



NAWI Graz
Natural Sciences



Jonas Kornhuber Bsc

Erstellung und Analyse von Konzepten zur autarken Stromversorgung für Campingplätze im Saisonbetrieb

Masterarbeit

Zur Erlangung des Akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Umweltsystemwissenschaften / Naturwissenschaften-Technologie

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer:

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Udo Bachhiesl

Institut für Elektrizitätswirtschaft und Energieinnovation

Graz, Dezember 2019

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

09.12.2019

Datum



Unterschrift

Kurzfassung

Erneuerbare Energie ist wichtiger Bestandteil zum Gelingen der Energiewende. Die Preise für die Technologien befinden sich mittlerweile auf einem Niveau, bei dem sich auch für kleine bis mittlere Stromverbraucher eine Investition in eigene Anlagen lohnt. Den Strom selbst zu erzeugen und zu nutzen und somit durch Eigenstromverbrauch die Stromrechnung zu minimieren, ist ein wesentliches Argument bei Investitionsentscheidungen. Im Hinblick auf die autarke Stromversorgung wird an einem praktischen Beispiel, in Form eines an der Ostsee gelegenen Campingplatzes mit saisonalem Betrieb, untersucht, wie autark sich dieser wirtschaftlich unter heutigen Rahmenbedingungen versorgen lässt. Erneuerbare Energien sowie Speichermethoden werden erläutert und die am besten geeigneten für dieses Beispiel ausgewählt. Verschiedene Konzepte werden entworfen und bewertet, mit dem Ziel sowohl den Autarkiegrad als auch die Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Die Anwendbarkeit der Konzepte auch auf andere Standorte wird ebenfalls untersucht. Handlungsempfehlungen zur praktischen Umsetzung werden ausgesprochen, um eine erfolgreiche Umsetzung in die Praxis zu ermöglichen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Aktuelle Entwicklung am Beispiel der Photovoltaik	3
1.2 Energieautarkie.....	5
1.3 Forschungsfragen und Ziele	7
1.4 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen erneuerbare Energien und Energiespeicher	10
2.1 Erneuerbare Energien.....	10
2.1.1 Photovoltaik.....	10
2.1.2 Windkraft.....	12
2.1.3 Wasserkraft.....	13
2.1.4 Biomasse.....	14
2.2 Energiespeicher.....	14
2.2.1 Li-Ionen Akkumulator	15
2.2.2 Redox-Flow-Batterie.....	17
2.2.3 Flywheel.....	18
2.2.4 Wasserstoff.....	19
2.2.5 Power to Heat.....	19
3 Beschreibung Campingplatz.....	21
3.1 Geographische Lage.....	21
3.2 Lageplanbeschreibung	22
3.3 Klimadaten	25
3.4 Lastprofil	26
3.5 Energieeffizienzmaßnahmen	28
3.5.1 Strom	28
3.5.2 Wärme	29
4 Methodischer Ansatz	32
4.1 Auswahl geeigneter Technologien.....	32
4.2 Kostenevaluierung	35
4.2.1 Kosten für Errichtung und Betrieb der Anlage	35
4.2.2 Energiekosten/-einnahmen.....	36
4.2.3 Förderungen	37

4.3	Kostenbewertung.....	38
4.4	Modellierung des Energiesystems	39
4.4.1	Beschreibung des Modells.....	39
4.4.2	Regeln des Modells.....	39
4.4.3	Berechnungen im Modell	40
4.4.4	Modellparameter.....	42
4.4.5	Modellvalidierung.....	46
5	Ergebnisse	49
5.1	Wirtschaftlich erreichbarer Autarkiegrad am Campingplatz Stieglitz	50
5.1.1	Konzept mit begrenzter Fläche.....	51
5.1.2	Konzept mit unbegrenzter Fläche	61
5.2	Weitere Ideen zur Umsetzung	63
5.3	Unterschied des Autarkiegrades Haushalt vs. Campingplatz	66
5.4	Komplette Autarkie.....	68
5.5	Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Standorte in Europa.....	71
6	Fazit und Ausblick	79
	Literaturverzeichnis.....	VI

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Preisentwicklung Strom und PV-Anlagen 2000-2019.....	3
Abbildung 1-2: Verteilung der Eigentümer der installierten PV Leistung.....	4
Abbildung 1-3: Anzahl der in Betrieb genommenen Batteriespeicher	5
Abbildung 2-1: Prinzip einer Photozelle	11
Abbildung 2-2: Übersicht Energiespeicher	15
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Redox-Flow-Batterie	18
Abbildung 3-1: Geographische Lage Campingplatz Stieglitz	21
Abbildung 3-2: Mobilheime auf dem Campingplatz Stieglitz.....	22
Abbildung 3-3: Lageplan Campingplatz Stieglitz	24
Abbildung 3-4 Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung im Jahresverlauf	26
Abbildung 3-5: Lastprofil Campingplatz Stieglitz	27
Abbildung 3-6: Energieverbrauch nach Anwendungsbereich.....	30
Abbildung 4-1: Lastprofil und Globalstrahlung im Jahresverlauf.....	34
Abbildung 4-2: Vereinfachte Darstellung des Modells	40
Abbildung 4-3: Ausschnitt Excel-Modell	41
Abbildung 4-4: Standardlastprofil 4.000 kWh Jahresverbrauch	47
Abbildung 4-5: Jährlicher Wert von Eigenverbrauchsanteil (linkes Diagramm) und Autarkiegrad (rechtes Diagramm) Haushalt	47
Abbildung 4-6: Vergleichswerte zur Validierung des Excel-Modells.....	48
Abbildung 5-1: Beispiel für Strompreise, Last und Erzeugung KW18/2018.....	49
Abbildung 5-2: Jährliche Verläufe im Monatsmittel bei 1500 m ² PV.....	53
Abbildung 5-3: Verlauf März-Juli im Tagesmittel	54
Abbildung 5-4: Autarkiegrad und Annuität in Abhängigkeit der Speicherkapazität.....	55
Abbildung 5-5: Jährliche gemittelte Verläufe im Tagesverlauf.....	57
Abbildung 5-6: Freifläche Camping Stieglitz	58
Abbildung 5-7: Entwicklung Annuität bei 534 kW _{peak} PV-Leistung	60
Abbildung 5-8: Tageszeitlicher Mittelwert von Globalstrahlung und Lastprofil.....	65
Abbildung 5-9: Vergleich Lastprofil Haushalt vs. Campingplatz	66
Abbildung 5-10: Verlauf von Verbrauch, Netzbezug, Ladezustand und PV-Stromerzeugung.	68
Abbildung 5-11: 100 % Autarkie - Verlauf von Verbrauch, Erzeugung und Ladezustand.....	70
Abbildung 5-12: Strompreise Europa	72
Abbildung 5-13: Solare Einstrahlung Europa	73
Abbildung 5-14: Standortwahl für Beispielort Sizilien.....	74
Abbildung 5-15: Strahlungsbilanz - Vergleich Nord-und Südeuropa im Jahresverlauf.....	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klima Dahme.....	25
Tabelle 2: Vergütungssätze EEG für PV-Anlagen < 100 kW _{Peak}	37
Tabelle 3: Autarkiegrad Vergleich Literatur mit Modell	48
Tabelle 4: Angenommene Kosten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	51
Tabelle 5: Szenario 1: Ergebnisse PV auf Mobilheimen	52
Tabelle 6: Szenario 1 „PV auf Mobilheimen“ - Zusammenfassung.....	56
Tabelle 7: Szenario 2: Ergebnisse PV auf Mobilheimen und Freifläche	59
Tabelle 8: Szenario 2 „PV auf Mobilheimen und Freifläche“ - Zusammenfassung.....	61
Tabelle 9: Szenario bei unbegrenzt verfügbarer Fläche.....	62
Tabelle 10: Vergleichswerte Campingplatz mit SLP H0.....	67
Tabelle 11: Ergebnisse 100 % Autarkie	69
Tabelle 12: Ergebnisse Szenario 1 für Südeuropa	76
Tabelle 13: Ergebnisse Szenario 2 für Südeuropa	77
Tabelle 14: Vergleich der Ergebnisse in Norddeutschland mit Süditalien	77

Abkürzungsverzeichnis

EE Erneuerbare Energie/n

EEG Erneuerbare Energien Gesetz

RCPs Representative Concentration Pathways Szenarien

PVGIS Photovoltaik Geographical Information System

PV Photovoltaik

PtH Power to Heat

SLP Standardlastprofil

DSM Demand-side-Mangement

DGNB Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen

1 Einleitung

Die Transformation der Energieversorgung weg von einem zentralen Versorgungsnetz mit wenigen großen Energieerzeugern durch Kohle und Atomstrom hin zu einem dezentralen Netz mit vielen kleinen, untereinander vernetzten Erzeugern erneuerbarer Energie (EE), wie Wind, Sonne, Wasser und Biomasse, ist bereits seit Jahren Konsens in Politik und Wirtschaft (Jerrit Hilgedieck, 2019, S. 19). Wie allgemein bekannt, steht der Kohleausstieg für Deutschland fest, wenn auch erst bis zum Jahr 2038. Auch der Atomausstieg ist bereits seit einigen Jahren vereinbart und soll bis 2022 erfolgen. (BMU, 2018)

Neben der Endlichkeit fossiler Ressourcen spielt heute vor allem die Vermeidung und Verminderung von Umweltschäden eine wesentliche Rolle als treibende Kraft für den Umstieg auf EE (Umweltbundesamt, 2019). Im Zentrum der Problematik steht dabei, die aus der CO₂-Emission resultierende Erderwärmung. Wird der Ausstoß von CO₂ nicht reduziert, gehen RCP Szenarien (Representative Concentration Pathways) bereits von einer globalen Erwärmung bis zu etwa 4°C bis zum Jahre 2100 aus (IPCC, 2013, S. 1054).

Um Umweltschäden und die Erderwärmung zu vermeiden bzw. zu vermindern, bedarf es dringendem Engagement zur Vermeidung von Treibhausgasen. Zudem werden durch Verbrennungsprozesse Gase, wie beispielweise SO₂ sowie NO_x, freigesetzt wodurch zusätzliche Probleme, wie z.B. saurer Regen und bodennahes Ozon entstehen. Dies sind nur einige der vielen Beispiele für Umweltschädigungen, die mit der Verbrennung fossiler Energieträger einhergehen (Andreas Ratka, 2015).

Durch erneuerbare Energienutzung kann ein schonender Umgang mit natürlichen Ressourcen erreicht werden. Um das im Pariser Abkommen festgelegte 2 Grad Ziel zu erreichen, müssten sich die jährlichen Investitionen in EE bis 2050 jedoch auf 750 Mrd. US\$ mehr als verdoppeln (IRENA, 2019).

Im Zuge dieser Problematik gewinnt das Thema Dezentralisierung der Energieversorgung an Bedeutung und damit einhergehend die Thematik der Energieautarkie (Jerrit Hilgedieck, 2019, S. 18). Steigende Energiekosten für netzbezogenen Strom und fallende Stromgestehungskosten bei EE erhöhen dabei den wirtschaftlichen Anreiz, Strom selbst zu produzieren und zu nutzen. Den Strom direkt am Ort der Erzeugung zu nutzen, stellt nicht nur

Einleitung

eine Entlastung für das Stromnetz dar, sondern verhindert bzw. reduziert auch Energieverluste, die bei der Übertragung über längere Strecken entstehen (Haberschusz, Kairies, Wessels, Magnor, & Sauer, 2017).

Einer im Fachblatt „Nature Climate Change“ veröffentlichten Studie zufolge trägt der Tourismus mit etwa 8 % zur Summe der ausgestoßenen Treibhausgase bei. Dabei steigt laut aktuellen Schätzungen die Summe, der durch den Tourismus ausgestoßenen Treibhausgase, jährlich weiter um 4 % an (Manfred Lenzen, 2018, S. 523).

Innerhalb der Tourismusbranche erfreut sich auch der Campingsektor in Deutschland wachsender Beliebtheit. Laut einer Studie des (Caravaning Industrie Verband e.V., 2019) stieg von 2016 bis 2018 der Umsatz in dieser Branche von 12,6 Mrd. € auf ca. 14 Mrd. € und somit um 11,5 %. Mit über 50,5 Mio. Übernachtungen auf deutschen Campingplätzen, weiteren 15,5 Mio. Übernachtungen auf Reisemobilstellplätzen und 57,5 Mio. Übernachtungen von Dauercampers im Jahr 2018 stellt Camping und Caravaning eine populäre Form des Tourismus dar. Dabei reichen die Möglichkeiten des Campings mittlerweile über das einfache Zelten oder das Verreisen mit dem Wohnanhänger, über das gut ausgestattete Wohnmobil bis hin zum vollausgestatteten Mobilheim. Diese Vielfalt bedient die unterschiedlichen Ansprüche verschiedener Zielgruppen.

Außerdem weist Camping, insbesondere gegenüber Reisen mit dem Flugzeug oder Kreuzfahrtschiffen, laut des Öko-Institutes eine vergleichsweise gute Klimabilanz auf (Öko-Institut e.V., 2013). Dennoch besteht auch in dieser Branche noch großes Potential zur Verbesserung der Klimabilanz.

Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit Konzepte für die Stromversorgung eines Campingplatzes mit EE erstellt und dabei die Thematik der Energieautarkie aufgegriffen. Die Konzepte nach technischen und wirtschaftlichen Kriterien zu bewerten, steht dabei im Fokus.

1.1 Aktuelle Entwicklung am Beispiel der Photovoltaik

Durch die im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) vorgeschriebene Einspeisevergütung, wird seit April 2000 den Betreibern von Photovoltaikanlagen ein fester Preis für die Abnahme des produzierten Stroms garantiert. Dieser lag nach Inkrafttreten des Gesetzes die ersten 8 Jahre im Durchschnitt bei ca. 50 Cent/kWh wie in Abbildung 1-1 dargestellt. Somit entstand für Privatpersonen ein Anreiz PV-Anlagen zu installieren, wodurch der Ausbau der EE vorangetrieben wurde. (IWR, 2000)

Seit Bestehen des EEG haben sich die Rahmenbedingungen für Photovoltaikstrom deutlich verändert. Der Anstieg des Strompreises mit gleichzeitigem Preisverfall der PV-Anlagen macht eine Einspeisung mit Einspeisevergütung weniger attraktiv, als die Möglichkeit den produzierten Strom selbst zu verbrauchen. Standen beispielweise 2006 für eine schlüsselfertige PV-Anlage Kosten von etwa 4500 €/kW_{peak} einer Einspeisevergütung von etwa 50 Cent/kWh gegenüber, so muss ein zukünftiger PV Kleinanlagenbetreiber derzeit nur noch mit etwa 1200 €/kW_{peak} und einer Einspeisevergütung von 10,33 Cent/kWh (Stand Sept.2019) kalkulieren. Zugleich sind die Stromkosten aus dem öffentlichen Netz von ca. 19 Cent/kWh auf 30 Cent/kWh angestiegen. (Frauenhofer ISE, 2019)

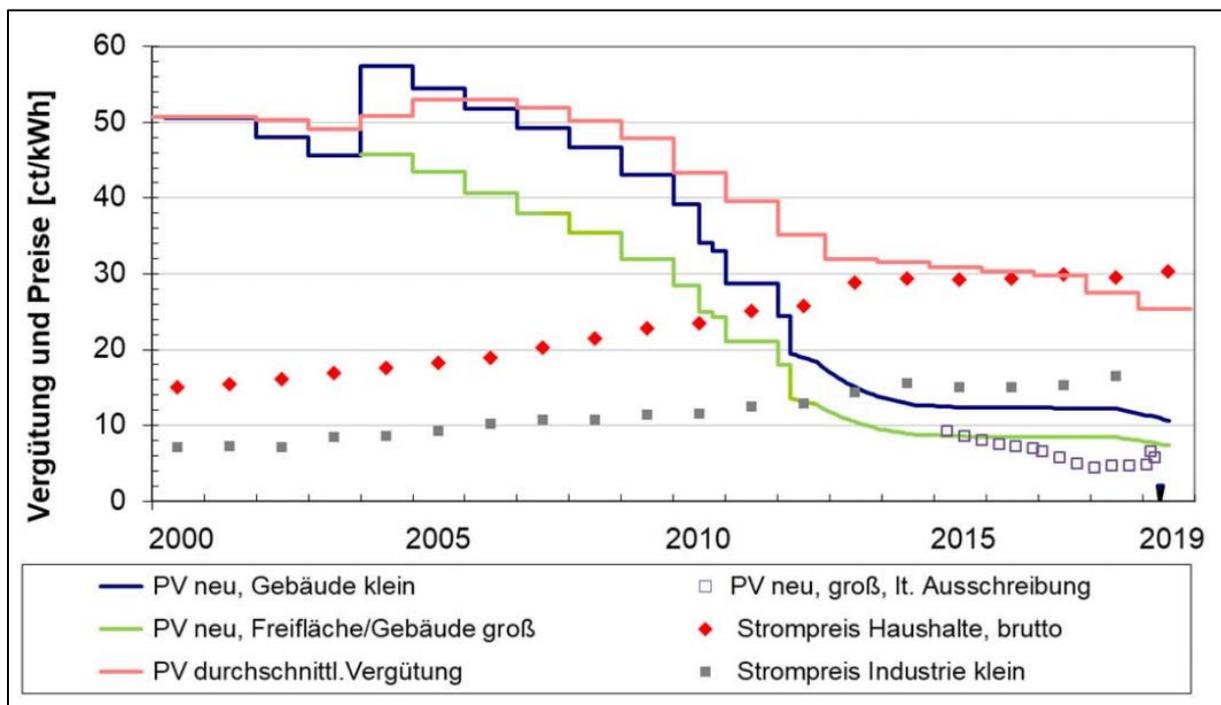


Abbildung 1-1: Preisentwicklung Strom und PV-Anlagen 2000-2019
Quelle: (Frauenhofer ISE, 2019)

Einleitung

Wie in Abbildung 1-2 dargestellt treiben vor allem Privatpersonen, Gewerbe und Landwirte den Ausbau der PV voran. Energieversorger besitzen mit 5,7 % der installierten PV-Leistung nur einen kleinen Anteil der gesamt installierten Kapazität in Deutschland.

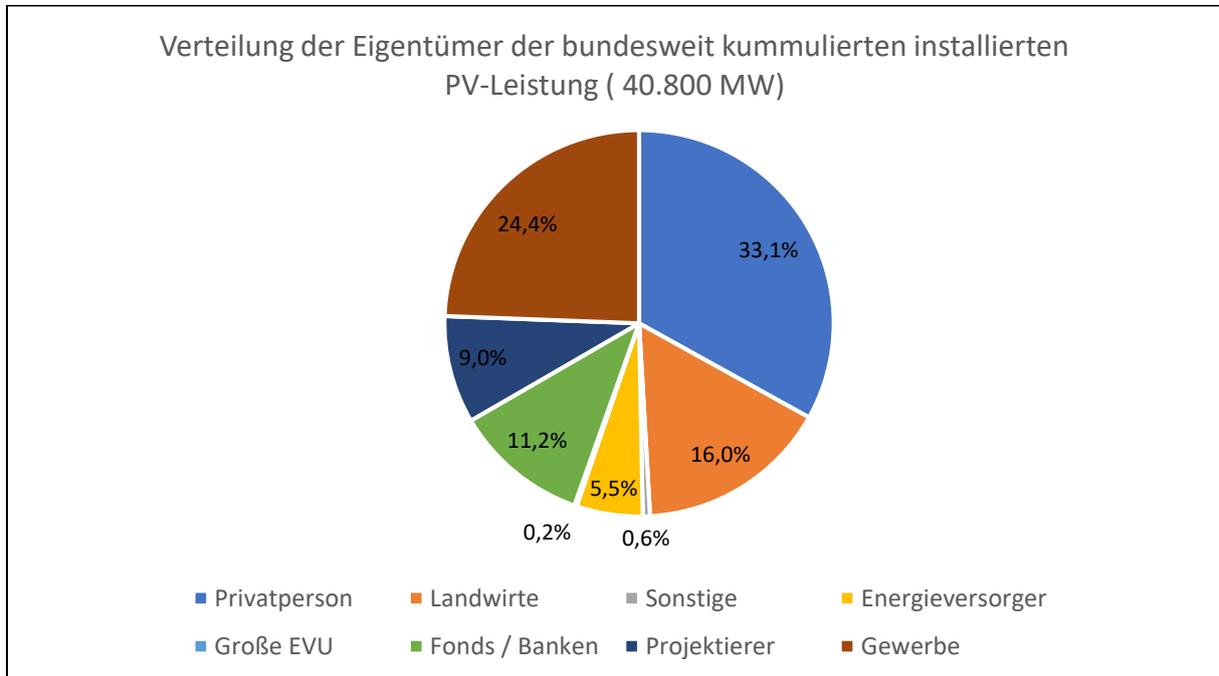


Abbildung 1-2: Verteilung der Eigentümer der installierten PV Leistung
Quelle: (AEE, Agentur für Erneuerbare Energie, 2017)

Mit steigender Anzahl von PV-Anlagen, sinkenden Einspeisevergütungen und steigenden Strompreisen, steigt auch die Nachfrage an Speichersystemen (Luthander, 2015), welche den eigens produzierten Strom zwischenspeichern und so eine Steigerung des Eigenverbrauchs ermöglichen. PV-Systeme kombiniert mit einem Batteriespeicher ermöglichen es somit, den tagsüber selbst erzeugten, überschüssigen Strom zwischen zu speichern und diesen in den Abend- und Nachtstunden zu verbrauchen. Wie in Abbildung 1-3 dargestellt, ist ein deutlicher Anstieg der installierten Batteriespeicher seit 2014 zu erkennen. Dabei spielen vor allem Lithium-Ionen-Akkumulatoren eine bedeutende Rolle (Bundesnetzagentur, 2019).

Einleitung

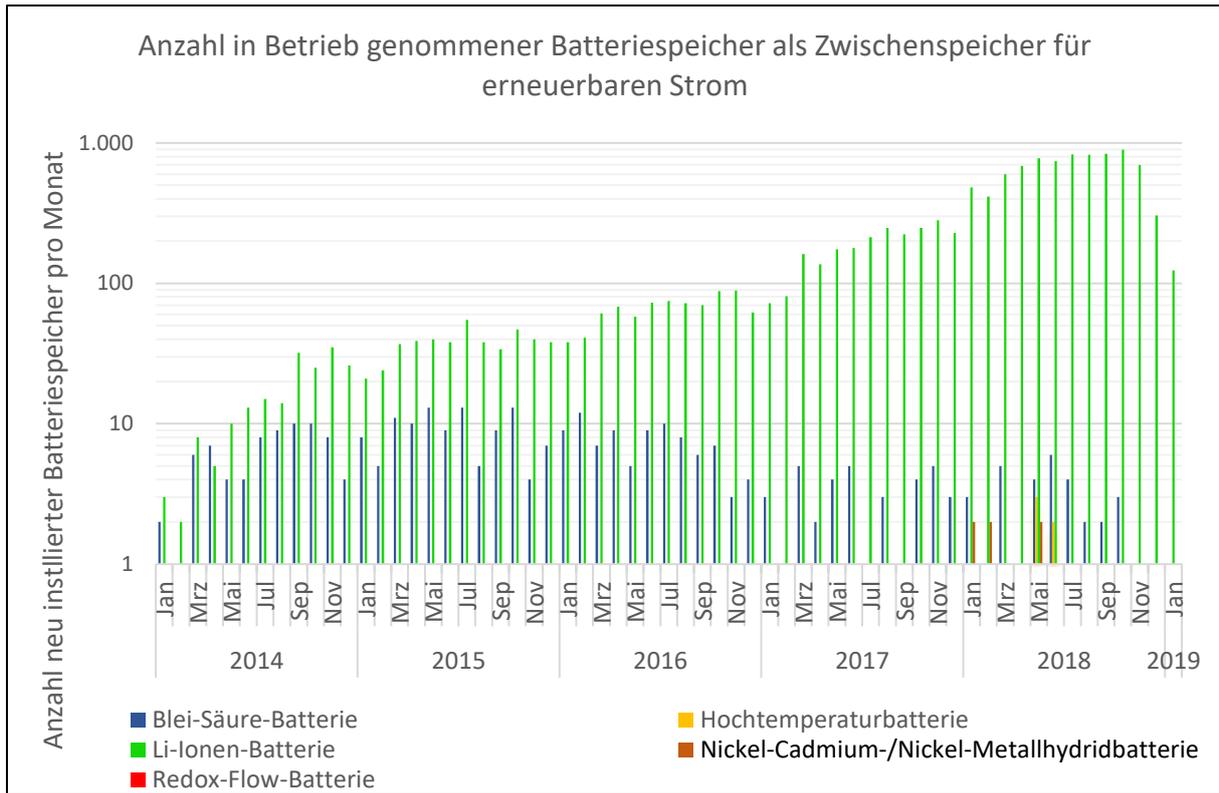


Abbildung 1-3: Anzahl der in Betrieb genommener Batteriespeicher
- Entwicklung von 2014-2019 in logarithmischer Darstellung
Quelle: (Bundesnetzagentur, 2019)

1.2 Energieautarkie

Die unterbrechungsfreie Stromversorgung ist für unsere heutige Lebensweise ein essentielles Bedürfnis. Global betrachtet, gibt es auch heute noch einige abgelegene Regionen, welche keinen Zugang zum Stromnetz haben und sich so ihre Energie selbst bereitstellen müssen (Tathagata Sarkur, 2019, S. 102). Hierzulande besteht dagegen keine solche Dringlichkeit, sich autark mit elektrischer Energie zu versorgen. Trotz dessen ist die Eigenversorgung mit elektrischer Energie auch in Deutschland in den letzten Jahren eine interessante Alternative geworden und lässt sich durch EE vor allem in privaten Haushalten teilweise realisieren.

