden exemplarisch verschiedene Konzepte für ein Nahwärmenetz untersucht.

Bei einer volatilen Erzeugung durch Solarthermie ist ein großer thermischer Saisonspeicher mit einem Volumen von 40.000 m<sup>3</sup> notwendig. Vor allem im Winter muss bei wenig Solarthermie-Erzeugung über einen längeren Zeitraum der Verbrauch aus dem Speicher gedeckt werden.

Allerdings ist auch eine Kombination verschiedener Erzeugungstechnologien möglich. Die Solarthermie kann zur thermischen Grundlastversorgung beitragen und eine Holzhackschnitzelanlage dient der Deckung der Spitzenlast. Die Simulation hat gezeigt, dass die Hackschnitzelanlage (835 kW) auf die thermische Spitzenlast von Rodder ausgelegt sein muss. Diese tritt im Winter auf, wenn durch die Solarthermie keine Wärmeenergie bereitgestellt werden kann. Eine Erhöhung der Solarthermieleistung führt zu keiner Reduzierung der Leistung der Hackschnitzelanlage.

Abschließend kann zusammengefasst werden, dass verschiedene Energieversorgungskonzepte möglich sind, um Rodder künftig klimaneutral zu versorgen. In dem Projekt wurde für Rodder exemplarisch auf lokaler Ebene untersucht, wie die Energiewende gelingen kann. Die gesammelten Erkenntnisse können dazu beitragen die Energiewende in Deutschland voranzutreiben. Die klimaneutrale Transformation der Energieversorgung kann nur gelingen, wenn sich die gesellschaftliche und politische Ebene in Rodder und Deutschland mit der Energiewende auseinandersetzen und den Willen besitzen selbst klimaneutral und autark leben zu wollen.

---

## 8 Literatur

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, *Bundesklimaschutzgesetz*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz> (Zugriff am: 10. März 2023).
- [2] CityPopulation, *Einwohnerzahl Rodder (2021)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://citypopulation.de/de/germany/rheinlandpfalz/ahrweiler/07131072\\_\\_rodder/](https://citypopulation.de/de/germany/rheinlandpfalz/ahrweiler/07131072__rodder/) (Zugriff am: 10. Februar 2023).
- [3] *Befragung des Ortsbürgermeisters Herr Jüngling in einer Vor-Ort-Besichtigung am 20. Januar 2023*.
- [4] Gemeinde Rodder, *Photovoltaik in der Ortsgemeinde Rodder*. [Online]. Verfügbar unter: <https://rodder-eifel.de/photovoltaikanlagen/> (Zugriff am: 10. März 2023).
- [5] *Renewables Ninja*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.renewables.ninja/> (Zugriff am: 10. März 2023).
- [6] *Wirkungsgrad von Solar-Stromspeichern im Vergleich*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/wirkungsgrad> (Zugriff am: 15. Januar 2023).
- [7] Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, *DIN EN 50160*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/dke?level=tpl-art-detailansicht&artid=136886057&languageid=de> (Zugriff am: 15. Februar 2023).
- [8] Eberhard Waffenschmidt, Hg., „Vorlesung SNEE SoSe 2022: Anschlussbedingungen“, TH Köln.
- [9] Umweltbundesamt, *CO<sub>2</sub>-Emissionen pro kWh Strom im öffentlichen Strommix*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-steigen#:~:text=Das%20zeitigen%20aktuelle%20Berechnungen%20des,2019%20bei%20411%20g%20FkWh.> (Zugriff am: 10. Februar 2023).