Bei der Begrifflichkeit der Energieautarkie gilt es zwischen verschiedenen Formen der Autarkie zu differenzieren. So könnte man bereits beim Kochen über einem Lagerfeuer von Energieautarkie sprechen oder ein durch eine Solarzelle geladenes Smartphone als energieautark deklarieren. Im energiewirtschaftlichen Kontext gibt es keinen einheitlichen Konsens über den Begriff der Energieautarkie, jedoch werden einige Begrifflichkeiten, wie Energieunabhängigkeit (Verhoog, 2017, S. 8), Energieautonomie (Brühne, 2008, S. 262) oder

Einleitung

Energieautarkie verwendet, welche in Bezug auf die zunehmende Dezentralisierung mit EE Verwendung finden.

In dieser Arbeit wird eine Unterteilung aus dem Forschungsbericht von Russell McKenna (2015) verwendet. Betrachtet man ein System aus Stromerzeugungsanlage/n und Verbraucher/n, so kann von **bilanzieller Energieautarkie** gesprochen werden, wenn innerhalb einer bestimmten Zeitperiode (üblicherweise ein Jahr) die Menge der erzeugten Energie ausreicht, um den Verbrauch zu decken. Dabei ist der Verbraucher an das Verbundnetz angeschlossen und speist sowohl Strom ins Netz ein und bezieht diesen ebenfalls.

Bei **kompletter Energieautarkie** ist das System von seiner Umgebung unabhängig und es findet kein Austausch von Energieflüssen statt. Entscheidend hierfür ist, dass die Energieproduktion zeitlich mit dem Verbrauch übereinstimmt. Doch das Erzeugungsprofil erneuerbarer Energie deckt sich dabei in den seltensten Fällen identisch mit dem Verbrauchsprofil. Ein Energiespeicher beeinflusst die zeitliche Verfügbarkeit des Stromangebotes und entlastet dabei zusätzlich den räumlichen Ausgleich durch das Verbundnetz. Zumindest solange der Speicher nicht durch das Verbundnetz geladen werden kann. (Synwoldt, 2016, S. 317)

Der Grad der Energieautarkie wird von Weniger et al. (2015) in zwei Parameter unterteilt. Durch den **Autarkiegrad** und den **Eigenverbrauchsanteil** (Johannes Weniger J. B., 2015, S. 27). Der Eigenverbrauchsanteil beschreibt dabei den Anteil des erzeugten Stroms, welcher zeitgleich durch einen Verbraucher und/oder das Laden eines Speichers verbraucht wird.

$$\text{Eigenverbrauchsanteil: } E_V = \frac{V_E}{E_E} \quad (1.1)$$

Der Autarkiegrad gibt das Verhältnis von direkt verbrauchter Energie aus eigener Erzeugung zum Gesamtverbrauch an.

$$\text{Autarkiegrad: } A_G = \frac{V_E}{V_G} \quad (1.2)$$

E_E = Energie aus Eigenerzeugung

V_E = Verbrauch aus Eigenerzeugung

V_G = Gesamtverbrauch

Liegen beide Werte bei 100 %, so wäre das System komplett autark, da weder Strom über die Systemgrenze hinaus abgegeben wird noch Strom aus externen Quellen bezogen wird. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, anhand eines Praxisbeispiels zu ermitteln, wie nahe diese beiden Werte unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit an 100 % gelangen können. Da ein Überschuss den Eigenverbrauchsanteil schmälert, ist dieser relativ leicht durch verringerte Produktion zu steigern. Der Autarkiegrad muss die Produktion jedoch jederzeit den Verbrauch decken können wodurch dieser mit nur mit sehr viel Aufwand 100 % erreichen kann.

1.3 Forschungsfragen und Ziele

Im Fokus dieser Forschungsarbeit steht der in Dahme an der Ostsee gelegene Campingplatz Stieglitz. Es werden die Möglichkeiten untersucht, wie die Erzeugung von erneuerbarem Strom, dazu passenden Speichertechnologien, Energieeffizienzmaßnahmen und der ganzheitlichen Betrachtung aller Energieverbraucher (Strom, Wärme, Mobilität) zu einer nachhaltigen und wirtschaftlichen Energieversorgung beitragen.

Die erneuerbaren Energien tragen bereits einen großen Teil zur elektrischen Energieversorgung in Norddeutschland bei. Aus einem Bericht des Energiewendeministeriums geht hervor, dass in Schleswig-Holstein die Produktion der erneuerbaren Energie im Jahr 2018 etwa 22 TWh elektrischer Energie betrug. Dies entspricht 150 % des Bruttostromverbrauchs und bedeutet, dass Schleswig-Holstein bilanziell bereits mehr Strom aus erneuerbaren Energiequellen produziert als verbraucht wird. Hierbei spielen vor allem Wind und Biomasse eine zentrale Rolle. Selbiger Bericht beziffert, dass in Schleswig-Holstein allein im Jahr 2018 ca. 2.860 GWh aus Windenergie abgestellt und somit nicht produziert wurden, da die Netze den Strom nicht aufnehmen und übertragen konnten (Ministerium für Energiewende, 2019).

Dies ist nur ein Beispiel, welches verdeutlicht, dass zum Gelingen der Energiewende nicht nur der Ausbau von erneuerbaren Energien ausreichend ist. Zentraler Bestandteil der angestrebten Transformation sind auch der Ausbau der Netze und die Implementierung geeigneter Speichermöglichkeiten. Die Anforderungen an Speichersysteme hängen dabei von unterschiedlichen Faktoren ab. In großen Verbundnetzen müssen Speichersysteme zum Erhalt der Frequenz sowohl kurzfristige Schwankungen ausgleichen als auch Langzeitspeicherung über Wochen oder Monate gewährleisten, um wetterbedingte und saisonale Engpässe in der Stromerzeugung zu kompensieren. Auch das Netz selbst und die daran angeschlossenen

Einleitung

Verbraucher müssen bei der Transformation ihr Verhalten ändern. Dabei kann durch eine flexibel reagierende Nachfrage von Strom ein wesentlicher Beitrag zum Gelingen der Energiewende geleistet werden (Hans-Martin Henning, 2015, S. 6).

In dieser Arbeit wird auf die Frage der Frequenzerhaltung in einem energieautarken Netz nicht näher eingegangen. Wie jedoch bereits in Kapitel 1 erwähnt, stellt die örtliche Nähe von Verbrauch und Erzeugung eine Entlastung der Netze dar und ist somit eine wichtige Voraussetzung für eine erfolgreiche Energiewende.

Folgende Fragestellungen sollen in der vorliegenden Arbeit erörtert werden:

- 1) Welcher Autarkiegrad lässt sich mit den aktuellen Rahmenbedingungen am Campingplatz Stieglitz unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten erreichen?
- 2) Bietet der Saisonbetrieb des Campingplatzes einen Vorteil gegenüber einem ganzjährigen Betrieb? Wie autark wäre selbiges Konzept für einen normalen Haushalt?
- 3) Käme ein komplett autarkes System für den Campingplatz Stieglitz in Betracht und welcher Mehraufwand würde dabei entstehen?
- 4) Welche Standortfaktoren beeinflussen die autarke Energieversorgung positiv und gibt es europäische Länder mit günstigen Voraussetzungen hierfür?

Auch wenn davon auszugehen ist, dass ein energieautarker Campingplatz einen Imagevorteil gegenüber konventionell versorgten Campingplätzen besitzt, wird im Rahmen der Masterarbeit kein detailliertes Augenmerk auf diesen geworfen. Die Attraktivität eines energieautarken Campingplatzes und die damit mögliche Steigerung der Gästeanzahl ließen sich quantitativ erst einige Jahre nach der Umsetzung beurteilen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit gliedert sich in sechs Kapitel, wobei sich jedes in Unterpunkte gliedert. Im ersten Kapitel wird nach einer kurzen Einführung in die derzeitige Stromversorgung in Norddeutschland die Thematik der Energieautarkie beschrieben und die Forschungsfragen formuliert.

Das zweite Kapitel erläutert technische und physikalische Prinzipien der Energieerzeugung mittels erneuerbarer Energie sowie Energiespeicherung. Dabei wird der Fokus auf aktuelle am

Einleitung

Markt verfügbaren Technologien gelegt. Im Anschluss daran werden einige Energieeffizienzmaßnahmen erläutert.

Im weiteren Verlauf wird der Campingplatz Stieglitz in Kapitel 3 näher beschrieben. Dabei werden neben der Objektbeschreibung die Rahmenbedingungen vor Ort analysiert. Dazu gehört die Analyse der Klimadaten, um das Potential erneuerbarer Energie abzuschätzen. Daran an, schließt sich die Energie Bedarfsanalyse. Dazu wird ein Lastprofil des Campingplatzes aus 2018 untersucht, da der Verbrauch Rückschlüsse auf den Gesamtverbrauch sowie die zeitliche Verteilung gibt. Außerdem werden örtliche Gegebenheiten, welche sich auf die Nutzung erneuerbarer Energie auswirken, dargelegt. Unter Berücksichtigung der Punkte, welche in der Beschreibung des Campingplatzes erläutert wurden, wird im Anschluss eine begründete Vorauswahl geeigneter Technologien getroffen.

Um ökonomische Aspekte zu beachten, werden die aktuell zu erwartenden Kosten für die Installation und den Betrieb erneuerbarer Energieanlagen evaluiert. Aktuell zu erwartende staatliche Förderungen werden ebenfalls geprüft.

In einem Excel-Modell werden alle vorhandenen Daten zusammengefügt. Hierzu wird eine Tabellenkalkulation durchgeführt, welche die Daten aus Verbrauch und Erzeugung zu jeder Stunde des Jahres vergleicht. Die Erzeugung basiert dabei auf den Klimadaten ist jedoch in ihrer Kapazität variabel. Um die zeitliche Übereinstimmung anzupassen, wird ein Speicher in das Modell integriert. Ziel des Modells ist es, die nötige Erzeugungs- und Speicherkapazität zu berechnen. Das Modell berücksichtigt dabei die anfallenden Kosten und gibt diese in einer Annuität an. Anhand der berechneten Daten ergeben sich Werte für den Autarkiegrad sowie den Eigenverbrauchsanteil.

Mit dem Modell werden verschiedene Szenarien erstellt. Diese werden in dem Kapitel „Ergebnisse“ analysiert und diskutiert. Dabei wird auf die in der Einleitung verfassten Forschungsfragen näher eingegangen. Nach Erstellung der Szenarien werden Handlungsempfehlungen zur Umsetzung ausgesprochen. Abschließend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse noch einmal zusammengefasst und diskutiert.

2 Grundlagen erneuerbare Energien und Energiespeicher

EE spielen mittlerweile eine zentrale Rolle für die Energieproduktion weltweit. In Deutschland betrug der Anteil von EE im ersten Halbjahr 2019 bereits 44 % am Bruttostromverbrauch (BDEW, 2019). Vor nicht einmal 30 Jahren wären Szenarien einer vollständig auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung als utopisch deklariert worden. Mit kontinuierlicher Weiterentwicklung und Verbesserung der Technologien stellt sich heute nur noch die Frage, wann diese Szenarien Realität werden (Peter Hennicke, 2007, S. 7). In diesem Kapitel werden sowohl die Technologien der Erzeugung und Speicherung erneuerbarer Energien erläutert als auch Einsparpotentiale dargelegt.

2.1 Erneuerbare Energien

Die Sonne ist, bis auf Gezeitenkräfte und geothermische Energie, die Quelle aller erneuerbaren Energieformen, welche sich mit heutiger Technologie in Nutzenergie umwandeln lassen.

Wind entsteht, indem ihre Energie die Erde unterschiedlich stark erwärmt und so durch aufsteigende und sich herabsinkende Luftmassen Druckunterschiede entstehen, die durch Bewegung der Luftmasse ausgeglichen werden. Ebenfalls wird durch die Sonne der Wasserkreislauf angetrieben, indem Wasser verdunstet und an anderer Stelle wieder als Regen auf die Erde herabfällt. Auch Pflanzen speichern die Sonnenenergie während ihres Wachstums und wandeln diese in Biomasse um. (Wörten, 2010, S. 11-12)

2.1.1 Photovoltaik

Die Photovoltaik nutzt die Sonnenstrahlung, um daraus direkt elektrischen Strom zu erzeugen. Die Technologie beruht auf dem sogenannten photoelektrischen Effekt. Herzstück der Photozelle (Abbildung 2-1) ist dabei ein meist auf Silizium bestehender p-n-Übergang, bei dem die n-Schicht mit z.B. Phosphor Atomen dotiert wird, was zu einem Überschuss an Elektronen führt. Die p-Schicht hingegen wird mit beispielsweise Bor Atomen dotiert, wodurch diese Schicht einen Mangel an Elektronen aufweist. An der Grenzschicht zwischen diesen beiden Schichten verbinden sich die überschüssigen Elektronen locker mit den Löchern, wodurch ein elektrisches Feld innerhalb des p-n-Übergang entsteht. Treffen Photonen des Sonnenlichtes mit ausreichend Energie auf diese Schicht, wird ein Elektron von seinem Atom getrennt. Das freiwerdende Elektron wandert durch die Grenzschicht zum Pluspol und wird dort über eine

Kontaktschicht abgeleitet. Über einen Stromkreis kann das Elektron wieder zum Minuspol fließen, wo es sich mit einem in der p-Schicht befindlichen Loch rekombinieren kann (Bernhard Weller, 2009, S. 14).

Die PV-Zelle erzeugt eine Gleichspannung, welche, bevor sie ins Verbundnetz und an Verbraucher angeschlossen wird, mithilfe von Wechselrichtern in Wechselspannung umgewandelt werden muss.

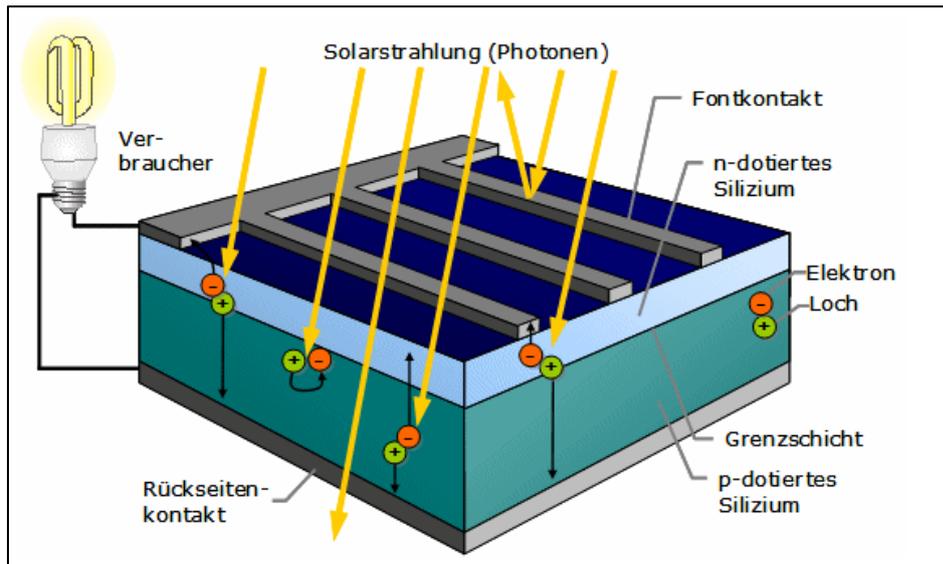


Abbildung 2-1: Prinzip einer Photozelle
Quelle: (Quaschnig, 2018, S. 131)

In den letzten 10 Jahren ist der durchschnittliche Wirkungsgrad von Siliziumzellen von 12 % auf 17 % gestiegen. Einige Module erreichen sogar bis zu 21 % (Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2019, S. 7). Beim Kauf einer PV-Anlage sollte neben dem Wirkungsgrad der Module, ebenfalls eine Lebensdauer von mindestens 20 Jahren laut Hersteller gewährleistet werden und die Degradation (Abnahme der Leistungsfähigkeit) nach 20 Jahren Laufzeit sollte in etwa 0,5 % pro Jahr betragen (Pearsall, 2017, S. 81).

Entscheidender Faktor für den Ertrag einer Photovoltaikanlage stellt dabei die Globalstrahlung dar. Diese besteht aus der direkten Sonnenstrahlung und der diffusen Strahlung, welche durch Streuung in der Atmosphäre (durch z.B. Aerosole oder Wolken) auf die Erdoberfläche trifft. Die Globalstrahlung variiert global betrachtet sehr stark. Der Mittelwert für die Globalstrahlung in Deutschland liegt zwischen 950-1100 kWh/m²a (Watter, 2009, S. 8).

Bei der Installation und während des Betriebes der Anlage sollten zusätzlich einige Faktoren beachtet werden, welche die Effizienz der PV-Module beeinflussen. Diese sind z.B. die Vermeidung von Verschattung, der richtige Aufstellwinkel der Module und die Umgebungstemperatur, da die Effizienz mit steigender Temperatur der Module abnimmt. Während des Betriebes gilt es darauf zu achten, Verschmutzungen, welche z.B. durch Staub entstehen können, zu vermeiden bzw. zu beseitigen. (Linus Idoko, 2018, S. 358)

2.1.2 Windkraft

Windkraft ist mit einem Anteil von 16,3 % (Stand: Februar 2018) der Stromerzeugung in Deutschland die größte Quelle erneuerbarer Energie (BMWI, 2018).

Die Umwandlung der in der Luftbewegung enthaltenden kinetischen Energie in mechanische bzw. elektrische Energie kann durch zwei Prinzipien erfolgen: Durch das Widerstandsprinzip oder das Auftriebsprinzip. Während früher das Widerstandsprinzip verwendet wurde, nutzen Rotoren moderner Windkraftanlagen aufgrund des besseren Wirkungsgrades das Auftriebsprinzip. Durch das Vorbeiströmen der Luft am Flügel wird an diesem ein Auftrieb erzeugt, welcher diesen so in Rotation versetzt. Von der Rotornabe der Windkraftanlage wird die Drehbewegung mittels einer Welle an einen Generator übertragen, der die Bewegung in elektrische Energie umwandelt. Der Rotor entzieht der vorbeiströmenden Luft also Bewegungsenergie und verlangsamt diese. (Andreas Ratka, 2015, S. 115)

Bei der Windkraft ist die richtige Auswahl des Standortes essentiell, da der Wind besonders in Bodennähe durch z.B. Bäume, Gebäude oder die Beschaffenheit des Bodens selbst beeinflusst wird. Die Leistung des Windes berechnet sich durch folgende Formel:

$$P = 1/2 * A * \rho * v^3 \quad (2.1)$$

P = Leistung

$$A = \text{Rotorfläche} = d^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$\rho = \text{Dichte der Luft} = \frac{\rho}{R \cdot T}$$

v = Luftgeschwindigkeit am Rotor

(Andreas Ratka, 2015, S. 122)

Da die Leistung mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit steigt, ist es wichtig, einen Standort mit guten und stetigen Windverhältnissen zu finden (Andreas Ratka, 2015, S. 137). Mit steigender Höhe nimmt der Wind an Kraft und Kontinuität zu, wodurch höher gelegene Anlagen höhere Erträge generieren.

Energieversorger setzen bei der Energiewende verstärkt auf Windkraft. Dabei werden an geeigneten Orten meist mehrere Anlagen errichtet, woraus Windparks entstehen. Besonders Offshore-Anlagen, welche an geeigneten Standorten etwa 4.000 Volllaststunden (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2015, S. 8) generieren sind für Energieversorger interessant, da sie weit weniger fluktuieren als Onshore-Anlagen oder PV-Anlagen. Ihr Verhalten ähnelt somit eher dem eines kalorischen Kraftwerks (Watter, 2009, S. 47-52).

2.1.3 Wasserkraft

Wasserkraft stellt die bislang einzige erneuerbare Energiequelle dar, die bereits einen maßgeblichen Teil zur weltweiten Stromproduktion beiträgt. Etwa 1/6 der weltweiten Energieproduktion resultiert aus der Wasserkraft (Thomas Bürke, 2010, S. 26-28). Jedoch ist das Potential in Deutschland durch die topografischen Gegebenheiten weniger groß, als es in bergigen Ländern der Fall ist. Daher trägt die Wasserkraft auch nur 3,1 % zur Stromversorgung in Deutschland bei (BMWl, 2018).

Um diese Kraft nutzen zu können, bedarf es eines Höhenunterschieds zweier Wasserreservoirs bzw. fließendem Gewässer. Die kinetische oder potentielle Energie lässt sich in Wasserkraftanlagen oder Wasserkraftwerken in elektrische Energie umwandeln. Das Prinzip besteht dabei im Wesentlichen aus einer Turbine, welche durch strömendes Wasser in Rotation versetzt wird und diese Rotation mittels eines Generators in Strom umwandelt (Schütz, 2013, S. 205).

Die Größe der Erzeugungsanlage kann von mehreren Gigawatt bis wenige hunderte Watt variieren. Die Leistung hängt dabei maßgeblich von der Wassermenge sowie dessen Fließgeschwindigkeit ab. Wenn die topografischen Gegebenheiten es zulassen, ist Wasserkraft eine zuverlässige Energiequelle, welche sich auch für die Bereitstellung von Grundlast eignet.

2.1.4 Biomasse

Unter Biomasse versteht man feste flüssige oder gasförmige Stoffe biologischen Ursprungs. Durch die Photosynthese der Pflanzen werden mit Sonnenlicht, CO₂ und Wasser, Bestandteile der Pflanze, wie Stärke, Cellulose und Zucker, aufgebaut. Die so entstehende Biomasse muss aufgeheizt und getrocknet werden. Danach findet eine pyrolytische Zersetzung statt (Aufspaltung langkettiger Verbindungen in kurzkettige Kohlenwasserstoffmoleküle).

Das Produkt wird anschließend zunächst vergast bevor die Energieerzeugung durch eine Verbrennungskraftmaschine erfolgt, welche einen Generator antreibt. Über Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) lässt sich die dabei entstehende Wärme ebenfalls nutzen (Schütz, 2013, S. 268-270). Da es sich um nachwachsende Rohstoffe handelt, ist diese Form von Energie ebenfalls erneuerbar. Zur Biomasse gehören feste Brennstoffe, wie z.B. Holz, flüssige Energieträger, wie Methanol oder Ethanol, oder gasförmige Energieträger, wie Biogas oder Biomethan.

Vor allem die relativ einfache Handhabung und Speicherbarkeit stellt einen Vorteil bei der Verwendung von Biomasse als Energiequelle dar. Die Flexibilität spricht ebenfalls dafür, sie als Ergänzung für fluktuierende Stromerzeugung aus Sonne zu verwenden (Synwoldt, 2016, S. 255). Jedoch müssen große Flächen für den Anbau von Biomasse zur Verfügung stehen, was nicht an jedem Standort gewährleistet werden kann. Außerdem stehen diese Flächen bspw. mit der Agrarwirtschaft in Konkurrenz. Zudem ist die Flächeneffizienz von PV-Anlagen um 25-65 Mal höher als der Anbau von Energiepflanzen (Günther, 2015, S. 169).

2.2 Energiespeicher

Um die durch EE fluktuierende Stromerzeugung mittels Energiespeicher dem tatsächlichen Lastprofil anzupassen, stehen unterschiedlichste Technologien zur Verfügung. Speichertechnologien basieren auf verschiedenen physikalischen Prinzipien. Mit „Strom zu Strom“ (mechanisch, elektrochemisch und elektrisch), „Strom zu Gas/Flüssigkeit“ (Wasserstoff, Methanisierung) und „Strom zu Wärme“ (Power to Heat) lässt sich überschüssige Energie speichern. Jede Technologie erfüllt dabei unterschiedliche Anforderungen und eignet sich für unterschiedliche Zwecke. In Abbildung 2-2 ist eine Übersicht über die wichtigsten Energiespeicher dargestellt.

Kennzahlen für Energiespeicher unterscheiden sich dabei in Energiedichte (kW/kg), in Leistungsdichte (W/kg), Ansprechzeit und Wirkungsgrad. Ebenfalls spielen die Kosten pro kWh eine wichtige Rolle. Um eine konstante Stromversorgung zu gewährleisten, werden ebenso schnell ansprechende Speicher, welche schnell viel Energie aufnehmen können benötigt, als auch Speicher, welche über lange Zeit große Mengen Energie speichern und wieder abgeben können.

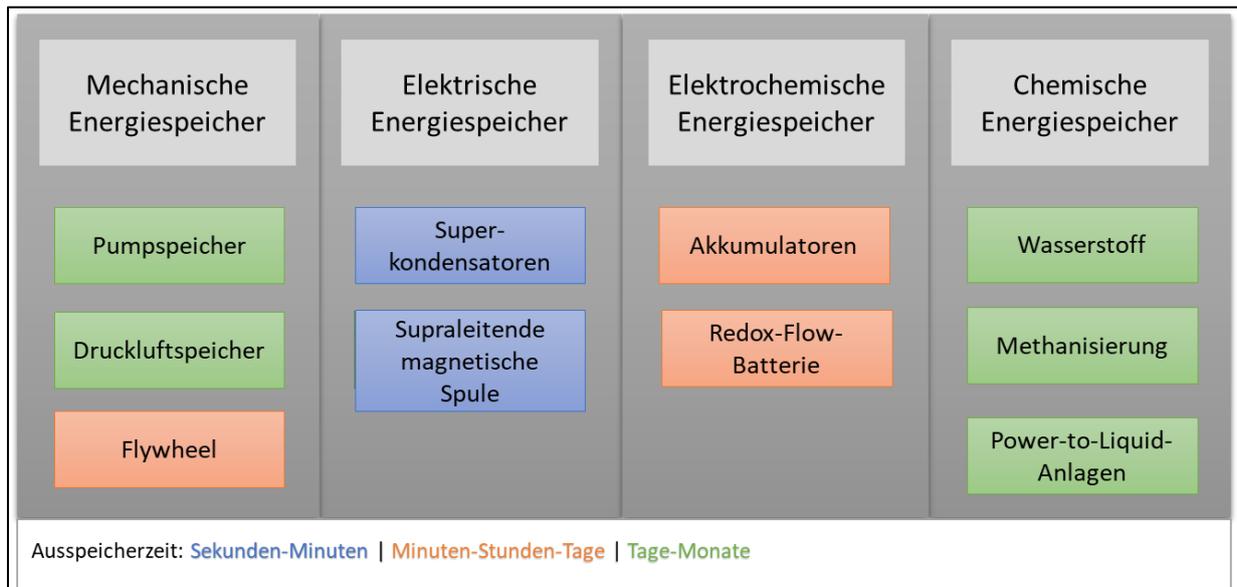


Abbildung 2-2: Übersicht Energiespeicher (eigene Darstellung)

In diesem Kapitel werden lediglich ausgewählte Speichermethoden beschrieben. Pumpspeicher, Druckluftspeicher sowie Methanisierung sind für einen verhältnismäßig kleinen Maßstab (wie die Versorgung eines Campingplatzes) nicht geeignet. Da in dem Konzept die Stabilität des Netzes keine Berücksichtigung findet, wird außerdem auf supraleitende Spulen und Superkondensatoren nicht eingegangen.

2.2.1 Li-Ionen Akkumulator

Elektrochemische Speicher finden bereits in unzähligen Bereichen Anwendung. Ebenso existiert eine Vielzahl verschiedener Akku-Typen, die unterschiedliche Elemente als Kathodenmaterial verwenden und somit verschiedene Eigenschaften besitzen.

Ein Akkumulator setzt sich wie folgt zusammen:

- Kathode auf einem Aluminiumträger → Überwiegend bestehend aus Lithium-Metalloxiden, wie z.B. LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiO_2 oder LiFePO_4

- Anode auf einem Kupferträger → Bestehend aus Kohlenstoff, Titanat oder Silizium (vorwiegend Graphit)
- Wasserfreier Elektrolyt → Bestehend aus bspw. Lithiumhexafluor-phosphat (LiPF₆)

Anode und Kathode sind durch eine Membran (Seperator) voneinander getrennt, welche nur für Li⁺-Ionen durchlässig ist, um Kurzschlüsse auszuschließen. Beim Laden gelangt ein Elektron von der Kathode über einen Stromkreis zur Anode. Da das Li-Metalloxid nun positiv geladen wäre, wandert das Li⁺-Ion durch die Membran zur Anode, wo es sich wieder mit dem Elektron verbindet und in der Anode interkaliert wird. Beim Entladevorgang fließt das Elektron zurück über einen Stromkreis zur Anode, um sich dort wieder mit dem durch die Membran zurück gewanderten Li⁺-ion zu verbinden. Die Qualität bzw. die Reinheit der verwendeten Materialien beeinflusst dabei maßgeblich die Lebensdauer und die Kapazität des Akkumulators. (Korthauer, 2013, S. 14-16)

Die Spannung der Akkuzelle ist durch die Zellchemie bestimmt. Durch Vergrößerung der Zelle lässt sich nur die Kapazität, nicht aber die Zellspannung steigern. Um ein geeignetes Strom- und Spannungsfenster bereitzustellen, werden Einzelzellen zu mehreren Zellen in Serie oder parallel geschaltet.

Die Gesamtspannung ergibt sich dabei aus der Summe n der in Serie geschalteten Einzelzellen:

$$U_{ges} = \sum_{i=1}^n U_i$$

Der maximale Strom ergibt sich aus der Summe y der parallel geschalteten Einzelzellen:

$$I_{ges} = \sum_{i=1}^y I_i$$

Der Ladezustand eines Li-Ionen-Akkus wird üblicherweise durch dessen Gesamtspannung ermittelt (Schmiegel, 2019, S. 150).

Batteriesysteme unterliegen gewissen Grenzen bezüglich der Zellspannung, die aus Sicherheitsgründen nicht über- oder unterschritten werden dürfen. Li-Ionen Akkus reagieren sensibel auf Tiefenentladung oder Überladung, weshalb sie durch eine Leistungsregelung davor bewahrt werden.

Vorteile der Akkumulatoren sind die schnelle Ansprechzeit und der hohe Wirkungsgrad von bis zu 97 % (Xing Luo, 2014, S. 517). Der Wirkungsgrad hängt jedoch auch von der Verwendung ab. Hohe Lade- und Entladeströme wirken sich bspw. negativ aus (Schoop, 2018, S. 74).

Die Zyklenfestigkeit ist heutzutage ebenfalls hoch. Einige Hersteller geben mittlerweile bis zu 8.000 Zyklen an, was einer Lebensdauer von 20-30 Jahren entspricht (Tevolt, 2019).

Ein Akkumulator lässt sich als Wechselfrequenz (AC) oder als Gleichspannung (DC) in ein PV-System integrieren. Ein Anwendungstest der HTW Berlin zum Vergleich AC- und DC-gekoppelter Speichersysteme legt eine geringfügig bessere Effizienz AC-gekoppelter Systeme offen (Nico Orth, 2018, S. 40).

Akkumulatoren befinden sich auch in Elektroautos. Ebenfalls könnten Wohnmobile in den nächsten Jahren teilweise elektrifiziert werden. Die Akkumulatoren könnten während der Standzeit durch bidirektionales Laden, d.h. dass der Akku sowohl geladen als auch entladen werden kann, genutzt und in das Energiesystem integriert werden. Dies wäre eine Möglichkeit, die Kapazität stationärer Speicher zu verringern.

2.2.2 Redox-Flow-Batterie

In Redox-Flow-Batterien (schematisch in Abbildung 2-3) befinden sich zwei unterschiedliche Elektrolyte in denen die Reaktionspartner (welche aus Salzen bestehen) flüssig gelöst sind. Die flüssigen Elektrolyte werden mittels Pumpen in die Zelle befördert, in welcher eine Redox-Reaktion stattfindet. Dabei werden die Elektrolyte in die aktive Zelle gepumpt. Dort trennt der Separator die Elektrolyte voneinander, wodurch ein Strom fließt. (RWTH Aachen, 2012, S. 48)

Die Redox-Flow-Batterie hat den großen Vorteil, dass die Skalierung von Leistung und Kapazität unabhängig voneinander möglich ist. Da die aktiven Materialien (Elektrolyte) nicht fest mit Kathode oder Anode verbunden sind, sondern sich diese sowohl auf Kathoden- als auch auf Anodenseite in externen Tanks befinden, lässt sich die maximale Leistung durch die Größe der Kathode und der Anode festlegen, wohingegen die Kapazität aus dem Fassungsvermögen der Tanks resultiert (Schmiegel, 2019, S. 201-202).

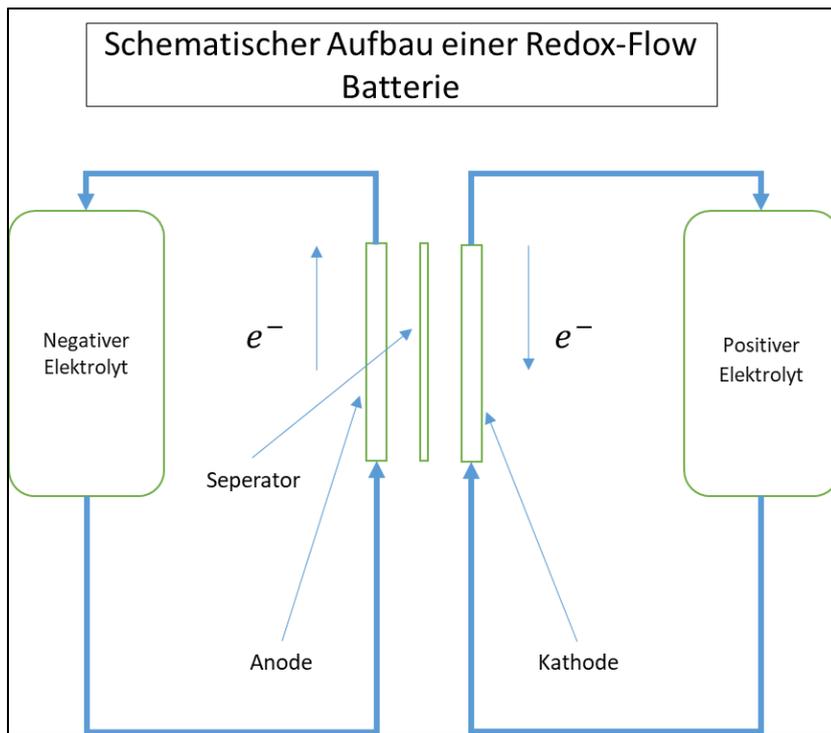


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung einer Redox-Flow-Batterie (eigene Darstellung)

2.2.3 Flywheel

Ein Flywheel (Deutsch: Schwunghmassenspeicher) besteht aus einer Masse, welche beim Ladevorgang mit Hilfe eines Elektromotors in Rotation versetzt wird. Die elektrische Energie wird also in kinetische Energie umgewandelt. Beim Entladen fungiert der Elektromotor als Generator, um die Rotation wieder in elektrische Energie umzuwandeln und die rotierende Masse abzubremsen (Paschotta, RP-Energie-Lexikon, 2019).

Die gespeicherte Energie hängt dabei von der Masse selbst und deren Drehzahl ab. Es ist also sinnvoll, eine möglichst hohe Drehzahl zu ermöglichen. Allerdings limitieren die Materialeigenschaften die Energiedichte, da die durch die Rotation auftretenden Zentrifugalkräfte bei falscher Betriebsführung die Belastungsgrenze der Schwunghmasse übersteigen und diese so zerstören könnten (Schmiegel, 2019, S. 61-66).

Vorteile dieser Technologie sind das schnelle Ansprechverhalten, die hohe Leistungsdichte sowie die Langlebigkeit. Der Wirkungsgrad ist ebenfalls mit ca. 80 % als Vorteil zu bewerten. Nachteile zeigen sich jedoch bei der Energiedichte, den Kosten und der Selbstentladung, wenn die Energie erst zeitversetzt wieder entnommen wird. Daher eignen sich Flywheels besonders

zur Netzstabilisierung. Durch ihr schnelles Ansprechverhalten und ihre hohe Leistungsdichte eignen sie sich sehr gut, um kurzfristige Schwankungen im Netz aufzufangen.

2.2.4 Wasserstoff

Wasserstoff zählt zu den Power-to-Gas-Speichern. Dabei handelt es sich zunächst um einen Elektrolyseur, welcher überschüssigen Strom dazu nutzt, Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu trennen. Der Wasserstoff lässt sich entweder in Tanks speichern und später durch eine Brennstoffzelle zurück in Strom und Wärme umwandeln oder in großtechnischen Prozessen mit CO₂ zu Methan synthetisieren. Dieser Prozess eignet sich vor allem als saisonaler Speicher und wird für die zukünftige zuverlässige Versorgung des Verbundnetzes thematisiert. Denn mit Methan kann das bestehende Erdgasnetz verwendet werden und so der Ausbau neuer Infrastruktur reduziert werden (Schmiegel, 2019, S. 223-226).

Die Effizienz dieses Systems hängt dabei insbesondere von der Verwendung ab. Während dieses System durch Nutzung von Strom und Wärme einen Wirkungsgrad von etwa 90 % aufweist, beläuft sich der Wirkungsgrad bei alleiniger Nutzung von Strom auf lediglich 18-19 % (Umwelt Arena Schweiz, 2015, S. 2).

2.2.5 Power to Heat

Bei Power to Heat (PtH) wird überschüssiger Strom direkt durch z.B. einen Tauchsieder oder mittels Wärmepumpe in thermische Energie umgewandelt. Dies kann beispielweise durch einfache Elektroheizstäbe oder einen Boiler realisiert werden. Zur Steigerung der Flexibilität ist dabei ein Wärmespeicher notwendig, bei dem es sich im einfachen Fall um einen Warmwasserspeicher handelt (Paschotta, 2019).

Die Umwandlung von überschüssiger erneuerbarer Energie in Wärme hätte eine Entlastung des Wärmesektors zur Folge, welcher derzeit mit einem Beitrag von 14,2 % erneuerbarer Wärme (BMW, 2019, S. 8) noch viel Potential bietet, um die angestrebte Dekarbonisierung voranzutreiben. Betriebswirtschaftliche Relevanz ergibt sich jedoch erst dann, wenn der Preis für den Strom pro Kilowattstunde geringer oder gleich dem von fossilen Energieträgern bei gleicher Energiemenge ist.

Die Überlegung elektrische Energie in thermische umzuwandeln, ist traditionell nicht die am ehesten bevorzugte Methode. Mit einem zunehmenden Anteil an fluktuierender

Stromerzeugung, der Sektorenkopplung und der Tatsache, dass sich Wärme mit verhältnismäßig niedrigem technischen und finanziellen Aufwand speichern lässt, wird diesem Prinzip wieder Aufmerksamkeit geschenkt (Andreas Bloess, 2018, S. 1612).

3 Beschreibung Campingplatz

Wie bereits in Kapitel 1.3 erwähnt, wird sich diese Arbeit dem Campingplatz Stieglitz widmen. Im Laufe der nächsten Jahre stehen einige strukturelle Änderungen an und auch die teilweise Erneuerung bestehender Infrastruktur und Gebäude steht zur Diskussion (mündliche Aussage des Betreibers). Im Zuge dessen besteht die Möglichkeit, sich auf die in Zukunft steigenden Energiepreise und Umweltproblematiken vorzubereiten und damit verbundene Herausforderungen frühzeitig in anstehenden Konzeptentwicklungen zu berücksichtigen.

3.1 Geographische Lage

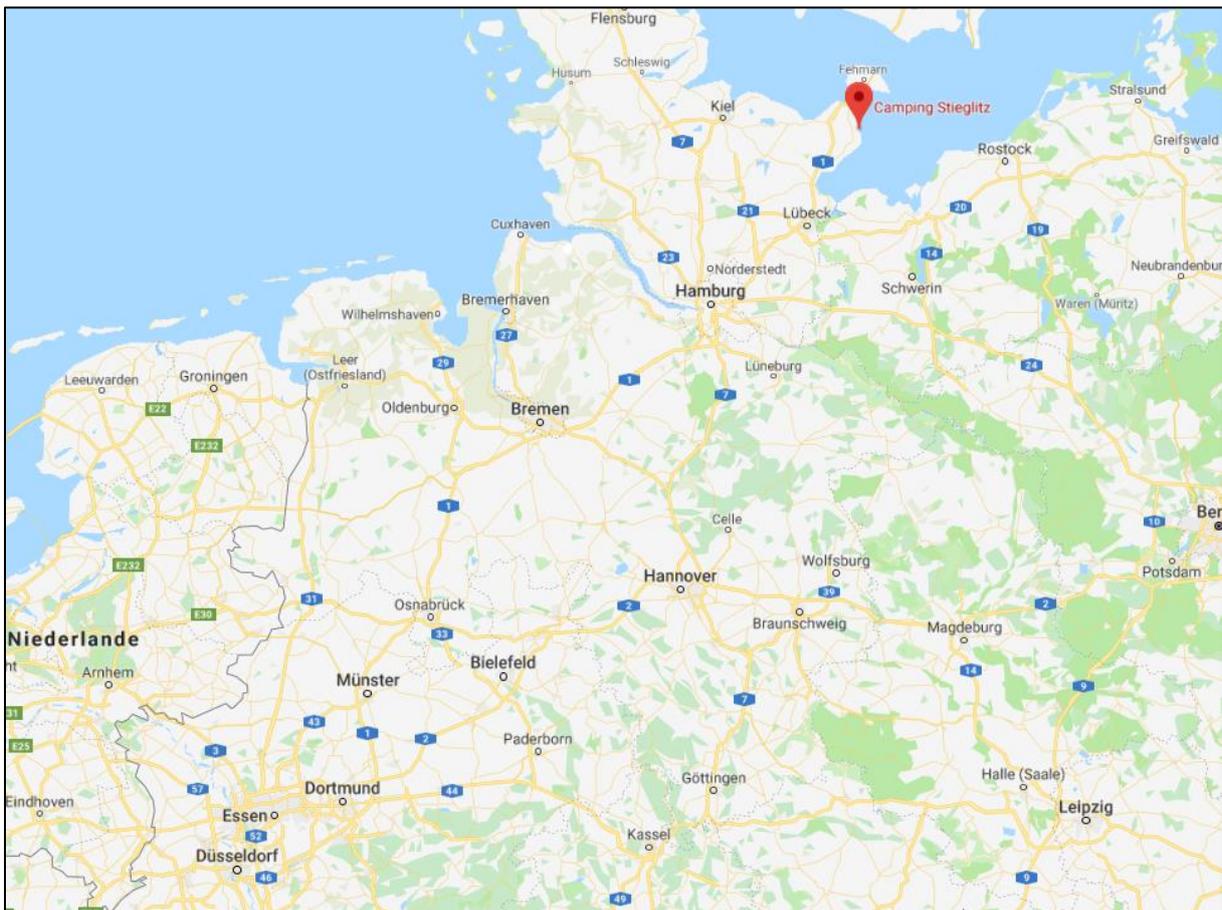


Abbildung 3-1: Geographische Lage Campingplatz Stieglitz
Quelle: (Google, 2019)

Der Campingplatz liegt in Schleswig-Holstein genauer gesagt in Dahme auf dem 54sten Breitengrad in unmittelbarer Nähe zur Ostsee direkt hinter dem Deich. Das Gelände ist eben und bloß der Deich bildet eine leichte Erhebung in der Umgebung. Das Gelände des Campingplatzes wird im Osten durch eine Straße und Westen durch den Oldenburger Graben (bei dem es sich um ein fast stehendes Gewässer handelt) begrenzt. Auf dem Weg in Richtung

Beschreibung Campingplatz

des Oldenburger Grabens liegen zwei große Freiflächen, welche derzeit gelegentlich als Grillplatz oder Weide für Schafe genutzt werden. Eine dauerhafte Nutzung dieser Flächen liegt aktuell besteht aktuell nicht. An die Freiflächen grenzt ein kleines Waldstück. Zur Wasserseite hin wird das Gelände durch eine direkt vor dem Deich verlaufende Straße begrenzt, welche als Zufahrtsstraße für Gäste des Campingplatzes und die hinter dem Campingplatz liegende Feriensiedlung dient.

3.2 Lageplanbeschreibung

Der Campingplatz Stieglitz bietet für jede Art des Campings Stellplätze an. Eine Darstellung des Lageplans befindet sich in Abbildung 3-3. Insgesamt stehen auf dem Platz 250 Wohnwagen von Dauercampnern und 50 Mobilheime. Für Touristencamper stehen etwa 180 Plätze zur Verfügung welche nach Angaben des Campingplatzes im Sommer meist zu über 90 % ausgebucht sind.

Der Freiburger Platz, im unteren Teil des Lageplans dargestellt, bietet neben einigen Touristikstellplätzen vor allem die Möglichkeit, Mobilheime dauerhaft zu platzieren. Die Mobilheime können dauerhaft bewohnt werden oder als Ferienhaus Verwendung finden. Derzeit wird jedoch nur eines der Mobilheime als Hauptwohnsitz verwendet. Der Trend geht demnach zur Verwendung als Ferienhaus. Ebenfalls sind einige der Mobilheimstellplätze mit fest installierten Mobilheimen ausgestattet, welche Eigentum des Campingplatzes sind und zur Vermietung bereitstehen. Gäste können diese tage- bzw. wochenweise mieten und hier ihren Urlaub verbringen. Abbildung 3-2 zeigt beispielhaft einige der Mobilheime auf dem Gelände des Campingplatzes



Abbildung 3-2: Mobilheime auf dem Campingplatz Stieglitz

Beschreibung Campingplatz

Die in braun gekennzeichneten Plätze (Abbildung 3-3) stehen Dauercampnern zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um Gäste, die ihren Wohnwagen dauerhaft auf dem Gelände des Campingplatzes platzieren, und sich jederzeit während der Betriebszeiten des Campingplatzes dort aufhalten können. Gegen eine jährliche Gebühr lässt sich ein solcher Platz mieten. Meist werden diese Stellplätze lediglich während des Urlaubs und an Wochenenden tatsächlich genutzt und stehen demnach einen Teil des Jahres leer. Die grün markierten Flächen stehen Touristkcampnern zur Verfügung. Diese können mit Wohnwagen, Wohnmobil oder aber auch mit Zelt anreisen und sich für die Zeit des Aufenthaltes dort niederlassen.

Auf dem Gelände befinden sich zwei Sanitärhäuser. Toiletten, Duschen sowie Waschmaschinen und Spülen stehen dort zur Nutzung bereit. Ebenfalls Eine Ver- und Entsorgungsanlage für Wohnmobile befindet sich im Außenbereich des ersten Sanitärhauses. An die Rezeption schließt sich einer kleiner Markt für den täglichen Bedarf der Gäste an sowie eine Werkstatt für anfallende Reparaturen. Die Gäste des Campingplatzes haben die Möglichkeit, Strom aus dem Netz des Campingplatzes zu beziehen. Gas zum Kochen oder Heizen hingegen wird nicht zentral bereitgestellt und muss bei Bedarf eingekauft werden.