- 
- [10] S. Henning, *Wärmepumpe: Wirkungsgrad & Effizienz im Vergleich*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/waermepumpenheizung/wirkungsgrad> (Zugriff am: 14. März 2023).
- [11] Kesselheld, *Heizwert von Hackschnitzeln: Heizwerttabelle & Holzarten - Kesselheld*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kesselheld.de/heizwert-hackschnitzel/> (Zugriff am: 13. März 2023).
- [12] Kesselheld, *So berechnen Sie den Jahresnutzungsgrad Ihrer Heizung - Kesselheld*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kesselheld.de/jahresnutzungsgrad/> (Zugriff am: 13. März 2023).
- [13] *Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - CDC (Climate Data Center)*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html) (Zugriff am: 13. März 2023).
- [14] *Datenblatt Viessmann Vitosol 200T*. [Online]. Verfügbar unter: [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://thkoelnde.sharepoint.com/sites/Masterprojekt-SolAhrtal/Freigegebene%20Dokumente/General/W%C3%A4rme/Solarkollektoren\\_Datenblatt.pdf?CT=1677241822889&OR=ItemsView](chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://thkoelnde.sharepoint.com/sites/Masterprojekt-SolAhrtal/Freigegebene%20Dokumente/General/W%C3%A4rme/Solarkollektoren_Datenblatt.pdf?CT=1677241822889&OR=ItemsView).
- [15] Deutscher Wetterdienst, *Globalstrahlung Deutschland 2022* (Zugriff am: 6. März 2023).
- [16] J. Goeke, *Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik: Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration*, 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; Springer Vieweg, 2021.
- [17] Eberhard Waffenschmidt, Hg., „Vorlesung SNEE SoSe 2022: Grundlagen“, TH Köln.
- [18] Eberhard Waffenschmidt, Hg., „Dimensioning of decentralized photovoltaic storages with limited feed-in power and their impact on the distribution grid“, TH Köln, 2013.
- [19] Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme, *Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien 2021*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021\\_ISE\\_Studie\\_Stromgestehungskosten\\_Erneuerbare\\_Energien.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2021_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf) (Zugriff am: 25. Januar 2023).



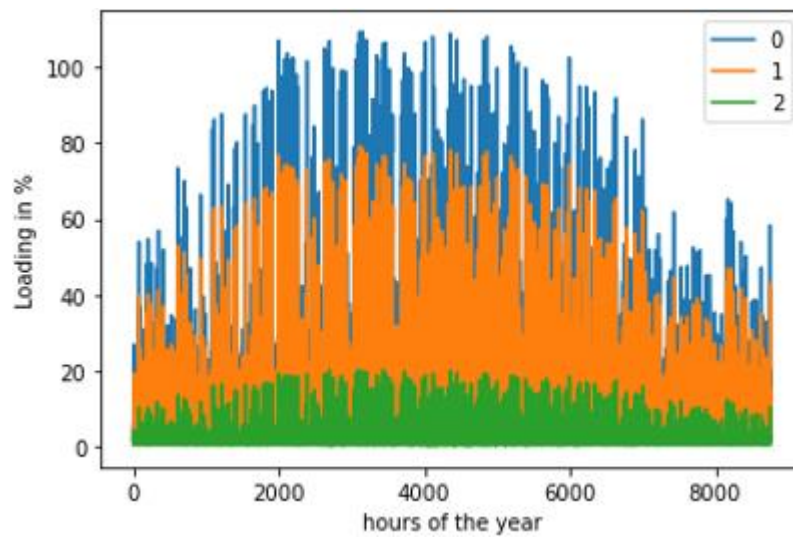
- 
- [20] M. Sterner und I. Stadler, Hg., *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [21] Ritter XL Solar, *Solare Großanlage Ellern - solarunterstützte Wärmenetze für Dörfer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ritter-xl-solar.de/anwendungen/waermenetze/ellern/> (Zugriff am: 13. März 2023).
- [22] Solaranlage.eu, *Schutz vor Überhitzung im Sommer*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.solaranlage.eu/solarthermie/betrieb/ueberhitzung-sommer> (Zugriff am: 13. März 2023).
- [23] *Rohstoff Holz - Waldwissen - Baumspenden - Stiftung Unternehmen Wald*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wald.de/rohstoff-holz/> (Zugriff am: 14. März 2023).
- [24] Landesforsten Rheinland-Pfalz, *Zertifizierung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wald.rlp.de/de/nutzen/nachhaltigkeit/zertifizierung/> (Zugriff am: 14. März 2023).