Die Stromversorgung wird derzeit durch einen Ökostromanbieter über das Verbundnetz bereitgestellt. Während sich viele Gäste selbst mit Wärmeenergie versorgen, indem sie sowohl mit Gas heizen als auch kochen, wird in einigen Mobilheimen sowohl die Heizung als auch das Kochen mittels elektrischer Energie betrieben.

Beschreibung Campingplatz



Abbildung 3-3: Lageplan Campingplatz Stieglitz
 Quelle: (Camping Stieglitz, 2019)

3.3 Klimadaten

Die Klimadaten werden von der METEOSAT-Satelliten vom PVGIS (Photovoltaisch-Geographischen Informationssystem) verwendet (European Commission, 2017). Diese Daten beruhen auf Satellitenmessungen und Berechnungen, in welchen Wolkenalbedo und Absorption der Atmosphäre berücksichtigt werden. Es werden stündlich Bilder gemacht und analysiert. Die Auflösung der Bilder beträgt im Nadir (direkt unter dem Satelliten) etwa 4 km. Die Daten werden einem typischen meteorologischen Jahr entnommen. Dabei handelt es sich für jeden Monat um den repräsentativsten Monat aus 10 Messjahren und damit um keine gemittelten Werte. Dies ermöglicht eine realistische Analyse von Energieerträgen auf stündlicher Basis, da Schwankungen wie sie über das Jahr normal auftreten abgebildet und nicht durch Bildung von Mittelwerten geglättet werden (PVGIS, 2017).

Das Klima in Dahme ist warm und gemäßigt. Wie in Tabelle 1 dargestellt, zeichnet sich das Klima durch deutliche Unterschiede der Temperatur und Globalstrahlung im Sommer und Winter aus. Der Wind bläst das ganze Jahr über, jedoch etwas stärker in der kalten Jahreszeit.

Tabelle 1: Klima Dahme

Monat	Mittlere Temperatur °C	Mittlere Windgeschwindigkeit (m/s)	Mittlere Globalstrahlung (W/m ²)
Jan	3,1	7,5	23,2
Feb	1,3	5,5	39,8
Mrz	4,7	6,4	104,5
Apr	8,8	5,8	172,2
Mai	12,4	5,5	222,5
Jun	15,1	5,7	224,5
Jul	19,8	5,6	246,9
Aug	17,2	5,3	146,3
Sep	13,9	6,7	117,8
Okt	10,9	6,4	58,1
Nov	8,7	6,5	21,2
Dez	1,1	5,3	13,2

Wie in Abbildung 3-4 ersichtlich, spielen die Jahreszeiten für die Stromerzeugung aus EE eine zentrale Rolle. Dies ist besonders in Bezug auf die Globalstrahlung, welche als Energiequelle für die Photovoltaik dient, der Fall. Es zeigt sich deutlich, dass die Einstrahlung im Sommer im Vergleich zu den Wintermonaten um ein Vielfaches höher ist. Die klimatisch- und wetterbedingten Schwankungen stellen dabei eine zentrale Herausforderung an die

Beschreibung Campingplatz

Versorgung mit erneuerbarer Energie dar, da die Stromproduktion denselben Schwankungen unterliegt. Auf diese Problematik wird in der folgenden Konzepterstellung näher eingegangen.

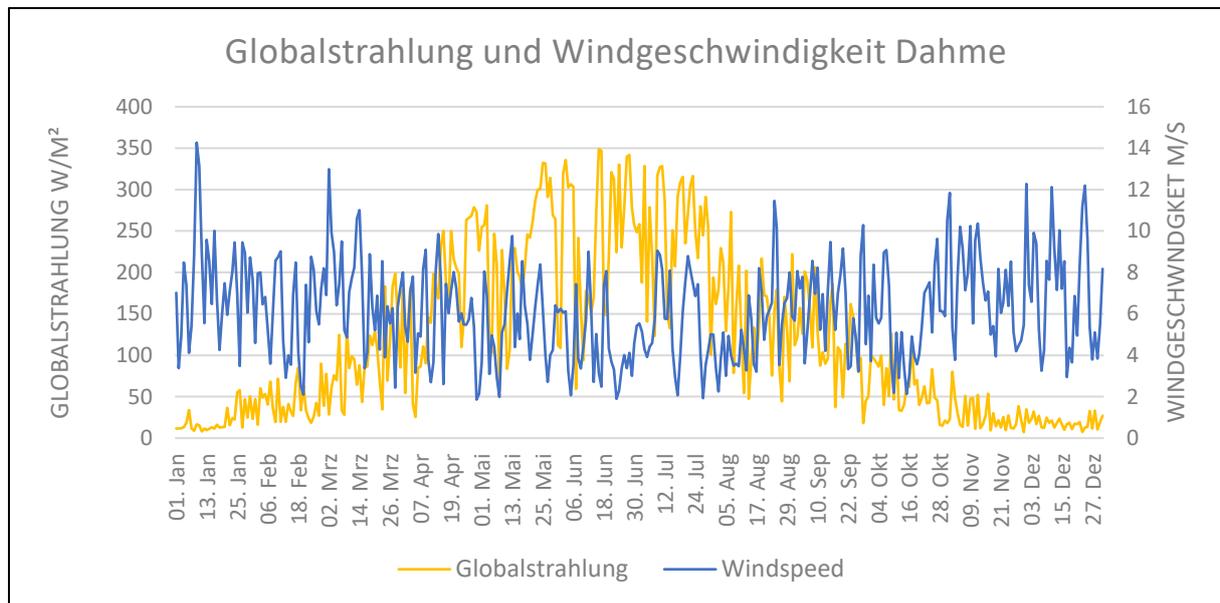


Abbildung 3-4 Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung im Jahresverlauf

3.4 Lastprofil

Bei Energiesystemen spielt die zeitliche Dimension, also die zeitliche Übereinstimmung von Erzeugung und Verbrauch eine entscheidende Rolle. Strom der erzeugt wird, muss zeitgleich verbraucht werden. Andersherum muss Strom auch erzeugt werden, wenn er gerade benötigt wird. In Bezug auf EE lässt sich ein System umso „einfacher“ autark realisieren, je genauer Verbrauch und Dargebot erneuerbarer Energie übereinstimmen.

Das Lastprofil stellt dabei den Verbrauch über die Zeitperiode eines Jahres dar. Dieses wird in 15-minütigen Schritten aufgezeichnet und gibt für jede Viertelstunde eine verbrauchte Strommenge an. In Abbildung 3-5 ist das jährliche Lastprofil des Campingplatzes dargestellt. Dabei wird ersichtlich, dass der Verbrauch besonders in den Monaten von April bis Mitte September höher ist als in den Wintermonaten bzw. in der Periode von Oktober bis März.

Das Lastprofil zeigt einige Charakteristika, welche direkt mit der Auslastung des Campingplatzes bzw. der Anzahl der Gäste zusammenhängt. Z.B. wirft der große Peak Ende März, welcher einen sehr hohen Stromverbrauch darstellt zunächst die Frage auf, welche Besonderheit diesen Peak hervorruft. Dabei stellt sich beim Abgleich der Daten mit dem Kalender des Jahres 2018 heraus, dass es sich um das Osterwochenende handelt, welches

Beschreibung Campingplatz

offensichtlich viele Urlauber dazu veranlasst, die freie Zeit in Dahme zu verbringen. Der Zusammenhang zwischen Feiertagen und einer hohen Auslastung des Campingplatzes wird ebenfalls an den 3 Peaks im Mai deutlich. Der Peak Anfang Mai resultiert mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den verlängerten Wochenende mit Brückentag durch den „Tag der Arbeit“ am ersten Mai. Ebenfalls das Wochenende über Christi Himmelfahrt (10.05.2018) und das Pfingstwochenende (19.05-21-05.2018) sorgen für einen verhältnismäßig hohen Verbrauch. Auch die Sommerferien von Anfang Juli bis Mitte August in Norddeutschland sorgen für einen hohen Stromverbrauch.

Eine weitere Charakteristik, welche das Profil aufweist, sind kleine Peaks in relativ kurzen Abständen. Gleicht man diese Peaks mit dem Kalender aus 2018 ab, so fällt auf, dass diese Spitzen meist an Wochenenden auftreten. Auch dieser Zusammenhang lässt sich durch eine höhere Auslastung erklären. Der Betrieb für Touristikcamper wird bis Ende Oktober am Laufen gehalten. Jedoch können sich Dauercamper und Mobilheimbesitzer weiter dort aufhalten.

Der Verbrauch von Oktober bis März ist bedeutend geringer als in der Sommerzeit. In den Weihnachtsferien öffnet der Campingplatz seinen Betrieb für Tourismuscamper wieder was sich deutlich im Verbrauch widerspiegelt. Die Dauerhafte Last von Oktober bis Dezember beträgt knapp 200 kWh pro Tag und ist in dieser Zeit am geringsten.

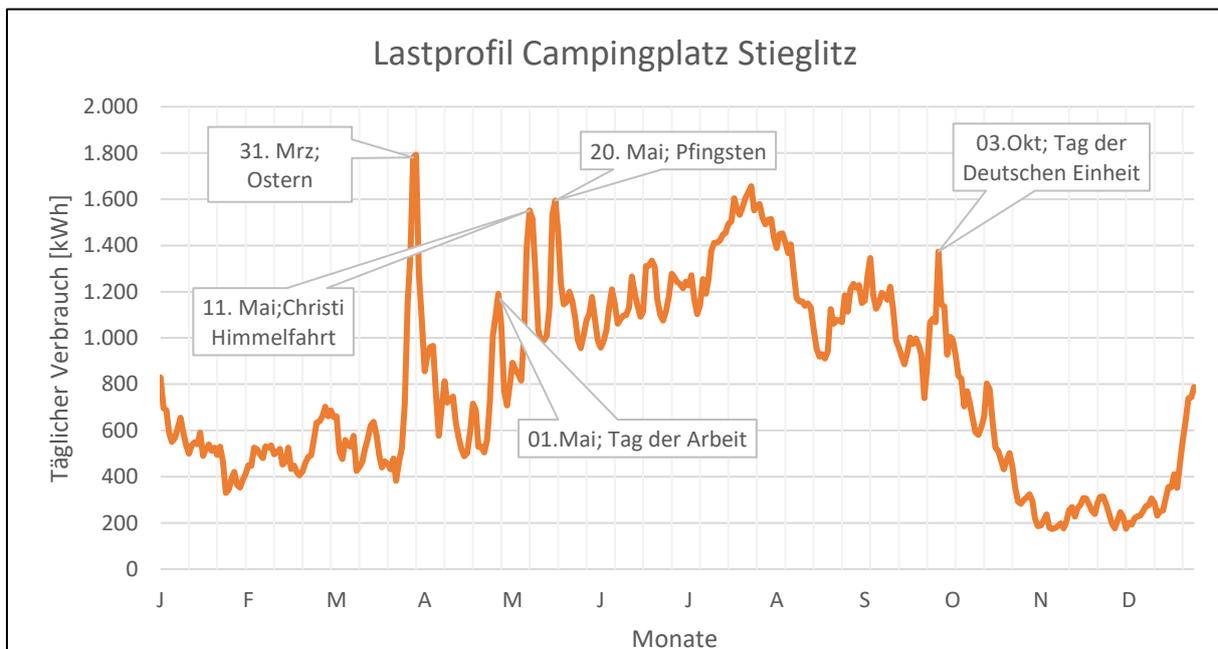


Abbildung 3-5: Lastprofil Campingplatz Stieglitz

An dieser Stelle lässt sich bereits mutmaßen, dass besonders die großen Peaks Ansprüche an ein autarkes System stellen, da sie, um komplett gedeckt zu werden, eine große Menge direkt erzeugte Leistung oder eine große bereits gespeicherte Energiemenge voraussetzen.

Anhand des Lastprofils lassen sich weitere Schlussfolgerungen ziehen. Schaut man sich z.B. das Lastprofil im gemittelten Tagesverlauf an, lassen sich Empfehlungen für eine optimale Ausrichtung der PV-Module ableiten. Zeigt das Profil beispielweise eine Lastspitze zur Mittagszeit, so wäre eine Ausrichtung der PV-Module in Richtung Süden empfehlenswert. Ist der Verbrauch tendenziell morgens höher als am Abend oder umgekehrt, so würde eine etwas östlichere bzw. westlichere Ausrichtung naheliegen (Martin Fürnschuß, 2018, S. 10).

Das saisonale Profil, stellt hingegen andere Ansprüche an Energiesysteme. Da der Verbrauch z.B. bei Haushalten im Winter üblicherweise höher ist als im Sommer, die Erzeugung durch PV in nördlichen Breitengraden jedoch ihre niedrigsten Erträge generiert, müsste dies, um ein autarkes System zu gewährleisten mit anderen Erzeugungstechnologien wie z.B. Wind oder durch große Saisonale Speicher wie z.B. Wasserstoff kompensiert werden.

3.5 Energieeffizienzmaßnahmen

Trotz der Energiebereitstellung aus erneuerbaren Energien ist jede Kilowattstunde, die gar nicht erst benötigt wird, nach wie vor die Beste. Dabei bietet die Steigerung der Energieeffizienz und somit die Stromeinsparung Potential für einen nachhaltigeren Umgang mit Energie. Auch die deutsche Bundesregierung hat sich bis 2020 eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs, der mit einer Verbesserung der Effizienz zusammenhängt, um 20 % gegenüber 2008 als Ziel gesetzt. Bis zum Jahr 2050 soll die Reduzierung sogar 50 % gegenüber 2008 betragen (BMW, 2010, S. 5).

3.5.1 Strom

In diesem Kontext soll die Nutzeffizienz verbessert werden. Diese kann hinsichtlich zweier Gesichtspunkte verbessert werden: Durch die Reduktion von Wandlungsverlusten oder durch die Verwendung gegebener Umweltenergie. Im Falle der Umweltenergie handelt es sich um Energie, welche naturgegeben ist, wie z.B. die Nutzung von natürlichem Licht anstatt künstlicher Beleuchtung. Die Wandlungsverluste beziehen sich dabei auf die Effizienz der Umwandlung von Endenergie (Strom) in eine Energiedienstleistung. Im Falle der Beleuchtung

Beschreibung Campingplatz

lassen sich Glühlampen mit einem Wirkungsgrad von etwa 5 % durch neueste LED-Technologie ersetzen und es können so wesentlich höhere Wirkungsgrade erzielt werden (Günther, 2015, S. 47).

Das Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen (BNB) zur Beurteilung der Nachhaltigkeit von Gebäuden und Außenanlagen bewertet unter anderem die Beleuchtung. Energieeffiziente Leuchtmittel und eine dem Nutzen angepasste Steuerung durch z.B. Bewegungsmelder oder Licht-Sensorik zur Abschaltung des Lichts bei ausreichendem Tageslicht sind dabei Voraussetzungen für eine als nachhaltig eingestufte Beleuchtung (Bundesministerium für Umwelt, 2008).

Die Steigerung der Effizienz beinhaltet auch das einfache Sparen und einen bewussteren Umgang mit Energie. Häufig können bereits einfache Hinweise und Erläuterungen dabei helfen, den Energieverbrauch zu senken (Viktor Wesselak T. S., 2009, S. 34). Z.B. bei Dauercampern und in den Mobilheimen sollten alle Geräte, die nicht benötigt werden, ganz ausgeschaltet werden, sodass diese auch nicht im Standby-Betrieb laufen. Dieses gilt besonders nachts und für die gesamte Zeit in denen die Behausung leer steht.

3.5.2 Wärme

Wie Abbildung 3-6 zeigt, ist der Wärmeanteil am gesamten Energieverbrauch in privaten Haushalten mit Abstand am größten. Überschüssigen Strom in Wärme umzuwandeln, wie bei Power to Heat, würde im Falle des Campingplatzes den Gasverbrauch reduzieren. Wärme wird auf dem Campingplatz jedoch überwiegend dezentral benötigt, da kein Wärmenetz zur Versorgung der einzelnen Parzellen vorhanden ist. Durch die steigenden Bezugskosten von Öl und Gas bei gleichzeitigem Preisverfall für Stromgestehungskosten erneuerbarer Energien ist die Heizung mit PV-Strom auch aus wirtschaftlicher Betrachtung zu berücksichtigen. Ebenfalls verbindet sie die beiden Sektoren Wärme und Strom was das Energiesystem flexibler macht. (Tjarko Tjaden, 2013, S. 94)

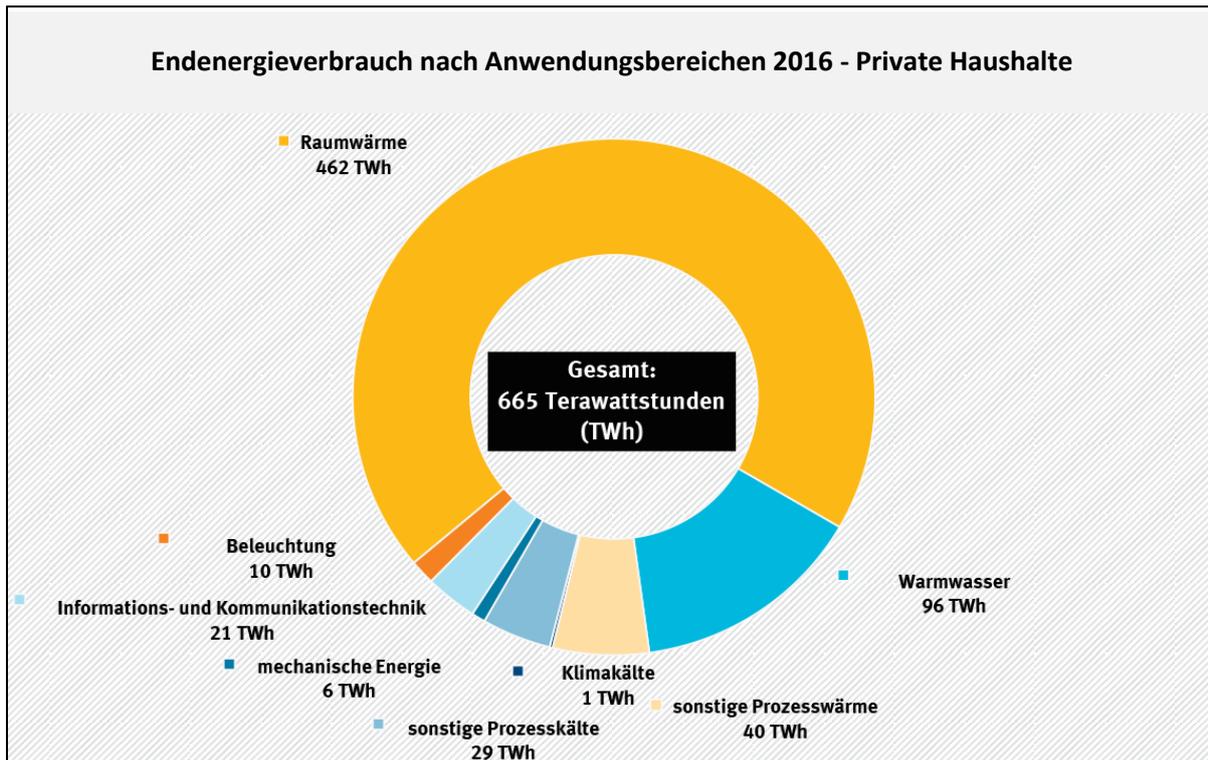


Abbildung 3-6: Energieverbrauch nach Anwendungsbereich
 Quelle: (AGEB, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2018)

Nach der Raumwärme nimmt die Warmwassererzeugung den zweiten Platz des Gesamtenergiebedarfs privater Haushalte ein. Das Duschen nimmt davon einen großen Teil des Wärmebedarfs in Anspruch. In diesem Konzept sollte zunächst ein Fokus auf die beiden Sanitärhäuser gelegt werden, da dort durch das Duschen viel Wärme benötigt wird. Die Wärme ließe sich durch überschüssigen Strom bereitstellen und in einem Warmwasserspeicher in den Sanitärhäusern speichern. Um zusätzlich Energie einzusparen, sollte über den Einbau einer Wärmerückgewinnung des Duschwassers nachgedacht werden. Hierzu eine Beispielrechnung:

Nehmen wir einmal an, dass der Campingplatz mit durchschnittlich 250 Touristikcampern belegt ist, welche sich einmal täglich in den Sanitärhäusern duschen und jeder der Gäste benötigt etwa 5 Minuten für seine tägliche Dusche. Angenommen es wird ein sparsamer Duschkopf mit einem Wasserverbrauch von etwa 8 L/min verwendet, es wird bei einer Temperatur von ca. 40°C geduscht und das Wasser muss von 15°C auf diese Temperatur erwärmt werden, so ergibt sich folgender Wärmebedarf pro Tag:

Beschreibung Campingplatz

$$250 \text{ Duschvorgänge} * 5 \text{ min} * 8 \text{ L/min} * 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{K}} * 25^\circ\text{K} = 1050.000 \text{ kJ}$$
$$= 291 \text{ kWh/Tag}$$

$$30,5 \text{ Tage im Monat} * 7 \text{ Monate} * \frac{291 \text{ kWh}}{\text{Tag}} = 62.128 \text{ kWh}$$

Die Kosten belaufen sich dabei auf etwa 6,4 Cent/kWh (siehe Kapitel 4.2.2). Dies ergibt Gesamtkosten von:

$$62.128 * 6,4 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}} = 3.976,22 \text{ €}.$$

Eine Duschwärmerückgewinnung würde laut Hersteller bis zu 43 % der Wärme zurückgewinnen (ÖKO-Energie & Oberholz, 2019). Dabei wird die Energie des Abwassers über einen Wärmetauscher dem kalten zufließenden Wasser übertragen.

Angenommen die Dusche gewinnt im Realbetrieb die angegebenen 43 % der Wärme zurück, so würden jährlich $62.128 * 43 \% = 26.715$ kWh Gas eingespart werden. Dies entspricht nicht nur Kosten von derzeitig etwa 1.700 €/Jahr, sondern spart (bei angenommenen 2 kg entstehendem CO₂/m³ Erdgas (Nischwitz, 2016)) auch 5.332 kg CO₂. Dies ist vergleichbar mit der durchschnittlichen Fahrleistung eines VW Golfs von 23.000 km¹.

Die Kosten für die Anschaffung eines Duschwassersammlers (Duschwasserrückgewinnung für Gemeinschaftsduschen) liegt bei etwa 2.500 € zuzüglich der Kosten für die Installation. Eine nachträgliche Installation könnte teuer sein. Da die Sanitätshäuser jedoch neu gebaut werden sollen, liegt es nahe, bereits bei der Planung diese Technologie zu berücksichtigen.

¹ laut Rechner des IWR (Internationales Wirtschaftsforum Regenerative Energien)

4 Methodischer Ansatz

In diesem Kapitel wird zunächst eine Auswahl der Technologien getroffen, auf Basis derer das Modell den Autarkiegrad in Abhängigkeit von wirtschaftlichen Faktoren errechnet. Die Kosten, welche bei der Wirtschaftlichkeitsberechnung angenommen werden, werden erörtert und bewertet. Im Anschluss wird die Herangehensweise in Form einer Modellbeschreibung dargelegt und erläutert.

4.1 Auswahl geeigneter Technologien

Bei der Betrachtung des in Kapitel 3 beschriebenen Campingplatzes sollte ein Blick auf das Angebot erneuerbarer Energien geworfen werden. Die Menge der vorhandenen Energie durch Wind, Wasser oder solare Einstrahlung spielt eine dominierende Rolle bei der Entwicklung eines wirtschaftlichen Konzeptes. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile verschiedener Technologien abgewogen, um die für diesen Standort am besten geeignete/n Technologie/n zu wählen.

Wasserkraft:

Auch wenn Wasserkraft einen bedeutenden Teil der weltweiten Stromversorgung darstellt und als Laufwasserkraftwerk eine zuverlässige Grundlast bereitstellt (Georg Flegel, 2016, S. 321), so bietet sich bei dem Campingplatz keine Möglichkeit, diese zu nutzen, da sich kein fließendes Gewässer in der Nähe befindet. Für das Modell wird Wasserkraft demnach nicht weiter berücksichtigt. An Standorten mit fließenden Gewässern sollte diese Energiequelle jedoch in Konzepten u.U. Berücksichtigung finden.