# Anhang

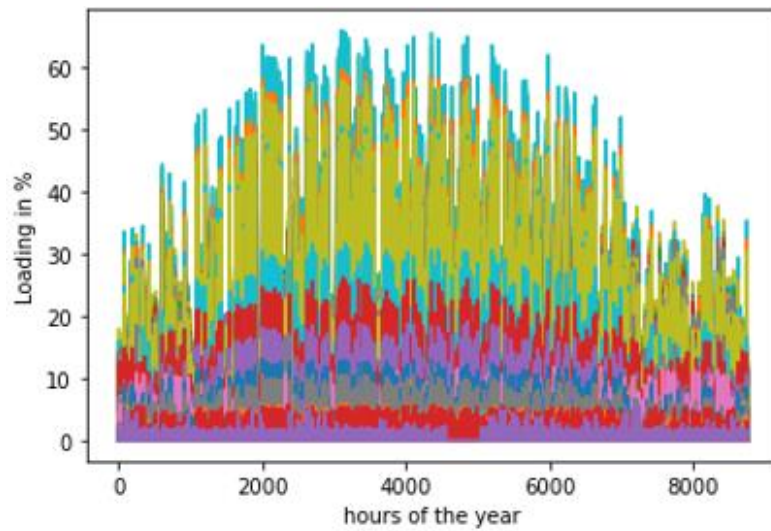
## Anhang A

### 1.) Szenario 1 (ohne Batteriespeicher)

#### Auslastung Transformator:

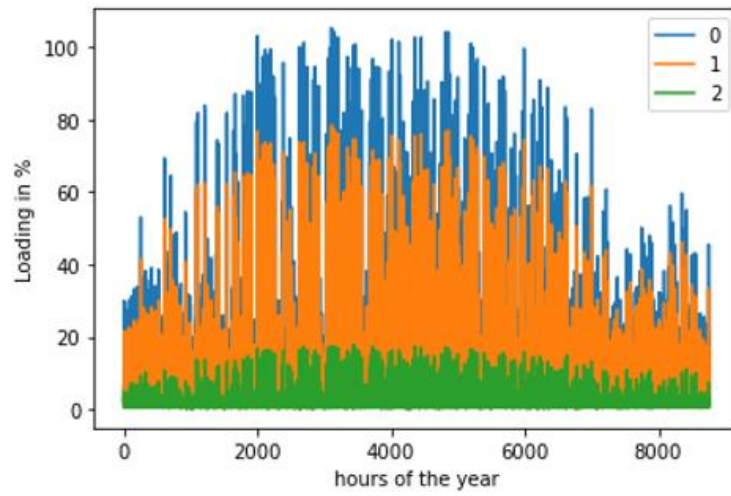


#### Auslastung Stromleitung:

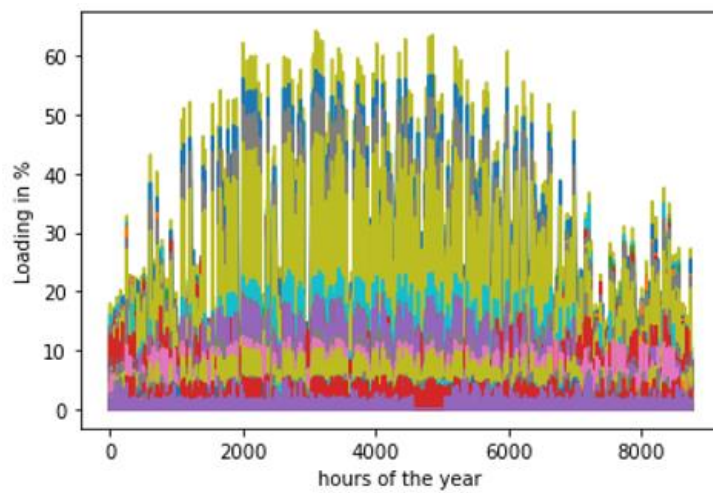


## 2.) Szenario 2 (konventioneller Batteriespeicher)

### Auslastung Transformator:



### Auslastung Stromleitung:

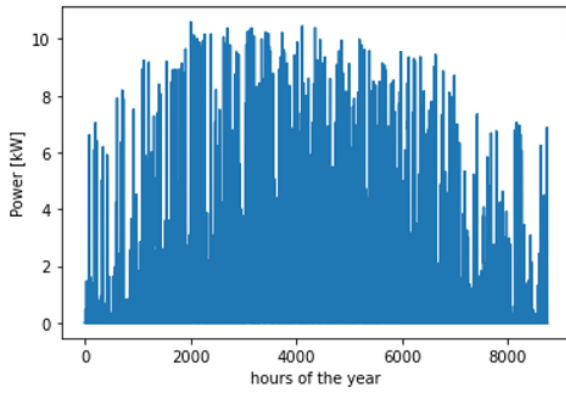


## Anhang B

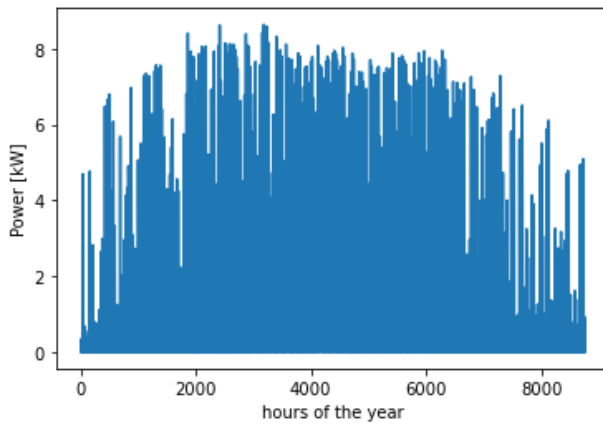
Number	Description	Number of People	Energy Intensity	Transportation Device Set	Travel Route Set	Charging Station Set	Number of cars
CHR01	Couple both at work	2	Energy Intensiv	Bus and more 30 km/h Car	20 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR27	Family both at work, 2 Children	4	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	25 km	Charging at home with 11 kW	2
CHR03	Family one child, both at work	3	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	30 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR05	Family three child, both at work	5	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	15 km	Charging at work with 11 kW	2
CHR07	Single with work	1	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	25 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR15	Multigeneration	6	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	30 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR17	Shiftworker couple	2	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	20 km	Charging at home with 11 kW	2
CHR54	Retired couple	2	Energy Saving	Bus and more 60 km/h Car	25 km	Charging at work with 11 kW	1
CHR08	Single woman, two children	3	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	30 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR16	Couple over 64 years	2	Energy Saving	Bus and more 60 km/h Car	15 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR02	Couple 30-64 years with work	2	Energy Intensiv	Bus and more 30 km/h Car	25 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR10	Single man, 30-64 years, shiftworker	1	Energy Saving	Bus and more 60 km/h Car	30 km	Charging at work with 11 kW	1
CHR18	family, 2 children, both without work	4	Energy Intensiv	Bus and more 30 km/h Car	20 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR42	single man, 2 children, with work	3	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	25 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR46	single woman, 1 children	2	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	30 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR25	single woman under 30 with work	1	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	20 km	Charging at work with 11 kW	1
CHR29	single man under 30 with work	1	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	25 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR45	family with 1 child, 1 at home, 1 at work	4	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	30 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR61	family, 1 child, both at work, early living pattern	3	Energy Saving	Bus and more 30 km/h Car	20 km	Charging at home with 11 kW	1
CHR14	three adults (couple 30-64, 1 senior at home)	3	Energy Intensiv	Bus and more 60 km/h Car	25 km	Charging at work with 11 kW	1