Windkraft:

Dank der Strategien für nachhaltige Energieentwicklung von Neubauten zeigt sich auch größer werdendes wissenschaftliches Interesse an Kleinwindkraft (L.Battisti, 2018, S. 102). Da sich der Campingplatz direkt am Meer befindet und somit eine tendenziell günstige Lage mit ausreichend Wind einnimmt, erscheint die Nutzung einer Windkraftanlage zunächst nach eine sinnvolle Möglichkeit.

Windkraftanlagen haben jedoch im großen wie auch im kleinen Maßstab den Nachteil, dass sie Lärm, Vibrationen und optische Beeinträchtigungen durch z.B. Verschattung verursachen (Shubham Deshmukh, 2018, S. 633). Um dem entgegen zu wirken, gibt es beispielweise

vertikal rotierende Windräder. Durch die vertikale Rotationsbewegung, bewegt sich jedoch immer ein Flügel entgegen der Windrichtung, was dazu führt, dass die Effektivität im Vergleich zur horizontalen Rotationsachse geschmälert wird und so weniger Ertrag bei gleicher installierter Maximalleistung generiert wird. Da es sich bei dem Campingplatz um einen Erholungsort handelt, bei dem jegliche Schallemission zu vermeiden ist, bietet sich eine Windkraftanlage auf dem Gelände in unmittelbarer Nähe zum Aufenthaltsort der Gäste nicht an.

Biomasse:

Biomasse hat den entscheidenden Vorteil, nicht dargebotsabhängig zu sein. Jedoch müssen große Flächen für den Anbau von Energiepflanzen zur Verfügung stehen. Am Campingplatz Stieglitz sind diese jedoch nicht vorhanden. Ebenfalls birgt diese Technologie die Gefahr, dass durch Leckagen in der Biogasanlage Gase und somit Gerüche freigesetzt werden können, die das Wohlbefinden der Gäste beeinflussen könnten und somit den Betrieb des Campingplatzes beeinträchtigen.

Außerdem wäre die Auslastung einer Biogasanlage für den Campingplatz unzureichend. Würde man die gesamte elektrische Energie aus einer Biogasanlage beziehen, so wäre eine elektrische Leistung von der maximalen Last im Jahr anzunehmen. Diese liegt bei 112 kW. Eine Biogasanlage mit 112 kW elektrischer Leistung würde dann bei einem Verbrauch von 294.000 kWh/a auf eine Vollaststundenanzahl von nur 2.625 kommen. Betrachtet man zudem nur den Strom als Produkt, so stellt sich die PV, im Vergleich auf die flächenbezogene Energieausbeute, um 25-60 mal effizienter dar (Günther, 2015, S. 169). Aus diesen Gründen erfährt die Biomasse in dem folgenden Konzept keine Berücksichtigung.

Photovoltaik:

Neben dem Nachteil der starken Abhängigkeit von solarer Einstrahlung bietet die Photovoltaik einige Vorteile. Photovoltaik produziert weder Geräusche noch Gerüche, ist relativ wartungsarm, zeichnet sich durch eine lange Lebensdauer aus und ist verhältnismäßig kostengünstig. Vergleich man den in Abbildung 4-1 dargestellten Verlauf von Lastprofil (braun) und dem der Globalstrahlung (gelb), so zeigt sich von März bis September ein ähnlicher Verlauf. Lediglich der Verbrauch im Winter und besonders in den Weihnachtsferien kongruiert nicht mit dem Verlauf der solaren Strahlung. Der Vergleich der beiden Verläufe zeigt, dass zur

Stromversorgung des Campingplatzes Photovoltaik einen wesentlichen Beitrag leisten kann, ohne dabei große saisonale Speicher zu benötigen.

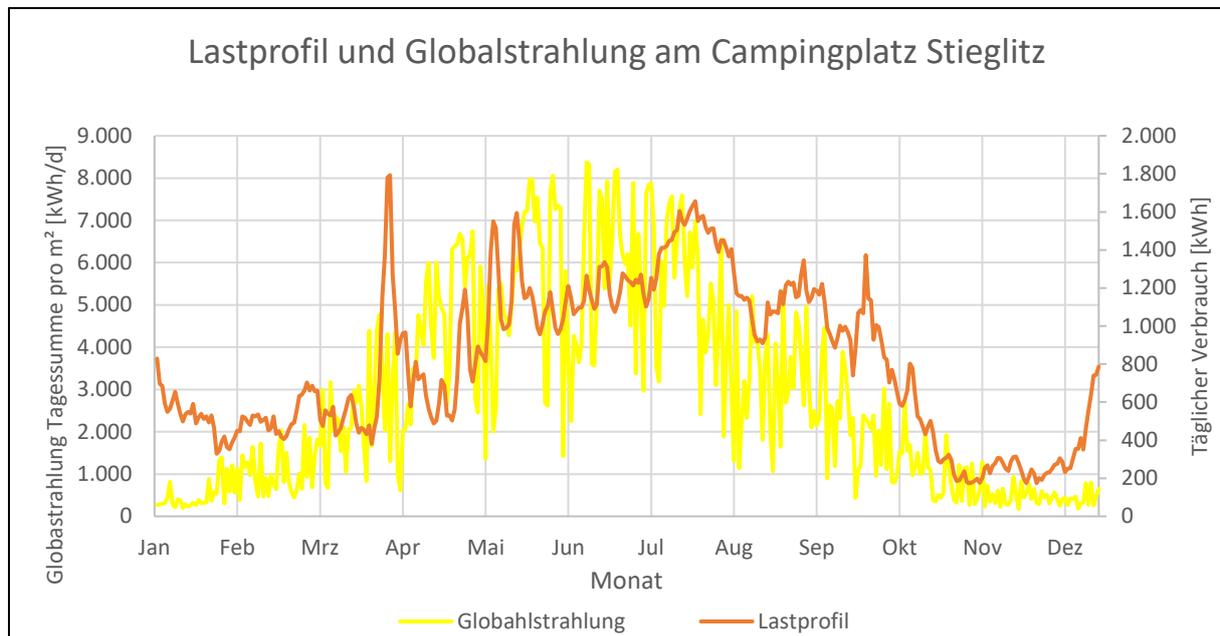


Abbildung 4-1: Lastprofil und Globalstrahlung im Jahresverlauf

Im Vergleich zu den anderen Technologien lässt sich feststellen, dass sich Photovoltaik für den Campingplatz sehr gut eignet und findet somit in der Konzepterstellung Berücksichtigung.

Energiespeicher:

Wasserstoff hat durch seinen geringen Wirkungsgrad von 18-19 % (bei Strom zu Strom) einen großen Nachteil. Da die Wärme nicht ohne weiteres oder nur durch den Zubau neuer Infrastruktur auf dem Campingplatz verteilt werden kann, scheidet diese Technologie somit aus.

Da die Netzstabilität in dem energieautarken Konzept vorerst keine entscheidende Rolle spielt, wird das Flywheel, welches sich, wie bereits in Kapitel 2.2.3 erläutert, besonders zum Ausgleich kurzfristiger Schwankungen eignet, nicht weiter berücksichtigt. Ein möglicher wirtschaftlicher Anreiz könnte jedoch dadurch entstehen, hohe Lasten aus zu hoher Produktion zunächst in einem Flywheel zu speichern und so den Akku zu entlasten. Dies wird aufgrund des beschränkten Umfangs der Masterarbeit nicht näher betrachtet.

Für den Fall, dass Redox-Flow-Batterien in Zukunft mit derselben technischen Zuverlässigkeit und zu vergleichbaren Kosten verfügbar sind, stellt diese Technologie eine vielversprechende

Option dar. Für das Modell werden jedoch die Kennzahlen eines Li-Ionen Akkumulators angenommen.

Bei der Frage der Speichermethode wird in dem folgenden Konzept zunächst ein Lithium-Ionen Akkumulator berücksichtigt, da es aktuell eine bewährte Technologie darstellt, die verhältnismäßig einfach in das bestehende Verteilnetz am Campingplatz integriert werden kann. In diesem Zuge kann auch das Elektromobil eine Rolle spielen. Zunächst können diese mit PV-Strom geladen werden. Durch zukünftige Weiterentwicklung dieser Technologie könnten Elektromobile evtl. auch bidirektional als zusätzlicher Speicher verwendet werden.

4.2 Kostenevaluierung

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über derzeitige Kosten, welche für die Wirtschaftlichkeitsberechnung herangezogen werden, gegeben. Diese beziehen sich auf den Stand 2019. Während bei konventionellen Energieträgern vor allem die Energieträger selbst einen großen Teil der Kostenbilanz tragen, steht die Energie aus Sonne, Wind und Wasserkraft kostenlos zur Verfügung. Die Kosten für EE werden daher von den Investitionskosten der Anlagen dominiert. Die laufenden Betriebskosten spielen im Verhältnis dazu eine kleinere Rolle. Diese entstehen hauptsächlich durch Wartung, Versicherung und Verschleiß und variieren je nach Technologie. (Synwoldt, 2016, S. 23)

4.2.1 Kosten für Errichtung und Betrieb der Anlage

Die anfallenden Kosten für den Betrieb und die Errichtung der Anlagen setzen sich aus folgenden Punkten zusammen:

- Investitionskosten: Anschaffungs- und Installationskosten
- Betriebskosten: Versicherung, Wartung und Verschleiß
- Finanzierungskosten: Zinsen und Laufzeit

Im Rahmen des Modells werden für PV-System und Batteriespeicher folgende Kosten angenommen:

- Für eine PV-Anlage ab 100-1.000 kWp liegen die Kosten bei rund 800-1.000 €/kW_{peak} (CHRISTOPH KOST, 2018, S. 10). Dies beinhaltet sowohl die Anschaffungs- als auch die

Installationskosten. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen werden $900 \text{ €/kW}_{\text{peak}}$ veranschlagt.

- Beim Akkumulator werden Anschaffungs- und Installationskosten von 675 €/kWh angenommen (pv magazine group GmbH & Co. KG, 2019).
- Für die Betriebskosten wird ein Wert von 2 % der Investitionskosten angenommen. Darin enthalten sind Kosten für anfallende Reinigungen, Reparaturarbeiten und Versicherungen (Wirth, 2019, S. 8).
- Weitere Kosten entstehen durch die EEG-Umlage. Diese wird zum Teil auf Eigenverbrauch des selbst produzierten Stromes für PV-Kraftwerke mit einer Leistung von über 10 kWp fällig. Derzeit beträgt diese ca. 2,7 Cent/kWh (Wirth, 2019, S. 9).
- Für die Finanzierungskosten wird ein Zinssatz von 2 % über eine Laufzeit von 20 Jahren angenommen. Diese werden im Kapitel 4.2.3 erläutert.

4.2.2 Energiekosten/-einnahmen

Für den Betrieb einer PV-Anlage, welche teilweise den eigenen Strombedarf deckt, setzen sich die anfallenden laufenden Kosten und Ersparnisse für den täglichen Strombedarf wie folgt zusammen:

Strompreis für netzbezogenen Strom:

Laufende Kosten entstehen in diesem System auch durch den Bezug von Strom aus dem Netz. Die Preise für eine Kilowattstunde Strom liegen bei derzeit etwa 30 Cent bei privaten Haushalten (Bundesnetzagentur, 2019). Da es sich bei dem Campingplatz um einen großen Verbraucher handelt, sind hier die Kosten etwas geringer. Nach Rücksprache mit dem Betreiber des Campingplatzes liegen diese bei ca. 26 Cent/kWh.

Einnahmen für Netzeinspeisung / Einspeisevergütung:

Strom, welcher weder verbraucht noch gespeichert werden kann, kann in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Dieser wird nach aktueller Gesetzgebung durch den Stromanbieter abgenommen und mit einem gesetzlich festgelegten Preis vergütet. Aktuell werden Anlagen mit weniger als 100 kWp mit ca. 7 Cent/kWh vergütet. Die Vergütung hierfür hat sich im Zeitverlauf stetig verringert und es ist nicht auszuschließen, dass sich die Vergütung

Methodischer Ansatz

in Zukunft weiter verringert, wenn sich der Trend der letzten Monate, wie in Tabelle 2 dargestellt, fortsetzt.

Für die Berechnung wird als Referenz der aktuelle Gaspreis von 6,4 Cent/kWh herangezogen (Preisvergleich.de, 2019), da es so keine Rolle spielt, ob zu viel produzierter Strom ins Netz gespeist oder in Wärme umgewandelt würde und so den Gasverbrauch verringert. Die Kosten sind also im Zeitverlauf variabel und wirken sich dementsprechend durch Steigerung positiv auf die Wirtschaftlichkeit aus. Fallen die Preise, würde dies die Wirtschaftlichkeit vermindern.

Tabelle 2: Vergütungssätze EEG für PV-Anlagen < 100 kW_{Peak}

Vergütungssätze EEG	
Inbetriebnahme	PV- Anlagen 10 bis 100 kWp
ab 01.01.2019	7,93
ab 01.02.2019	7,84
ab 01.03.2019	7,76
ab 01.04.2019	7,68
ab 01.05.2019	7,57
ab 01.06.2019	7,45
ab 01.07.2019	7,34
ab 01.08.2019	7,24
ab 01.09.2019	7,13
ab 01.10.2019	7,02

Quelle: (Bundesnetzagentur, 2019)

Ersparnis durch Eigenverbrauch:

Wird Strom aus eigener Erzeugung genutzt, so muss kein Strom aus dem Netz bezogen werden. Die Ersparnis pro selbst verbrauchter Kilowattstunde beträgt demnach den üblichen Strompreis abzüglich der Kosten, welche durch die EEG-Umlage auf Eigenverbrauch anfällt. In diesem Modell wird ein Strompreis von 26 Cent/kWh angenommen sowie 2,7 Cent/kWh für die EEG-Umlage. Daraus ergibt sich eine Ersparnis von 23,3 Cent/kWh.

4.2.3 Förderungen

Bei den Finanzierungskosten wird anhand der durchschnittlichen Abschreibungsdauer einer PV-Anlage von einer Laufzeit von 20 Jahren ausgegangen. Die Zinsen sind aktuell relativ niedrig, hängen jedoch stark von der Bonität des Kreditempfängers ab.

Die KfW-Bank beispielweise fördert die Investition in erneuerbare Energieanlagen und genehmigt zu diesem Zweck günstige Kredite. Dabei kann durch das KfW-Programm „erneuerbare Energien Standard“ ein Kredit für eine Laufzeit von 20 Jahren mit 3 tilgungsfreien Anlaufjahren und 10 Jahren Zinsbindung zu einem Zinssatz von 1,19 % gewährt werden (Bankengruppe, 2019). Vorausgesetzt ist dabei eine ausgezeichnete Bonität des Kreditnehmers. Da die Zinsen im Laufe der Jahre Schwankungen unterliegen, wird hier ein Wert von 2 % für die Wirtschaftlichkeitsberechnung angenommen.

Die Förderung für dezentrale Batteriespeicher der KfW-Bank lief Ende 2018 aus, weshalb der Speicher keine günstigen Förderkredite erhält (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, bmwi, 2019).

4.3 Kostenbewertung

Den Investitions-, Betriebs-, Strom- und Finanzierungskosten stehen Einnahmen durch die Netzeinspeisung und der Ersparnis durch Eigenverbrauch (weniger Netzbezug) gegenüber. Dabei wirken sich höhere Stromkosten, eine höhere Einspeisevergütung und ein höherer Eigenverbrauch positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage aus. Investitions-, Betriebs- und Finanzierungskosten tragen hingegen durch Reduzierung zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei (Johannes Weniger J. B., 2015, S. 40-47).

Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird in diesem Modell die Annuitätenmethode verwendet. Diese trifft im Gegensatz zur Barwertmethode keine einfache Aussage über die generelle Wirtschaftlichkeit einer Investition, vielmehr gibt diese Methode einen kontinuierlichen Vermögenszuwachs über einen festgelegten Zeitraum an. Die Formel lautet wie folgt:

$$\text{Annuitätenfaktor} = \frac{i * (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (4.1)$$

n = Nutzungsdauer in Jahren

i = gewählter Kalkulationszins

(Andreas Ratka, 2015, S. 386)

4.4 Modellierung des Energiesystems

Um zu verstehen und vorhersehen wie sich ein Energiesystem unter den beschriebenen Rahmenbedingungen verhält, wird mit Hilfe von Excel ein Modell entwickelt, welches ein Abbild der Realität wiedergibt. Dieses soll alle wesentlichen Parameter berücksichtigen und dabei so einfach wie möglich sein, um lange Rechenzeiten zu vermeiden.

4.4.1 Beschreibung des Modells

Grundsätzlich besteht ein solches System aus Energiequelle und Energiespeicher. Die Quelle sorgt für die Erzeugung von Energie, diese wird in einen Speicher geladen und dieser durch eine Last wieder entladen (Schmiegel, 2019, S. 14). Für die folgende Untersuchung wird für das Modell die bereits in Kapitel 4.1 getroffene Auswahl der Technologien angenommen. Die Energiequelle stellt demnach eine PV-Anlage dar, deren passende Größe es zu berechnen gilt. Die von der Anlage produzierte Energie wird als äquivalent zur Globalstrahlung angenommen, wobei ein technisch bedingter Wirkungsgrad von Globalstrahlung zu Strom von 16 % angenommen wird. Ebenfalls der Li-Ionen Akku soll durch das Modell skaliert werden. Auch bei diesem werden Verluste angenommen, welche sowohl beim Be- und Entladen als auch durch die Selbstentladung entstehen.

4.4.2 Regeln des Modells

Für das System gelten folgende Regeln (schematisch in Abbildung 4-2 dargestellt):

- 1) Wenn die Stromproduktion größer ist als der Verbrauch, so wird die überschüssige Energie zunächst gespeichert.
- 2) Wird mehr Energie produziert als verbraucht und der Speicher ist bereits vollgeladen, wird überschüssiger Strom in das Netz gespeist.
- 3) Wird zeitgleich weniger Strom produziert als verbraucht wird, wird zusätzliche Energie aus dem Speicher bezogen.
- 4) Wird zeitgleich weniger Strom produziert als verbraucht und die Speicher können keine Energie mehr bereitstellen, so wird Strom aus dem Netz bezogen.

5) Der Speicher kann nicht über das Stromnetz aufgeladen werden.

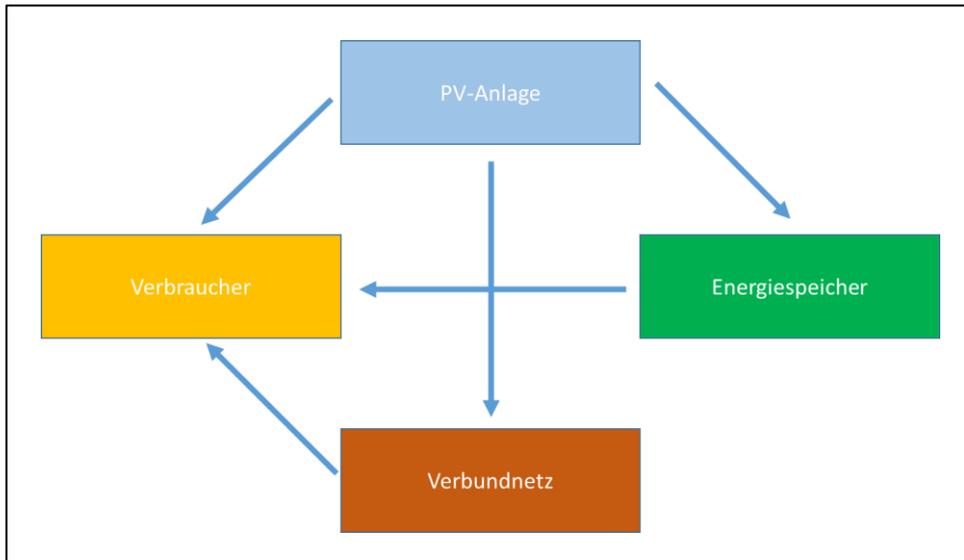


Abbildung 4-2: Vereinfachte Darstellung des Modells

4.4.3 Berechnungen im Modell

Das Modell berechnet zu jedem Zeitschritt (stündlich) eine produzierte Energiemenge anhand der Globalstrahlung und nutzt diese, um den Bedarf, welcher sich auf das in Kapitel 3.4 beschriebenen Lastprofil bezieht, zu decken. In der unten dargestellten Abbildung 4-3 ist ein Ausschnitt aus dem Registerdatenblatt „Verbrauch und Erzeugung“ zu sehen.

Methodischer Ansatz

Datengrundlage			PV-Ertrag				Speicher						Stromnetz	
Datum	Verbrauch stdl. [kWh]	Globalstrahlung stdl. [w/m ²]	Erzeugung stdl. [kWh]	Differenz (Erzeugung-Verbrauch)	Überschuss	Zusätzl. Bedarf	Speicherladung	Speicherladungsverlust	Speicherentnahme	Speicherentladung	Speicherstand [kWh]	Ladezustandsänderung	Netzeinspeisung	Netzbezug
28.06, 1:00	36,08	0	0,00	-36,08	0,00	-36,08	0,00	0,00	-36,08	-36,12	438,75	-38,84	0,00	0,00
28.06, 2:00	35,37	0	0,00	-35,37	0,00	-35,37	0,00	0,00	-35,37	-35,42	402,63	-36,12	0,00	0,00
28.06, 3:00	34,82	0	0,00	-34,82	0,00	-34,82	0,00	0,00	-34,82	-34,86	367,21	-35,42	0,00	0,00
28.06, 4:00	33,72	107	25,68	-8,04	0,00	-8,04	0,00	0,00	-8,04	-8,09	332,35	-34,86	0,00	0,00
28.06, 5:00	32,63	243	58,32	25,70	25,70	0,00	24,41	1,28	0,00	-0,05	324,27	-8,09	0,00	0,00
28.06, 6:00	41,22	402	96,48	55,26	55,26	0,00	52,50	2,76	0,00	-0,05	348,63	24,37	0,00	0,00
28.06, 7:00	44,19	538	129,12	84,93	84,93	0,00	80,68	4,25	0,00	-0,05	401,09	52,45	0,00	0,00
28.06, 8:00	63,23	667	160,08	96,86	96,86	0,00	92,01	4,84	0,00	-0,05	481,72	80,64	0,00	0,00
28.06, 9:00	64,19	774	185,76	121,58	121,58	0,00	115,50	6,08	0,00	-0,05	573,69	91,97	0,00	0,00
28.06, 10:00	54,47	841	201,84	147,38	147,38	0,00	40,76	2,15	0,00	-0,05	689,14	115,45	104,47	0,00
28.06, 11:00	46,85	868	208,32	161,48	161,48	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	40,71	161,43	0,00
28.06, 12:00	48,68	852	204,48	155,81	155,81	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	155,76	0,00
28.06, 13:00	46,05	790	189,60	143,55	143,55	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	143,50	0,00
28.06, 14:00	46,50	688	165,12	118,62	118,62	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	118,57	0,00
28.06, 15:00	46,49	563	135,12	88,64	88,64	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	88,59	0,00
28.06, 16:00	47,81	419	100,56	52,76	52,76	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	52,71	0,00
28.06, 17:00	50,19	277	66,48	16,29	16,29	0,00	0,05	0,00	0,00	-0,05	729,85	0,00	16,24	0,00
28.06, 18:00	54,72	142	34,08	-20,64	0,00	-20,64	0,00	0,00	-20,64	-20,69	729,85	0,00	0,00	0,00
28.06, 19:00	51,75	29	6,96	-44,79	0,00	-44,79	0,00	0,00	-44,79	-44,84	709,17	-20,69	0,00	0,00
28.06, 20:00	48,63	0	0,00	-48,63	0,00	-48,63	0,00	0,00	-48,63	-48,68	664,33	-44,84	0,00	0,00
28.06, 21:00	49,52	0	0,00	-49,52	0,00	-49,52	0,00	0,00	-49,52	-49,56	615,66	-48,68	0,00	0,00
28.06, 22:00	52,19	0	0,00	-52,19	0,00	-52,19	0,00	0,00	-52,19	-52,23	566,10	-49,56	0,00	0,00
28.06, 23:00	48,44	0	0,00	-48,44	0,00	-48,44	0,00	0,00	-48,44	-48,48	513,87	-52,23	0,00	0,00

Abbildung 4-3: Ausschnitt Excel-Modell

Die Datengrundlage bildet die stündliche **Globalstrahlung** aus einem typischen meteorologischen Jahr, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, und der stündliche **Stromverbrauch** des Campingplatzes im Beispieljahr 2018. In Abhängigkeit der PV-Anlagengröße ergibt sich die stündlich **erzeugte Strommenge**.