## Anhang C

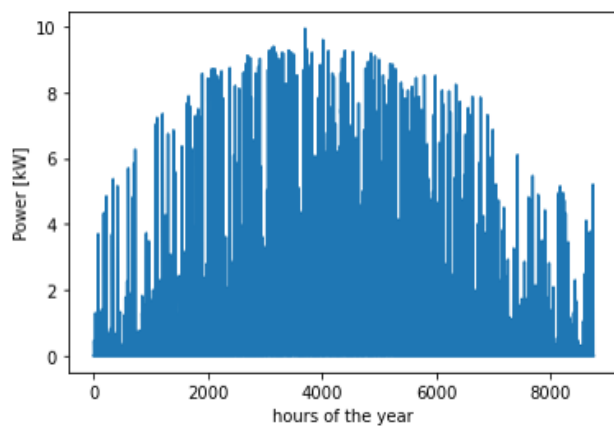
### 1.) Hausdach PV-Profil Süden



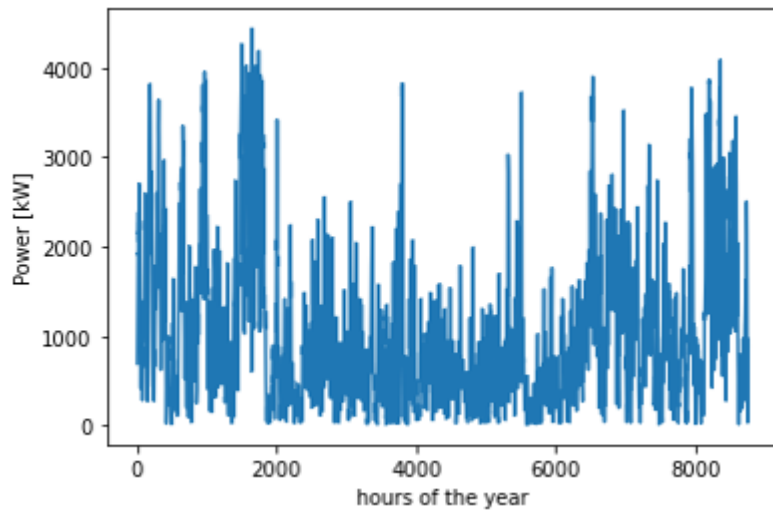
### 2.) Hausdach PV-Profil Südwest



### 3.) Hausdach PV-Profil Südost

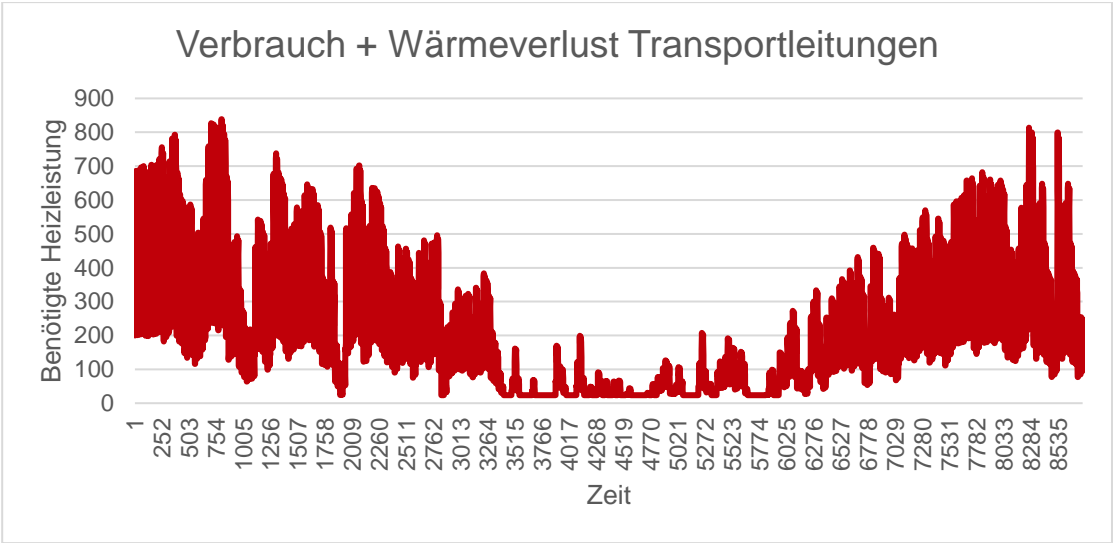
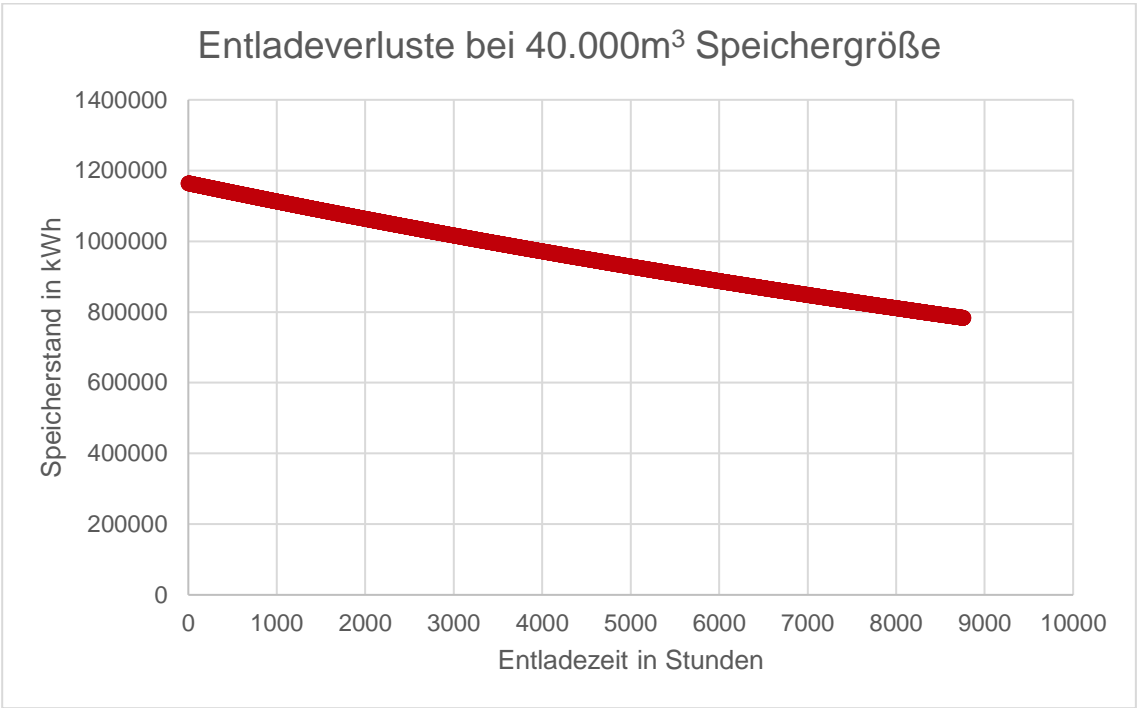


#### 4.) Erzeugungprofil Windkraft Enercon E-115





### Anhang D



---

## Digitaler Anhang

- Im Digitalen Anhang sind für die Analyse des Strom und Wärmesektors alle erstellten Excel- und Python Dateien zu finden. Diese können unter dem folgenden Link auf Sciebo heruntergeladen werden:
- <https://th-koeln.sciebo.de/s/vc0VDbFDDFpkEXc>