Aus der erzeugten Strommenge abzüglich des Verbrauchs ergibt sich eine **Differenz**. Diese ist positiv, wenn mehr Strom erzeugt als verbraucht wird und stellt somit den **Überschuss** dar. Dieser wird in den Speicher geladen, sofern dessen Kapazitätsgrenze nicht erreicht ist. Ist der Speicher voll, wird der Überschuss verlustfrei in das Netz gespeist.

Die **Differenz** ist negativ, wenn weniger Strom erzeugt als benötigt wird. In diesem Fall wird der **zusätzliche Bedarf** aus dem Speicher entnommen bis aus diesem kein Strom mehr entnommen werden kann. Dann wird Strom aus dem Netz bezogen.

Es werden zusätzliche Annahmen für den Speicher getroffen. Der Speicher darf nur bis auf 10 % seiner Gesamtkapazität entladen werden und bis auf 90 % beladen werden. Beim Be- und Entladen des Speichers gibt es Energieverluste. Für das Modell wird die vereinfachte Annahme getroffen, dass es nur beim Beladen einen Energieverlust gibt und dieser 5 % beträgt. Zudem beträgt die Selbstentladung des Speichers 4 % der Gesamtkapazität pro Monat und wird auf stündliche Werte verteilt.

Aus der Summe der Spalten „Verbrauch“, „Netzbezug“, „Netzeinspeisung“ und „Erzeugung stündlich“ ergeben sich deren Gesamtbeträge über ein Jahr. Die Differenz aus Verbrauch und Netzbezug ergibt den Eigenverbrauch. Aus dem Betrag des netzbezogenen Stroms und dem verbrauchten Strom, ergibt sich der Autarkiegrad durch Formel (1.2). Der Eigenverbrauchsanteil ergibt sich mittels Formel (1.1) aus PV-Erzeugung und Netzeinspeisung.

Da in Kapitel 4.1 bereits eine Vorauswahl der Technologien getroffen wurde, werden Kosten für Li-Ionen Akkumulator und Photovoltaik in das Modell übernommen. Daraus lässt sich, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, eine Annuität berechnen, die als Kriterium für die Wirtschaftlichkeit der Konzepte herangezogen wird.

4.4.4 Modellparameter

Zur Berechnung verwendet das Modell folgende Parameter:

Speicherobergrenze S_o

Die Speicherobergrenze (=maximale Beladung) wird auf 90 % der Kapazität festgelegt.

Speicheruntergrenze S_u

Die Speicheruntergrenze (=maximale Entladung) wird auf 10 % der Kapazität festgelegt.

Speicherkapazität K

Die Speicherkapazität gibt die maximale Energiemenge an, die in dem Akku gespeichert werden kann. Diese ist in dem Modell variabel.

Gesamtwirkungsgrad Akku η_{ges}

Der Gesamtwirkungsgrad gibt den Verlust an, der aus dem Wirkungsgrad des Akkus resultiert. Dieser wird mit 95 % angenommen.

Verbrauch stündlich $E_{\text{verbrauch}}$

Dies gibt den stündlichen Verbrauch des aufgezeichneten Lastprofils für den Campingplatz Stieglitz an.

Globalstrahlung stündlich G_s

Die stündliche Globalstrahlung gibt die eingestrahlte Sonnenenergie aus den Aufzeichnungen des Photovoltaik Geographical Information System (PVGIS) für das typische meteorologische Jahr aus dem Zeitraum 2007-2015 an.

Erzeugung stündlich $E_{\text{erzeugung}}$

Erzeugung ist das Produkt aus der Globalstrahlung (G_s) in Watt/m², der PV-Fläche F_a in m² und dem Wirkungsgrad η der Anlage. Das Ergebnis wird durch 1.000 dividiert, um zu der Einheit kWh zu gelangen.

$$E_s = \frac{G_s * F_a * \eta}{1000} kWh \quad (4.2)$$

Differenz aus Erzeugung und Verbrauch ΔE

Dies ist die Differenz aus erzeugter Energie und gleichzeitig benötigter Energie auf stündlicher Basis.

$$\Delta E = E_s - V_s \quad (4.3)$$

Überschuss \ddot{U}

Der Überschuss beinhaltet alle positiven Werte aus der Zeile der Differenz ΔE . Dies entspricht demnach nur der Summe an Energie, welche zwar erzeugt, jedoch nicht zur selben Zeit verbraucht wird. Es werden somit nur die Beträge aus ΔE übernommen, welche größer als 0 sind. Werte ≤ 0 werden mit 0 angegeben.

$$\ddot{U} = \text{MAX}(\Delta E; 0) \quad (4.4)$$

Zusätzlicher Bedarf B

Der Bedarf beinhaltet nur alle negativen Werten aus der Zeile der Differenz ΔE . Es werden also nur die Werte kleiner 0 übernommen. Der zusätzliche Bedarf gibt dabei die Energie an, welche nicht zeitgleich durch die Produktion gedeckt wird. Diese wird, wenn möglich aus dem

Speicher entnommen oder aus dem Netz bezogen. Umgekehrt zum Überschuss wird dieser folgendermaßen in Excel ermittelt.

$$B = \text{MIN}(\Delta E; 0) \quad (4.5)$$

Speicherladung P_{Ladung}

Die wirksame Speicherladung ergibt sich aus dem Überschuss an Energie und dem Wirkungsgrad des Speichers. Die Max-Funktion gibt dabei die Energiemenge in kWh an, welche sich zum Zeitpunkt t noch im Akku befindet. Diese setzt sich aus der Differenz der Speicherobergrenze und des aktuellen Ladezustandes zusammen. Die Min-Funktion gibt den Wert wieder, welcher sich aus dem Überschuss \ddot{U} und η_{ges} zusammensetzt.

$$P_{\text{Ladung}} = \text{MIN}(\text{MAX}(0; S_o - S_a); \ddot{U} * \eta_{ges}) \quad (4.6)$$

Speicherladungsverlust η_{Ladung}

Der Speicherladungsverlust beschreibt die durch das Laden und Entladen verlorene Energie. Da beim Laden und Entladen eines Akkus kleine Verluste auftreten, kann beim Entladen weniger Energie aus dem Akku entnommen werden, als zuvor in den Speicher geladen wurde. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, wird der Verlust nur beim Beladen berücksichtigt.

$$\eta_{\text{Ladung}} = P_{\text{Ladung}} * (1 - \eta_{ges}) \quad (4.7)$$

Netzeinspeisung P_{Netz}

Die Netzeinspeisung setzt sich aus dem erzeugten Überschuss abzüglich der Energie, welche durch Verluste und Einspeicherung in den Akku aufgewendet werden, zusammen. Sobald der Akku seine Ladeobergrenze erreicht hat, wird die überschüssige Energie in das Netz eingespeist.

$$P_{\text{Netz}} = \ddot{U} - (P_{\text{Ladung}} + \eta_{\text{Ladung}}) \quad (4.8)$$

Selbstentladung $\Sigma \eta_{se}$

Die Selbstentladung wird mit einem Wert von 4 % der Akkukapazität pro Monat angenommen (Umweltbundesamt, 2012, S. 20). Dieser wird der Einfachheit halber als linear angenommen, da der Wirkungsgrad keinen wesentlichen Einfluss auf das Endergebnis hat und je nach

Lagerung und Beanspruchung beeinflusst wird. Der Wert wird auf die Stunden im Monat verteilt und von dem Speicherstand subtrahiert.

$$\Sigma \eta_{se} = (4\%/720std) * K \quad (4.9)$$

Speicherentnahme $P_{Entnahme}$

Wird weniger Strom produziert als verbraucht wird, wird zunächst Energie aus dem Stromspeicher entnommen. Bis zur Erreichung seiner Speicheruntergrenze kann so Strom aus diesem entnommen werden. Die Speicherentnahme beschreibt dabei die Energie, welche aus dem Speicher entnommen wird und effektiv zur Verfügung steht.

$$P_{Entnahme} = MAX(B; -S_a + S_u + \Sigma \eta_{se}) \quad (4.10)$$

Speicherentladung $P_{Eff-Entladung}$

Die Speicherentladung ist die Summe der aus dem Speicher entnommenen Energie in kWh zuzüglich der durch die Selbstentladung verlorenen Energie

$$P_{Eff-Entladung} = P_{Entnahme} - \Sigma \eta_{se} \quad (4.11)$$

Speicherstand Akku S_a

Der Speicherstand des Akkus beschreibt den aktuellen Ladezustand des Akkumulators. Dieser ist die Summe aus dem Speicherstand zum vorherigen Zeitschritt t (in diesem Fall Stunden) und den Zu- und Abflüssen.

$$S_a \text{ Zeitpunkt } t = S_a \text{ }_{t-1} + P_{ladung \text{ }_{t-1}} + P_{Eff-entladung \text{ }_{t-1}} \quad (4.12)$$

Erreicht der Akku seine Untergrenze von 10 % seiner Kapazität, wird davon ausgegangen, dass der Speicher durch seine Selbstentladung weiter entladen wird, dieser Verlust fällt sehr gering aus und beeinflusst das Ergebnis nicht signifikant. Aus diesem Grund wird vereinfacht angenommen, dass dieser Verlust durch das Stromnetz kompensiert wird.

Netzbezug $P_{Netzbezug}$

Der Netzbezug ist die Summe aus Bedarf abzüglich der Summe an Energie, welche aus dem Speicher entnommen werden kann. Ist im Speicher zum Zeitpunkt t genug Energie vorhanden, so wird der Bedarf alleine aus dem Speicher bedient. Erst wenn der Speicher seine Kapazitätsgrenze erreicht hat, wird der Bedarf durch das öffentliche Netz gedeckt.

$$P_{\text{Netzbezug}} = -B + P_{\text{Entnahme}} \quad (4.13)$$

4.4.5 Modellvalidierung

Zur Validierung des Modells wird in diesem Kapitel der Autarkiegrad unter denselben Annahmen, am selben Standort und mit identischer Globalstrahlung für ein Standardlastprofil (SLP) H0 eines normalen Einfamilienhauses ermittelt. Da bereits Autarkiegrade in der Literatur zu finden sind, kann auf diese Weise das Modell validiert werden und die Ergebnisse auf deren Plausibilität überprüft werden.

In der Literatur lässt sich der Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil bei normalisierten PV-Leistungen und Speicherkapazitäten vergleichen. Ein normalisiertes Verhältnis von 1 entspricht dabei z.B. einem Stromverbrauch von 4.000 kWh/a mit einer 4 kW_{Peak} PV-Anlage und einem 4 kWh Speicher. Ein normalisiertes Verhältnis von 2 entspricht bspw. einem Verbrauch von 4.000 kWh/a mit einer 8 kW_{Peak} PV-Anlage und einem 8 kWh Speicher. Zum Vergleich werden in dem Modell die normalisierten Werte von 0-2,5 aus Abbildung 4-5 übernommen, was auf ein 4.000 kWh SLP eine PV-Leistung von 0-10 kW_{peak} und proportional dazu eine Speicherkapazität von 0-10 kWh entspricht.

Vorgehen: Das SLP wird von Stromnetze Berlin GmbH herangezogen (Stromnetz Berlin GmbH, 2019). Die 15-minütigen Werte werden zunächst zu stündlichen zusammengefasst und zu einem prozentualen Anteil des Jahres umgerechnet. Für ein normales Einfamilienhaus wird ein Stromverbrauch von 4.000 kWh pro Jahr angenommen. Die 4.000 kWh werden dann mit den prozentualen Werten auf das Jahr verteilt, sodass für jede Stunde ein Verbrauch in kWh existiert. Diese Daten werden anschließend in das Modell eingefügt und analysiert.

Das Standardlastprofil für ein Einfamilienhaus mit einem beispielhaften Verbrauch von 4.000 kWh/Jahr ist in Abbildung 4-4 dargestellt und zeigt eine umgekehrte Tendenz zu dem des Campingplatzes, da hier im Sommer am wenigsten, dafür im Winter am meisten Strom verbraucht wird.

Methodischer Ansatz

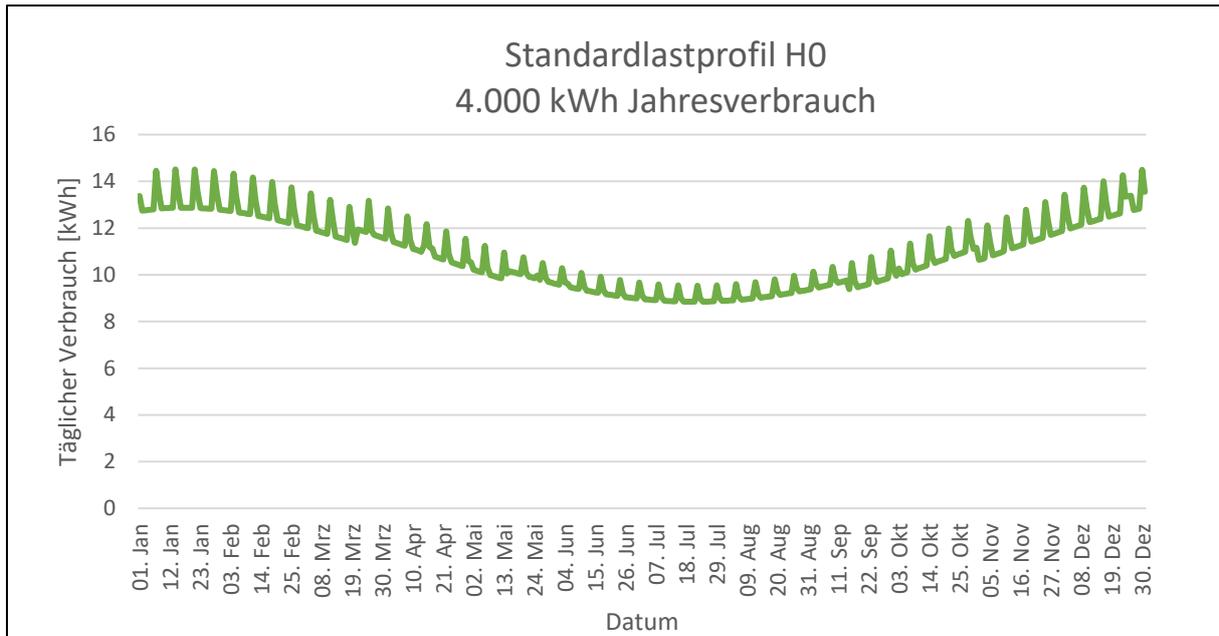


Abbildung 4-4: Standardlastprofil 4.000 kWh Jahresverbrauch
(Da das Modell stündliche Werte verarbeitet, wurden die 15-minütigen Werte zu stündlichen Werten zusammengefügt)

In Abbildung 4-5 sind die Eigenverbrauchswerte und Autarkiegrade in Abhängigkeit der normalisierten PV-Leistung und der Speicherkapazität in Bezug auf ein Standardlastprofil dargestellt. Diese geben eine gute Orientierung, um die Ergebnisse des Excel-Modells abzugleichen.

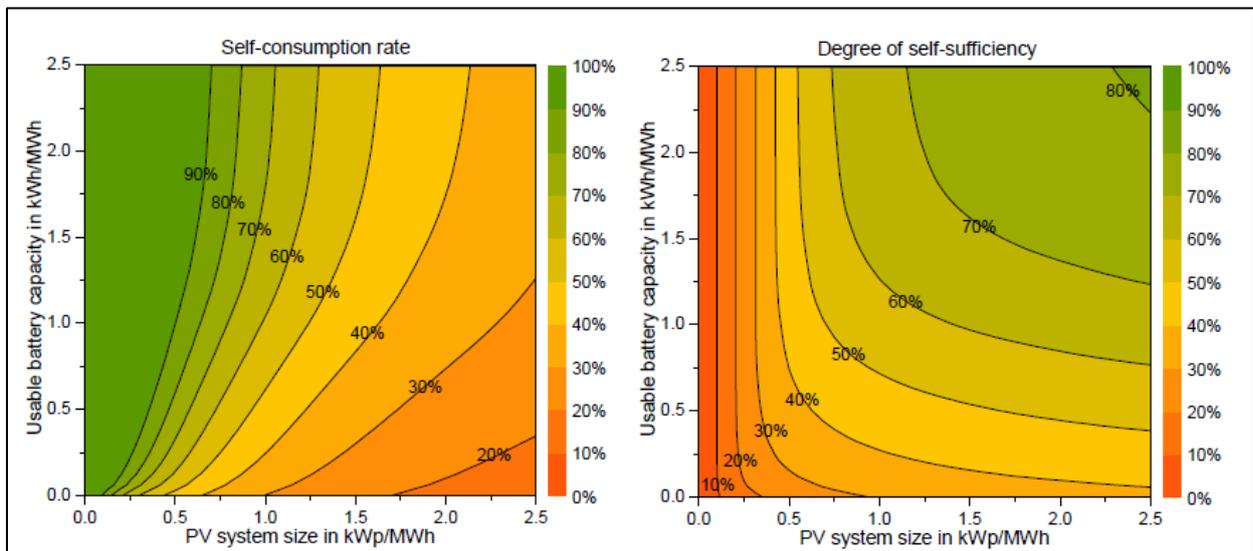


Abbildung 4-5: Jährlicher Wert von Eigenverbrauchsanteil (linkes Diagramm) und Autarkiegrad (rechtes Diagramm) Haushalt

- PV-Größe und Speicherkapazität mit normalisierten Werten

Quelle: (Johannes Weniger T. T., 2014, S. 82)

Methodischer Ansatz

Die Ergebnisse welche in Abbildung 4-6 dargestellt sind, werden herangezogen, um zu zeigen, dass die Ergebnisse des Modells plausibel erscheinen und sich für die Untersuchung und Skalierung des Systems auf dem Campingplatz verwenden lassen.

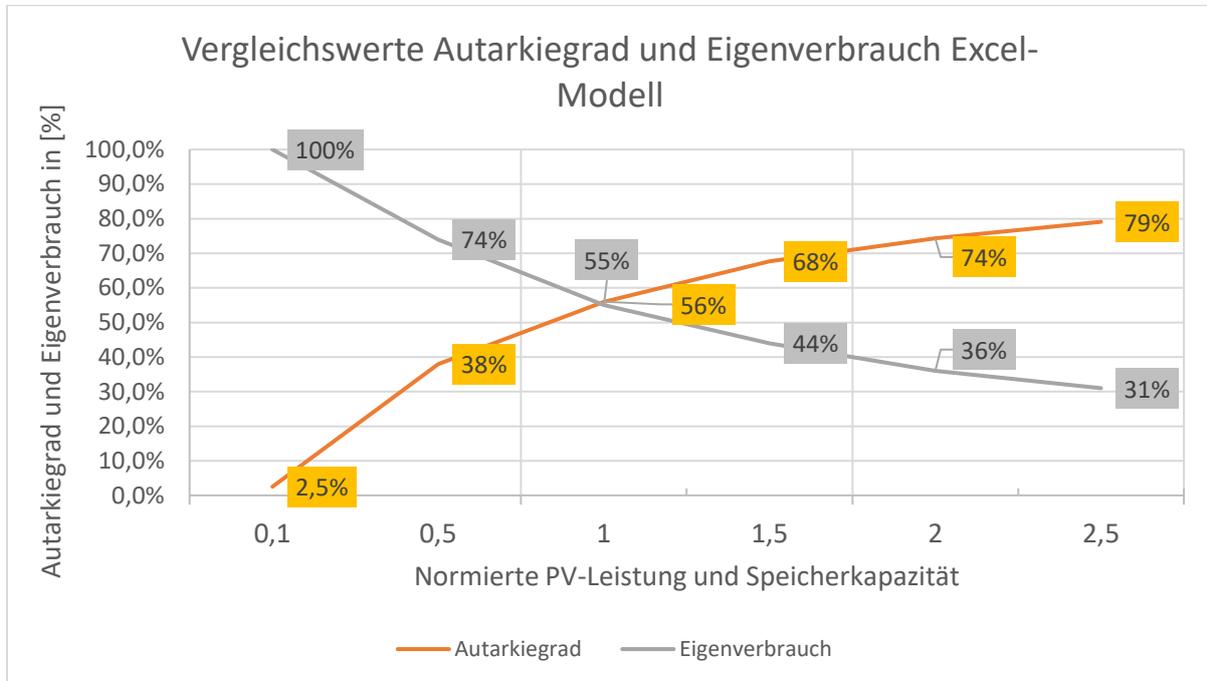


Abbildung 4-6: Vergleichswerte zur Validierung des Excel-Modells

Tabelle 3 zeigt anhand des Autarkiegrades beider Modelle, dass diese deutlich kongruieren. Die Vergleichsgrafik zeigt keine exakten Vergleichswerte, jedoch lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse des Modells im Bereich der Vergleichswerte liegen. Dementsprechend lässt sich das Modell für den weiteren Verlauf der Untersuchung anwenden. Gleiches gilt für den Eigenverbrauch. Die Übereinstimmung lässt sich ebenfalls durch den Abgleich der Daten aus Abbildung 4-7 und 4-8 erkennen.

Tabelle 3: Autarkiegrad Vergleich Literatur mit Modell

Normalisierte PV und Speichergröße	Autarkiegrad: Ergebnisse der Literatur (Bereich aus Grafik abgelesen)	Autarkiegrad: Ergebnisse des Modells
0,5	30-40 %	38 %
1	50-60 %	56 %
1,5	65-70 %	68 %
2	~ 75 %	74 %
2,5	~ 80 %	79 %

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die mit Hilfe des Excel-Modells gewonnenen Ergebnisse dargestellt und erläutert. Es werden dabei die in den vorangegangenen Kapitel beschriebenen Daten verwendet.

Zunächst gibt es einen kleinen Exkurs in die generelle Stromversorgung in Deutschland: Der aktuelle Strommix in Deutschland führt zu großen Schwankungen bei den Strompreisen. Die dargebotsabhängigen Wind- und PV-Anlagen speisen sehr volatil ins Netz ein, worauf konventionelle Kraftwerke nur langsam reagieren können. Dies führt dazu, dass teilweise mehr Strom im Netz vorhanden ist als verbraucht wird. Dies hat Auswirkungen auf den Strompreis, welcher im Extremfall einen negativen Wert erreicht. In einem solchen Fall müssen Kraftwerksbetreiber Geld für das Einspeisen ihres Stroms bezahlen. Dieses Verhalten zeigt sich besonders häufig an Wochenenden und Feiertagen (Frauenhofer ISE, 2019). Abbildung 5-1 zeigt für die erste Maiwoche 2018 beispielhaft diese Situation.

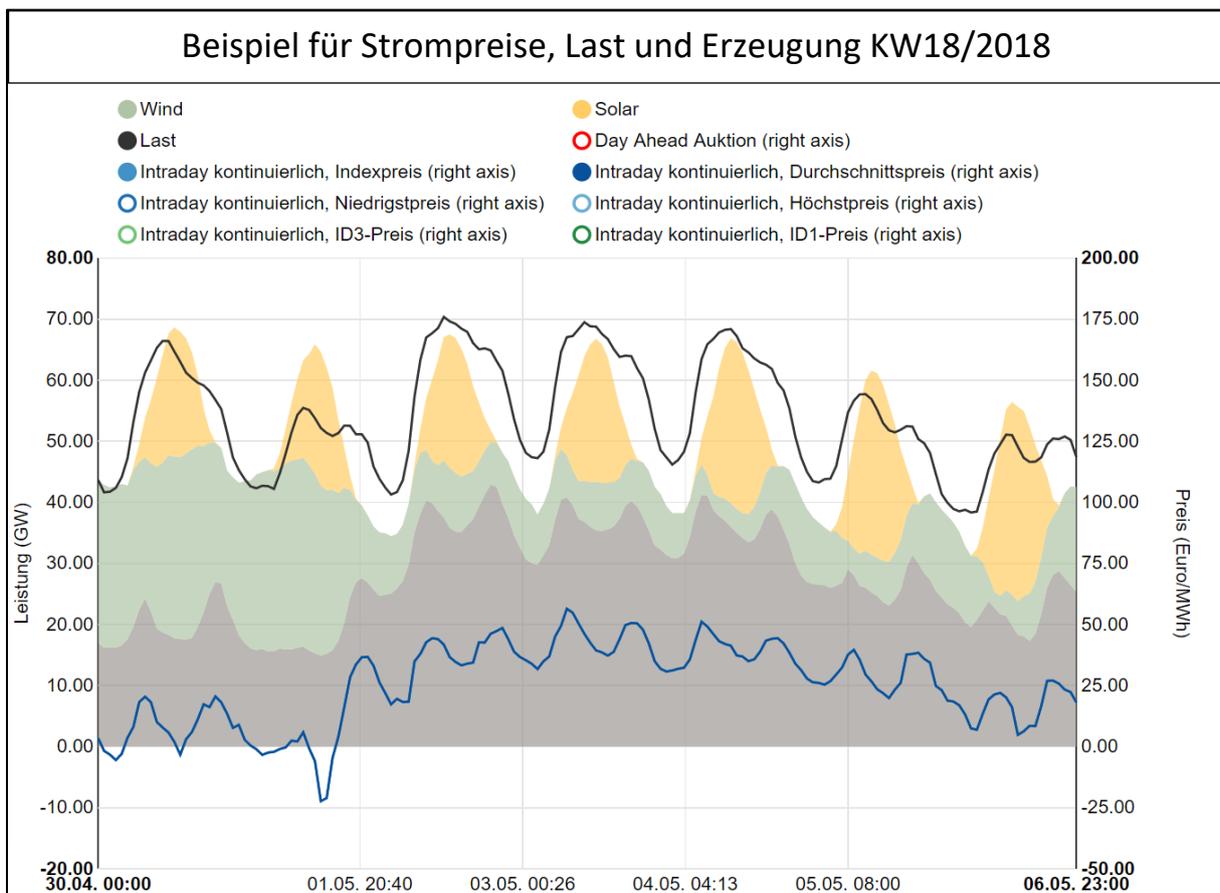


Abbildung 5-1: Beispiel für Strompreise, Last und Erzeugung KW18/2018

Quelle: (EEX, EPEX, 2019) (die mit leeren Kreisen dargestellten Legendeneinträge sind nicht abgebildet)

Das Lastprofil des Campingplatzes zeigt an diesen Tagen meist einen erhöhten Verbrauch, wodurch sich das öffentliche Netz mit dem Verbrauch des Campingplatzes gut ergänzen. Aus diesem Grund wurden die besonders hohen Peaks des Lastprofils zum Test geglättet. Jedoch zeigt der Vergleich des Autarkiegrades bei den nachfolgenden Szenarien einen Unterschied von rund 1 %. Da somit keinen signifikanten Unterschied entsteht und der tatsächliche Autarkiegrad leicht verfälscht werden würde, wird in den Szenarien das normale Lastprofil verwendet.

5.1 Wirtschaftlich erreichbarer Autarkiegrad am Campingplatz Stieglitz

In diesem Szenario wird mit Hilfe des Excel-Modells untersucht, wie sich die Kapazitäten von Erzeugungsanlagen und Energiespeichern kombinieren lassen, mit dem Ziel ein wirtschaftliches und dadurch finanziell tragbares Konzept zu entwickeln. Dabei werden Energieverbrauch, anfallende Kosten (Kapitel 4.2), Energiedargebot erneuerbarer Energie, Wirkungsgrade und Verluste beim Speichern berücksichtigt.

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, gilt es einen Verbrauch von insgesamt knapp 300.000 kWh zu decken. Als Energiequelle steht dabei die solare Einstrahlung zur Verfügung, welche in Kapitel 3.3 näher beschrieben wurde. Diese wird in diesem Modell mit einem Wirkungsgrad von 16 % in elektrische Energie umgewandelt. Des Weiteren wird ein Wirkungsgrad von 95 % des Akkus angenommen und um die Lebensdauer des Akkus zu erhöhen, wird dieser nur bis zu 90 % geladen und bis zu 10 % entladen. Zu Beginn wird eine Akkuladung von 50 % angenommen.

Die Kosten zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit sind in Tabelle 4 zu finden und wurden aus dem Excel-Modell entnommen. Die Kosten bleiben für die verschiedenen Szenarien konstant und wurden in Kapitel 4.2 näher beschrieben.

Ergebnisse

Tabelle 4: Angenommene Kosten für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Kosten		
PV	€/kW _{peak}	900
PV	€/m ²	144
Speicher	€/kWh	675
Stromkosten	€/kWh	0,233
Einspeisung	€/kWh	0,064
Wartung / Versicherung		2%
Annuität Parameter		
Nutzungsdauer	a	20
Zinssatz		2%
Annuitätenfaktor		0,0612

5.1.1 Konzept mit begrenzter Fläche

Mit Hilfe des in Excel verfügbaren Solver-Tools lässt sich durch Variation der Größen von Speicherkapazität und PV-Fläche und unter der Nebenbedingung einer positiven Annuität von mindestens 1 €/a eine Lösung für ein mögliches umsetzbares Konzept finden.

Um auf die Gegebenheiten vor Ort einzugehen, wird die zur PV zur Verfügung stehende Fläche (Kapitel 3.1) begrenzt und im Solver als weitere Nebenbedingung berücksichtigt. Dabei wird zunächst ein Szenario erstellt, in dem die PV-Anlagen nur auf nicht genutzten Flächen, wie in diesem Fall den Dachflächen der Mobilheime, installiert werden sollen. Dabei ergibt sich die Speicherkapazität, die mit einer Laufzeit von 20 Jahren und unter Berücksichtigung aller vorangegangenen Annahmen gerade noch eine positive Annuität ermöglicht. Im Anschluss lässt sich beurteilen, wie sich die Annuität in Abhängigkeit der Speichergröße entwickelt und eine geeignete Kapazität diskutieren.

Schließlich wird ein weiteres Szenario mit zusätzlich nutzbaren Flächen erstellt und es wird erörtert, wie sich größere Erzeugungsanlagen auf den Autarkiegrad auswirken und ob sich der Ausbau weiterer Flächen empfiehlt.

5.1.1.1 Szenario 1: Installation von PV auf Mobilheimen

Im folgenden Szenario ist die Größe des PV-Systems auf die Maximalgröße von 1.500 m², was 50 Mobilheimen mit jeweils 30 m² Dachfläche entspricht, begrenzt. In dem Modell entspricht dies bei einem Wirkungsgrad der Module von 16 % einer PV-Anlage von 240 kW_{peak}. Mit Hilfe

Ergebnisse

des Modells werden die maximal installierbare Speicherkapazität bei positiver Annuität und der dadurch erreichbare Autarkiegrad berechnet. Im Zuge dessen wird die Entwicklung des Autarkiegrads in Abhängigkeit von Speicherkapazität und Annuität untersucht, um die Frage zu klären, ob sich größere Speicherkapazitäten merkbar auf den Autarkiegrad niederschlagen und ob sich die Investitionskosten verhältnismäßig zum Autarkiegrad entwickeln. In der untenstehenden Tabelle 5 ist das Szenario dargestellt.

Tabelle 5: Szenario 1: Ergebnisse PV auf Mobilheimen

Anlagen		
PV Fläche	m ²	1.500
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	240
Speicherkapazität	kWh	811
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	216.000
Speicherkosten	€	547.520
Gesamtkosten	€	763.520
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	13.210
Speicher	€/a	33.484
Stromkosten	€/a	19.899
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	4.320
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	2.204
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	48.812
Gewinne	€/a	51.016
Kosten	€/a	51.015
Annuität	€/a	1
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	85.405
Netzeinspeisung	kWh	34.437
Gesamtproduktion	kWh	248.537
Eigenverbrauch	kWh	209.492
Autarkiegrad		71 %
Eigenverbrauch		84 %

Mit der gewählten PV-Fläche von 1.500 m² lässt sich die Speicherkapazität auf 811 kWh wirtschaftlich festsetzen. Dies entspricht Kosten für den Speicher von ca. 547.000 €. Diese Summe ist bereits im Vergleich zu den Investitionskosten für die PV-Anlage um gut das 2 ½-fache höher. Der Autarkiegrad liegt erwartungsgemäß deutlich unter 100 %, da die Anlage über das Jahr aufsummiert weniger Strom produziert als in Summe verbraucht wird. Mit 71 %

Ergebnisse

ist dieser jedoch nicht unerheblich und macht deutlich, dass auch kleine Anlagen bei diesem Objekt (im Verhältnis zum Verbrauch) bereits einen Großteil des benötigten Stroms bereitstellen können. Ebenfalls ist der Eigenverbrauch mit 84 % beachtlich, was bedeutet, dass lediglich 16 % des erzeugten Stromes, in das Stromnetz gespeist oder in Wärme umgewandelt werden müssen.

Der in Abbildung 5-2 dargestellte monatsgemittelte jährliche Verlauf zeigt, dass während der Monate von März bis Juli der erzeugte Strom bilanziell ausreicht, um den Monatsbedarf zu decken, da die Summe der Erzeugung (grüner Balken) größer bzw. etwa gleich dem Verbrauch ist (rote Linie).

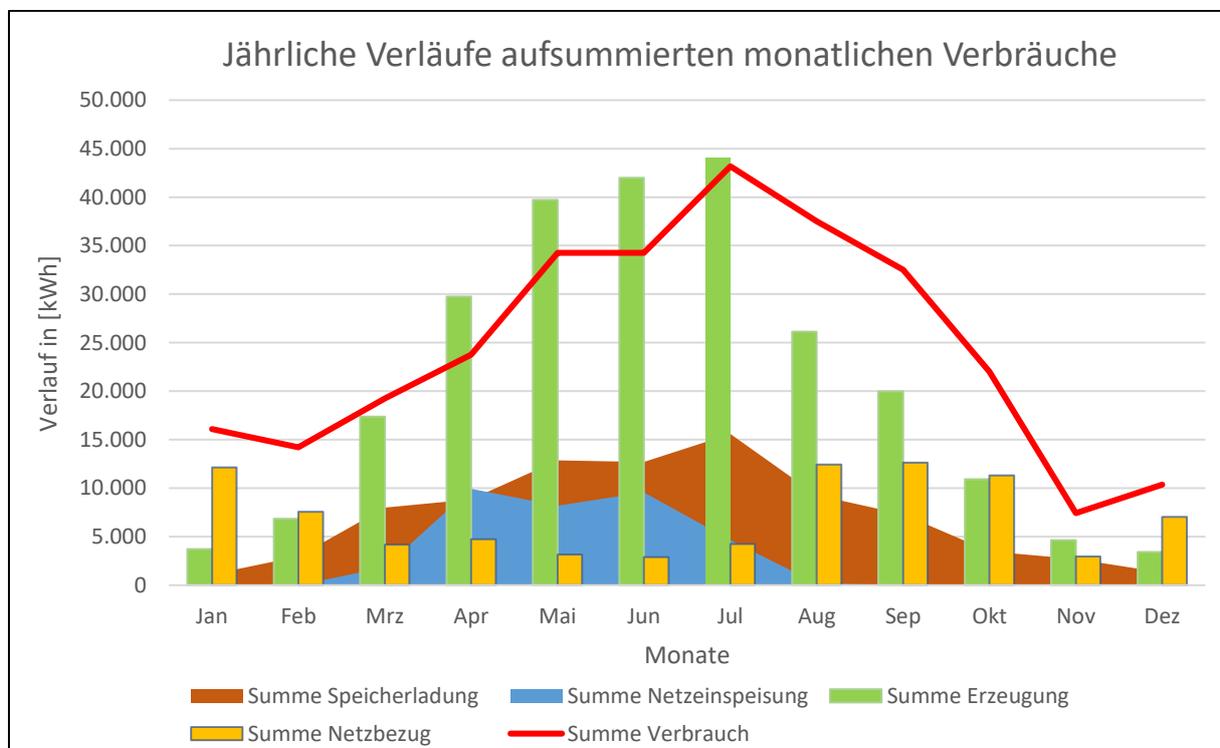


Abbildung 5-2: Jährliche Verläufe im Monatsmittel bei 1500 m² PV

Jedoch wird auch in diesen Monaten Strom aus dem Verbundnetz bezogen, da sich, wie in Abbildung 5-3 ersichtlich, an einigen Tagen im Monat der Bedarf aufgrund der Schwankungen in der Erzeugung und im Verbrauch nicht decken lässt. Aus geringer Sonnenstrahlung und/oder einem verhältnismäßig hohem Verbrauch resultiert diese Diskrepanz. Schwankungen in Erzeugung und Verbrauch treten unabhängig voneinander auf und stellen somit hohe Anforderungen an ein autarkes System.

Ergebnisse

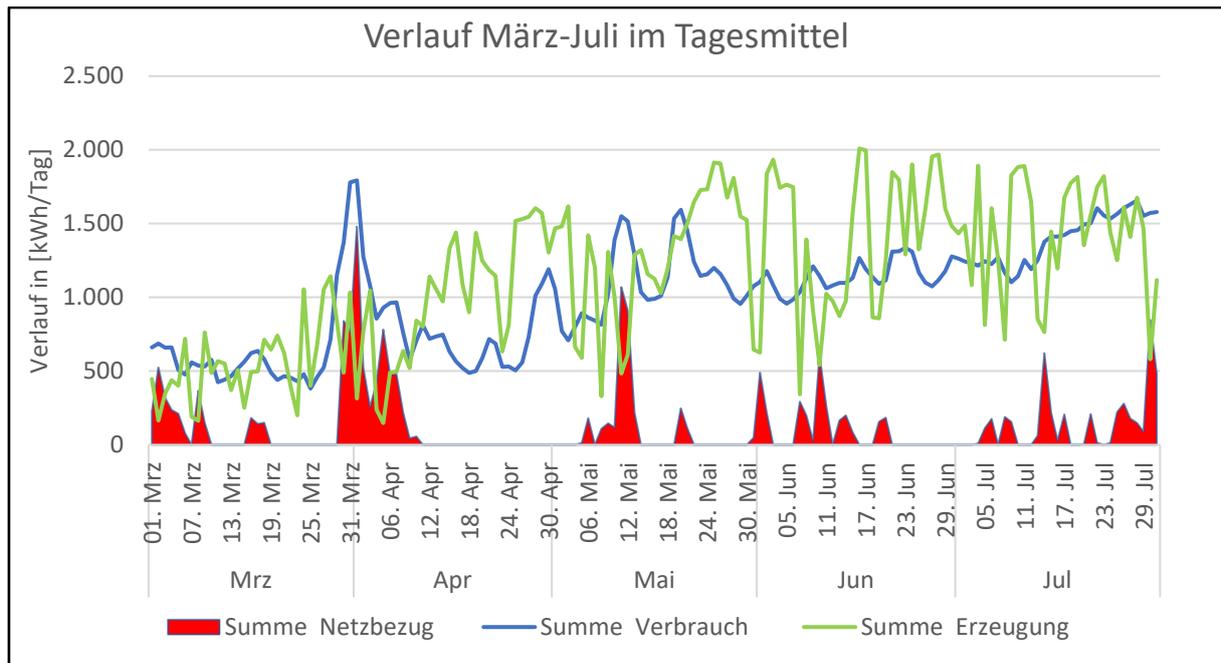


Abbildung 5-3: Verlauf März-Juli im Tagesmittel

Eine Möglichkeit, den Netzbezug zu verringern, wäre es, größere PV-Anlagen zu installieren, sodass die Produktion auch bei geringer Einstrahlung den Verbrauch decken kann. Jedoch wächst dadurch die Anzahl an Tagen, an denen der Verbrauch bereits gedeckt ist und somit ein Stromüberschuss vorliegt.

Eine andere Möglichkeit zur Optimierung, jedoch ohne Zubau weiterer Erzeugungskapazitäten, bietet ein dem Angebot angepasster Verbrauch, das sogenannte Demand-Side-Management (DSM). Dabei werden Verbraucher angebotsabhängig gesteuert. Zum Beispiel werden Waschmaschinen, Kühlschränke, Boiler oder andere energieintensive Verbraucher automatisch eingeschaltet, wenn genügend Strom vorhanden ist.

Die in Abbildung 5-4 dargestellte Entwicklung des Autarkiegrades in Abhängigkeit der Speicherkapazität und der Annuität zeigt deutlich, dass kein proportionaler Zusammenhang zwischen diesen besteht. Bei einer Speicherkapazität von 0 kWh liegt der Autarkiegrad bei rund 42 %. Bei 100 kWh Speicherkapazität steigert sich der Autarkiegrad um 8 % auf 50 % und führt nur zu einer geringfügigen Abnahme der Annuität. Die Frage, ob ein Speicher in ein solches System integriert werden sollte, lässt sich mit einem klaren Ja beantworten. Jedoch bleibt die Frage nach dessen Größe Ermessens Sache. Die ersten 50 kWh bringen sogar einen Kostenvorteil gegenüber 0 kWh Speicher. Mit steigender Kapazität nimmt die Annuität

Ergebnisse

sukzessive ab, was auf die höheren Investitionskosten bei verhältnismäßig geringer Zunahme der Einsparung durch Eigenverbrauch zurückzuführen ist.

Deutlich zeigt sich auch, dass die Zunahme des Autarkiegrades mit steigender Speicherkapazität kontinuierlich abflacht. Durch die Steigerung der Kapazität von 0 kWh auf 400 kWh steigert sich der Autarkiegrad von 42 % auf 64 %, also um 22 %. Vergleicht man diese Steigerung mit der Zunahme der Speicherkapazität von 400 kWh auf 800 kWh, so trägt dies lediglich zu einer Steigerung um 7 % (von 64 % auf 71 %) bei. Bei Investitionsentscheidungen sollte dies in jedem Fall berücksichtigt werden.

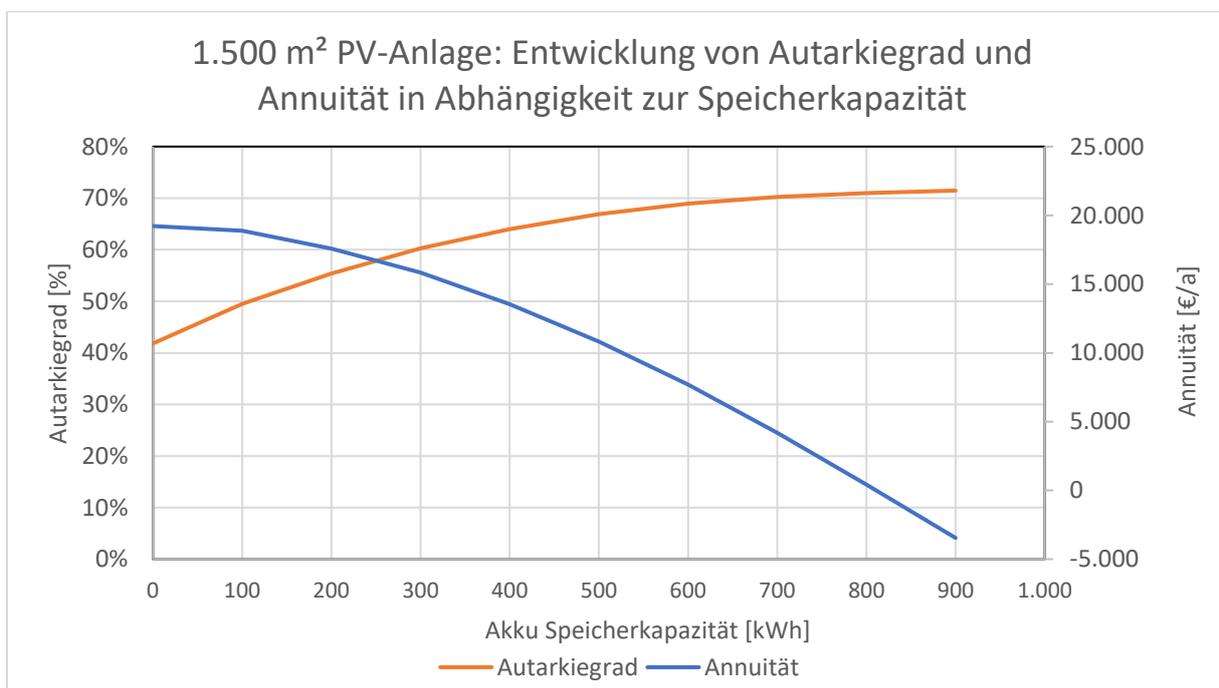


Abbildung 5-4: Autarkiegrad und Annuität in Abhängigkeit der Speicherkapazität

Dieses Szenario zeigt bereits, dass ein großer Teil des Strombedarfs durch PV-Strom gedeckt werden kann. Bei der Steigerung des Autarkiegrades durch den Zubau von Speicherkapazität stellt jedoch nicht das Konzept mit einer Annuität von 1 €/a die sinnvollste Lösung dar. Für den Fall, dass nur die Mobilheime mit Photovoltaik ausgestattet werden, ergibt es Sinn, einen deutlich kleineren Speicher zu wählen als die realisierbaren 811 kWh. In Tabelle 6 ist ein Vorschlag für dieses Szenario aufgeführt. Bei einem Speicher von 400 kWh steht ein Autarkiegrad von 64 % und eine Annuität von 13.534 €/a gegenüber. Dies wäre somit ein ökonomisch tragbareres Konzept.

Ergebnisse

Tabelle 6: Szenario 1 „PV auf Mobilheimen“ - Zusammenfassung

Vorschlag für Szenario 1 Eckdaten	
PV-Leistung [kW_{peak}]	240
Speicherkapazität [kWh]	400
Autarkiegrad [%]	64
Eigenverbrauchsanteil [%]	76
Investitionskosten [€]	486.000
Annuität [€/a]	13.534
Jährliche Stromeinsparung [kWh/a]	188.714

In Abbildung 5-5 ist der über das Jahr gemittelte Tagesverlauf abgebildet. Die Stromproduktion übersteigt den Verbrauch im Durchschnitt von 07:00 bis 15:00 Uhr. Erwartungsgemäß ist daher der Betrag aus Netzbezug und dem Entladen des Speichers um die Mittagszeit gering. In den Morgen- und Abendstunden ist dahingegen ein signifikanter Anstieg zu verzeichnen. Der Speicher wird demnach über den Tag geladen und gibt meist nachts seine Energie an die Verbraucher ab. Wird die Kapazitätsgrenze des Speichers erreicht, so wird zusätzlich produzierter Strom in das Netz eingespeist. Da überschüssiger Strom zunächst gespeichert wird, ist die Netzeinspeisung um 3-4 Stunden zeitversetzt und am frühen Nachmittag am höchsten.

Ergebnisse

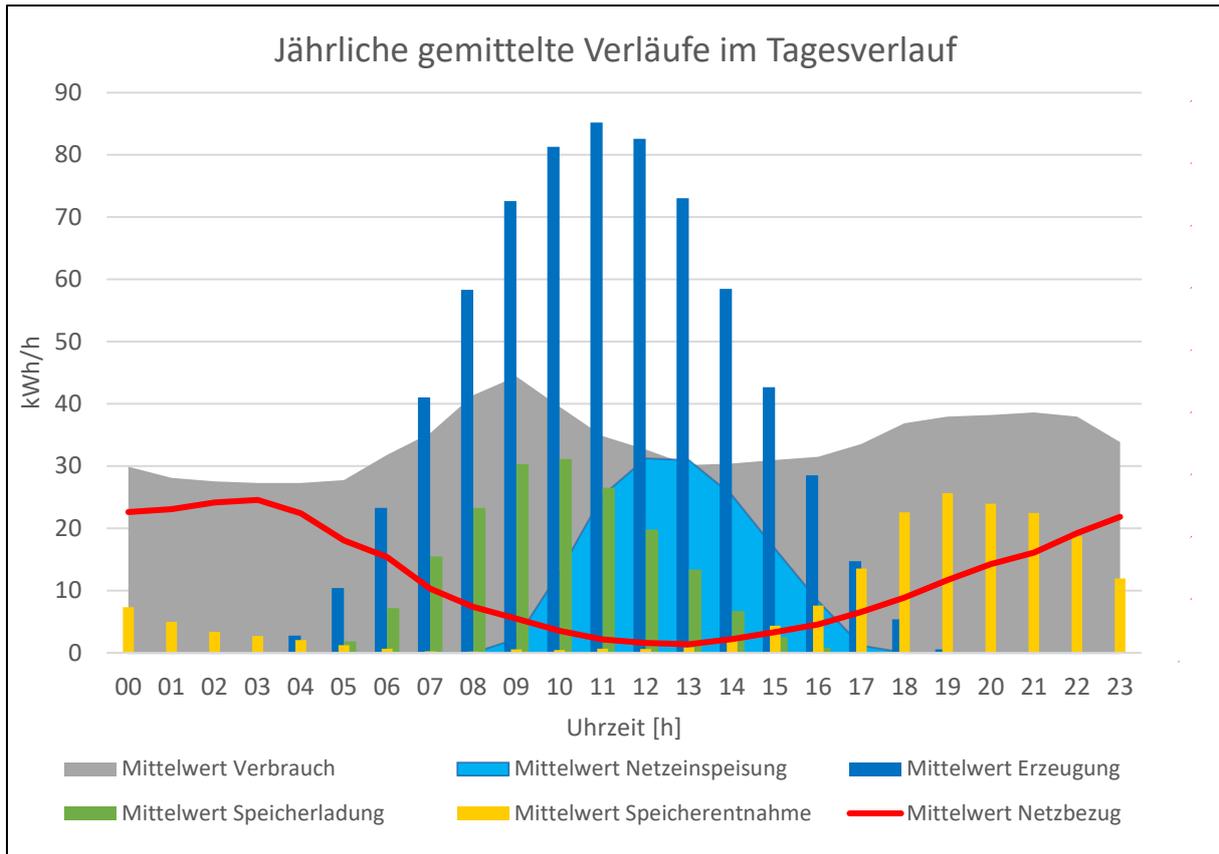


Abbildung 5-5: Jährliche gemittelte Verläufe im Tagesverlauf

Idee zur Umsetzung:

In diesem Szenario sollten PV-Zellen mit hohem Wirkungsgrad verwendet werden, um die nutzbare Fläche bestmöglich auszunutzen. Dazu bieten sich monokristalline Zellen an, welche einen relativ hohen Wirkungsgrad erzielen im Vergleich zu polykristallinen Zellen oder Dünnschichtmodulen erreichen (Bernhard Weller, 2009, S. 15).

5.1.1.2 Szenario 2: Installation von PV auf Mobilheimen und Freifläche

Wie in Kapitel 3.1 dargelegt, befinden sich auf dem Gelände des Campingplatzes einige Freiflächen, welche für die Nutzung bzw. Bebauung von PV-Anlagen geeignet sind. Diese Fläche beläuft sich, wie in Abbildung 5-6 dargestellt, auf ca. 20.000 m². Da die Fläche der Mobilheimdächer nicht ausreichend ist, um genug Strom für das gesamte Jahr zu produzieren, wird nun untersucht, wie viel der Freifläche benötigt würde, um den Verbrauch zu decken und wie sich der Autarkiegrad und der Eigenverbrauchsanteil in diesem Szenario verhalten.

Ergebnisse



Abbildung 5-6: Freifläche Camping Stieglitz
Quelle: (Google, 2019)

Wie bereits in einer anderen Studien dargelegt, lässt sich die Wirtschaftlichkeit mit zunehmender Größe der PV-Anlage steigern (Joseph Bergner, 2019, S. 15). Da das Modell eine Vergütung für in das Stromnetz eingespeisten Strom berücksichtigt, besteht ein Anreiz, die PV-Fläche so groß wie möglich zu gestalten. Um die PV-Leistung auf eine praktikable Größe zu begrenzen, wird dem Solver als Nebenbedingung (zusätzlich zur positiven Annuität) ein Eigenverbrauchsanteil von mindestens 50 % vorgegeben da die Anlage sich nicht primär durch die Einspeisung von Strom ins Netz amortisieren soll.

Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien, ergibt sich ein erreichbarer Autarkiegrad von 93,75 % bei einem Eigenverbrauchsanteil von 50 % (siehe Tabelle 7). Nötig dafür ist eine PV-Anlage mit 533,9 kW_{peak} und eine Speicherkapazität von 1.033,3 kWh. Mit einer Gesamtproduktion von 561.531 kWh/a wird deutlich mehr Strom produziert als im selben Zeitraum verbraucht wird. Mit über 93 % Autarkie und 50 % Eigenverbrauch, ist das System so nahezu in der Lage, sich komplett selbst zu versorgen.

Ergebnisse

Tabelle 7: Szenario 2: Ergebnisse PV auf Mobilheimen und Freifläche

Anlagen		
PV Fläche	m ²	3.337
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	534
Speicherkapazität	kWh	1.033
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	480.528
Speicherkosten	€	697.478
Gesamtkosten	€	1.178.006
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	29.388
Speicher	€/a	42.655
Stromkosten	€/a	4.295
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	9.611
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	17.238
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	64.416
Gewinne	€/a	81.654
Kosten	€/a	81.654
Annuität	€/a	1
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	18.432
Netzeinspeisung	kWh	269.342
Gesamtproduktion	kWh	552.912
Eigenverbrauch	kWh	276.464
Autarkiegrad		93,75%
Eigenverbrauch		50%

Jedoch wirft sich durch die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit auch in diesem Szenario die Frage auf, ob die in diesem Ergebnis notwendige Speicherkapazität ökonomisch tragbar bzw. effizient ist. Dazu wird die Entwicklung der Annuität in Abhängigkeit der Speicherkapazität wie im vorherigen Szenario analysiert. Auch in diesem Szenario ist offensichtlich, dass sich mit zunehmender Speicherkapazität der Zubau einer weiteren kWh Kapazität weniger positiv auf den Autarkiegrad, als die vorherige auswirkt (siehe Abbildung 5-7).

Dies spiegelt sich ebenfalls in der Annuität wieder. Die ersten 300 kWh wirken sich positiv auf deren Ergebnis aus, da durch die Steigerung des Autarkiegrades die Einsparung von Kosten für netzbezogenen Strom, die Investitionskosten, auf Sicht von 20 Jahren, übersteigt. Ab 300 kWh nimmt die Annuität zunächst langsam ab, da sich der Autarkiegrad pro zugebauter Speicherkapazität weniger stark zunimmt. Daraus resultiert eine zunächst leichte Abnahme

Ergebnisse

der Annuität, welche mit zunehmender Speicherkapazität steiler und annähernd linear abnimmt.

Aus rein ökonomischer Betrachtung bietet es sich daher an, die Speicherkapazität auf etwa 300 kWh zu skalieren, da es sich um die wirtschaftlichste Lösung handelt. Doch der Autarkiegrad nimmt bis zu einer Speicherkapazität von 700 kWh deutlich zu, sodass darüber nachgedacht werden sollte, das System etwas größer auszulegen. Mit 700 kWh Speicherkapazität lässt sich 90 % des Strombedarfs selbst decken. Eine Steigerung der Kapazität von 0 auf 700 kWh trägt dabei zu einer Steigerung des Autarkiegrades um 42 % (von 48 % auf 90 %) bei, während eine weitere Steigerung der Kapazität von 700 auf 1.368 kWh zu einer Steigerung um 5 % beiträgt. In Tabelle 8 sind die Eckdaten dieses Konzeptes zusammengefasst.

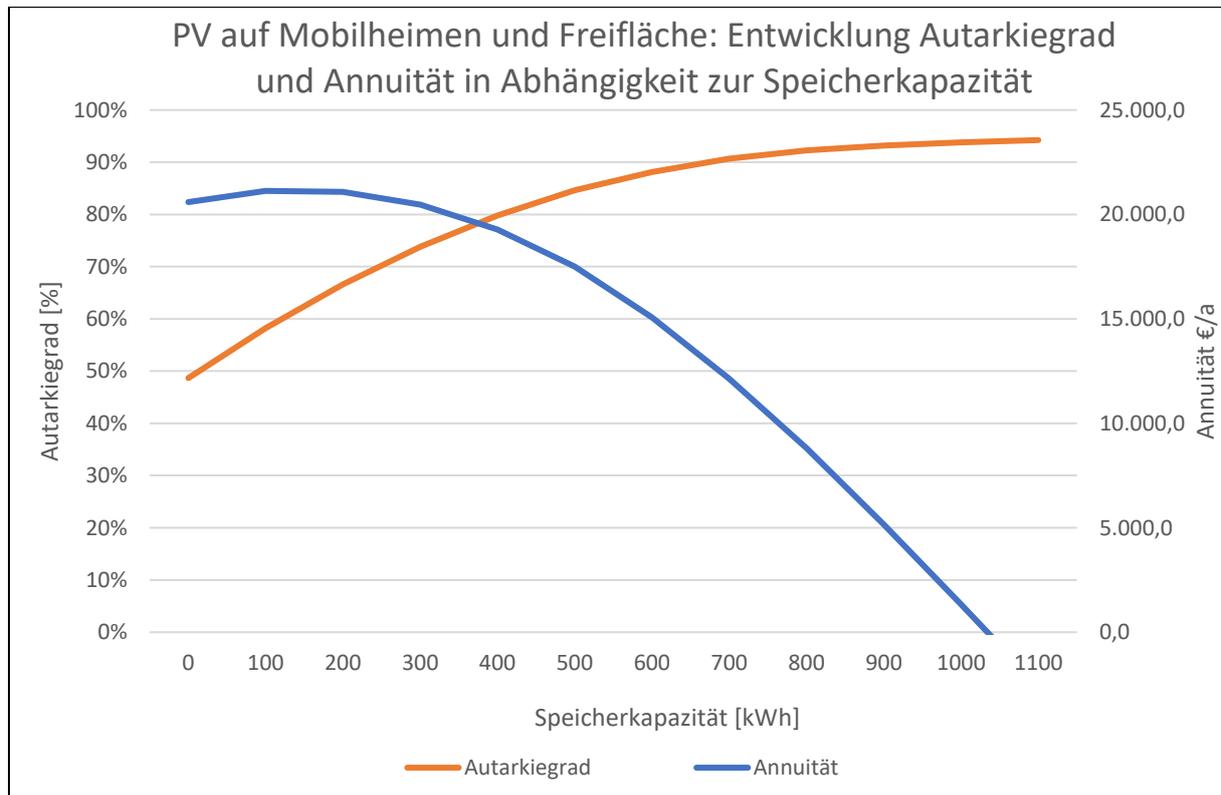


Abbildung 5-7: Entwicklung Annuität bei 534 kW_{peak} PV-Leistung
- in Abhängigkeit von Autarkiegrad und Speicherkapazität

Für die PV-Anlage mit 534 kW_{peak} wird eine Modulfläche von 3.337 m² benötigt. Diese verteilt sich auf 1.500 m² auf Mobilheimen installierter Fläche und weiteren 1.837 m² auf Freifläche installierter Fläche. Im Rahmen der Konzepterstellung wurde auch die Nutzung der Dachflächen von den Sanitärhäusern für die Installation von Modulflächen in Betracht

Ergebnisse

gezogen. Doch diese bieten sich durch die in Ost-West-Richtung ausgerichtete Schrägdächer nicht optimal für PV-Anlagen an, sodass diese nicht näher betrachtet werden.

Bei Freiflächen gilt es, die Module in genügend Abstand hintereinander zu installieren da sich die Module bei zu geringem Abstand gegenseitig verschatten würden. In Deutschland hat sich dabei ein Flächennutzungsgrad bei 30° Modulneigung von etwa 1/3 bewährt (C. Bleske, 2009, S. 1). Das bedeutet, dass für eine Modulfläche von 1.837 m² eine Fläche von $1.837 \text{ m}^2 * 3 = 5.511 \text{ m}^2$ benötigt würde, um die Module verschattungsfrei mit einer Neigung von 30° in Richtung Süden auszurichten.

In diesem Szenario wäre der Campingplatz an 87 Tagen im Jahr zu 100 % autark, was bedeutet, dass weder Strom in das Netz gespeist, als auch keiner entnommen wird. An 289 Tagen im Jahr reicht der eigens produzierte Strom aus, um einen Autarkiegrad von 100 % zu gewährleisten.

Tabelle 8: Szenario 2 „PV auf Mobilheimen und Freifläche“ - Zusammenfassung

Vorschlag für Szenario 2 Eckdaten	
PV-Leistung [kW _{peak}]	534
Speicherkapazität [kWh]	700
Autarkiegrad [%]	90,4
Eigenverbrauchsanteil [%]	48
Investitionskosten [€]	953.028
Annuität [€/a]	12.140
Jährliche Stromeinsparung [kWh/a]	266.673

5.1.2 Konzept mit unbegrenzter Fläche

In diesem Fall soll gezeigt werden, dass sich auch höhere Autarkiegrade wirtschaftlich erreichen lassen. Da die Einnahmen für die Einspeisung als proportional steigend zur Netzeinspeisung angenommen werden, kann die Erzeugungskapazität als sehr hoch angenommen werden, um auch den Verbrauch bei geringer solarer Einstrahlung bedienen zu können. Hierbei handelt es sich dementsprechend zwar um ein wirtschaftliches Konzept, jedoch ist es für die praktische Umsetzung sowohl aus finanzieller als auch aus platztechnischer Sicht für dieses Objekt ungeeignet.

Ergebnisse

Ebenfalls ist, wie in Tabelle 9 dargestellt, bei einem Autarkiegrad von nahezu 100 % der Eigenverbrauchsanteil mit lediglich 12 % sehr niedrig. Dies bedeutet, dass die meiste durch PV erzeugte elektrische Energie einfach in das Netz gespeist oder in Wärme umgewandelt werden würde. Dieses Szenario dient somit lediglich zur Veranschaulichung, dass ein Autarkiegrad von annähernd 100 % zwar wirtschaftlich machbar, doch nicht praktikabel ist.

Tabelle 9: Szenario bei unbegrenzt verfügbarer Fläche

Anlagen		
PV Fläche	m ²	14.998
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	2.400
Speicherkapazität	kWh	799
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	2.159.710
Speicherkosten	€	539.146
Gesamtkosten	€	2.698.855
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	132.081
Speicher	€/a	32.972
Stromkosten	€/a	200
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	43.194
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	139.738
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	68.511
Gewinne	€/a	208.248
Kosten	€/a	208.247
Annuität	€/a	1
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	859
Netzeinspeisung	kWh	2.183.401
Gesamtproduktion	kWh	2.485.034
Eigenverbrauch	kWh	294.037
Autarkiegrad		99,71%
Eigenverbrauch		12%

5.2 Weitere Ideen zur Umsetzung

In diesem Kapitel werden weitere Ideen zur Umsetzung der Konzepte erläutert. Diese werden jedoch lediglich kurz beschrieben und nicht weiter in dieser Arbeit vertieft.

PV-Regendächer:

Neben den zur Verfügung stehenden Dach- und Freiflächen ließe dich darüber nachdenken, die Regenschutzdächer der Dauercamper, welche von vielen Campern über dem Wohnanhänger installiert werden, durch eine Konstruktion zu ersetzen, bei der der Schutz aus Photovoltaikmodulen gewährleistet wird. Dazu stünden potentiell etwa 250 Regenschutzdächer zur Verfügung, welche jeweils meist 30-40 m² Fläche beanspruchen. Diese Flächen mit PV auszustatten, würde die benötigte Freifläche deutlich kompensieren und eine Verbauung von anderweitig nutzbarer Fläche obsolet machen.

Es könnte dabei zwar zunächst ein Hindernis entstehen, da davon auszugehen ist, dass nicht jeder Dauercamper mit einer bautechnischen Veränderung in Form eines PV-Regendachs einverstanden ist. Doch mit hoher Wahrscheinlichkeit lassen sich Gäste finden, bei denen dies als Pilotprojekt getestet werden kann, und im Falle des Erfolges würden auch andere Gäste dazu inspiriert werden, eine solche Veränderung zuzulassen.

Eine ähnliche Konstruktion könnte bei der Überdachung geplanter Elektroladestationen für Autos in Betracht gezogen werden. Für Gäste würde dadurch das Bild entstehen, dass ihr Auto direkt mit Hilfe der Sonne geladen werden würde. Diese Idee soll aufzeigen, dass es für die Erzeugung von Strom aus solarer Strahlung und der damit verbunden Suche nach nutzbaren Flächen, über die klassischen Dach und Freiflächen hinausgehen kann.

Stufenweiser Ausbau der PV-Anlage:

Ein weiterer Aspekt, der in diesem Zusammenhang als Vorteil zu werten ist, ist der peu à peu stattfindende Ausbau der Anlage. Abhängig der zur Wahl stehenden Angebote für PV-Systeme und Speicher, sollte darüber nachgedacht werden, die Anlage vorerst in kleinerem Maßstab technisch umzusetzen. Die Anlage kann so 1-2 Jahre betrieben werden und dabei wertvolle Daten liefern, welche das Modell und deren Funktion unter Realbedingungen vergleichbar machen.

Ergebnisse

Unterscheiden sich die Ergebnisse im Realbetrieb von denen der Modellierung, so müssen Fehler gesucht und korrigiert werden, welche die Diskrepanz erklären. Dabei kann z.B. auf ein fehlerhaftes Modell oder falsch bzw. schlechte Umsetzung geschlossen werden, wodurch weitere Maßnahmen ergriffen werden können. Nach einer erfolgreichen Testphase, lassen sich Investitionsentscheidungen den Erfahrungswerten anpassen, bevor der Ausbau vorangetrieben wird. Ein zusätzlicher positiver Aspekt, welcher ein Stufenweiser Ausbau mit sich bringt, ist die Reduktion des technischen Risikos. Werden bspw. die PV-Module oder Wechselrichter aus einer Produktion eines Herstellers bezogen, so besteht die Gefahr, dass ein Fehler in der Produktion, zum späteren Ausfall der gesamten Anlage führt. Besteht die Anlage jedoch aus diversen Produktionen, so ist das Risiko eines gleichzeitigen Ausfalls aller Anlagen bedeutend geringer.

Wird bei großen Anlagen ein großer Rabatt gewährleistet, ergibt sich diese Situation im Zweifelsfall nicht, wenn durch den Rabatt, die Kosten für große Anlagen im Verhältnis zu kleinen Anlagen deutlich günstiger sind. Jedoch kann davon ausgegangen werden, dass Preise, insbesondere für Batteriespeicher, in Zukunft weiter fallen werden und so eine Investition in den Ausbau des stationären Speichers in einigen Jahren kostengünstiger als die derzeitigen Kosten sein wird (Jörg Böttcher, 2018, S. 174).

Elektromobilität / Vehicle to Grid:

An einem Standort wie dem Campingplatz Stieglitz, lässt sich darüber nachdenken, Elektrofahrzeuge zur Verfügung zu stellen und diese im Rahmen eines Carsharing-Konzeptes für kurze Touren zu vermieten. Dadurch ließe sich die Notwendigkeit einiger Touristen, ein eigenes Auto vor Ort zu haben, reduzieren und die Anreise mit öffentlichen Verkehrsmitteln wird begünstigt.

Elektroautos bieten dabei weitaus mehr Vorteile als die Mobilität der Campingplatz-Besucher. Sie eignen sich dazu, den durch PV erzeugten Strom zu speichern, um ihn dann im normalen Fahrbetrieb zu verbrauchen. Auch die Möglichkeit, den Strom aus den Batterien zurück ins Netz bzw. an Verbraucher in unmittelbarer Umgebung abzugeben, stellt eine Chance dar, auf klassische stationäre Speichersysteme zu verzichten bzw. deren Kapazität entsprechend zu verringern. Notwendig dafür wird das sogenannte bidirektionale Laden sowie ein gutes

Ergebnisse

Energiemanagement, welches den erzeugten Strom auf die verschiedenen zur Verfügung stehenden Verbraucher und Speicher verteilt (Hans-Martin Henning, 2015, S. 6).

Ausrichtung der Module:

Bei der Ausrichtung der Module ist es ratsam, darauf zu achten, wann durchschnittlich die größte Last am Tag anfällt. Sieht man sich die in Abbildung 5-8 dargestellten Verläufe von Globalstrahlung und Verbrauch an, zeigt sich, dass die Spitzenlast gegen 10 Uhr vormittags anfällt, während der meiste Strom 2 Stunden später um 12 Uhr mittags aus der PV-Anlage erzeugt wird. Somit wäre eine leichte Abweichung der Ausrichtung in Richtung Osten zu überlegen.

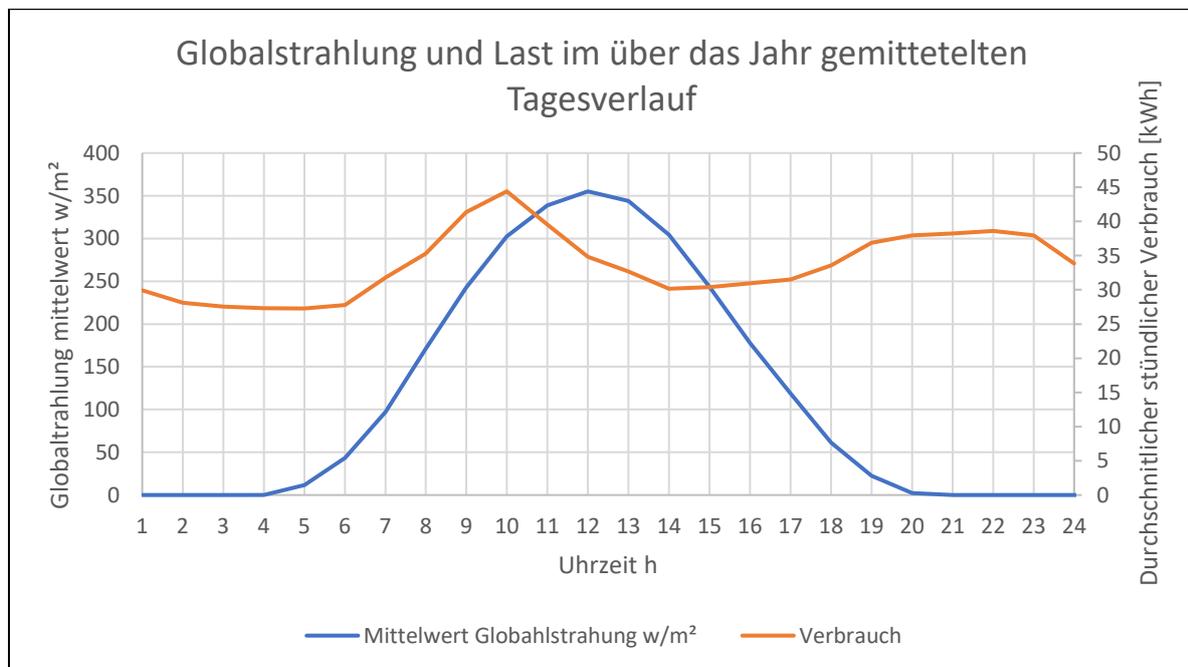


Abbildung 5-8: Tageszeitlicher Mittelwert von Globalstrahlung und Lastprofil

Heranführung der Gäste an das Thema Energieautarkie:

Neben der eigentlichen Realisierung des Projektes sollte der Gast selbst berücksichtigt werden. Dabei sollte die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, Gästen das Thema der Energieautarkie näher zu bringen. Dies könnte unter anderem durch die Möglichkeit zur Besichtigung der Anlage realisiert werden, bei denen die Technik erläutert und so nähergebracht und erlebbar gemacht wird. Es ließe sich ebenfalls darüber nachdenken, an

einem zentralen Ort tagesaktuelle Autarkiegrade auf einer Anzeige darzustellen. Dies würde nicht zuletzt dem Campingplatz ein Alleinstellungsmerkmal verleihen und könnte zusätzlich Gäste dazu animieren, sich näher mit der Thematik zu befassen. Dies könnte Gäste zusätzlich dazu animieren, bewusster auf Ihren Stromverbrauch zu achten und stellt somit gegebenenfalls ein zusätzliches Einsparpotential dar.

5.3 Unterschied des Autarkiegrades Haushalt vs. Campingplatz

Vergleicht man das vorliegende Lastprofil mit einem gemittelten Lastprofil für einen durchschnittlichen Haushalt, so zeigt sich, dass die Profile tendenziell gegenläufig sind. Für den Vergleich wurden Daten für ein „Standardlastprofil Haushalt“ der Stromnetze Berlin herangezogen (Stromnetz Berlin GmbH, 2019). Während der Verbrauch eines normalen Haushaltes während der kalten Jahreszeit am höchsten ist und im Sommer leicht abnimmt, weist das Lastprofil des Campingplatzes ein umgekehrtes Verhalten auf (Abbildung 5-9). Dies begünstigt vor allem die Stromerzeugung durch PV, da der Verlauf besser mit dem über das Jahr gemittelten Dargebot solarer Einstrahlung übereinstimmt.

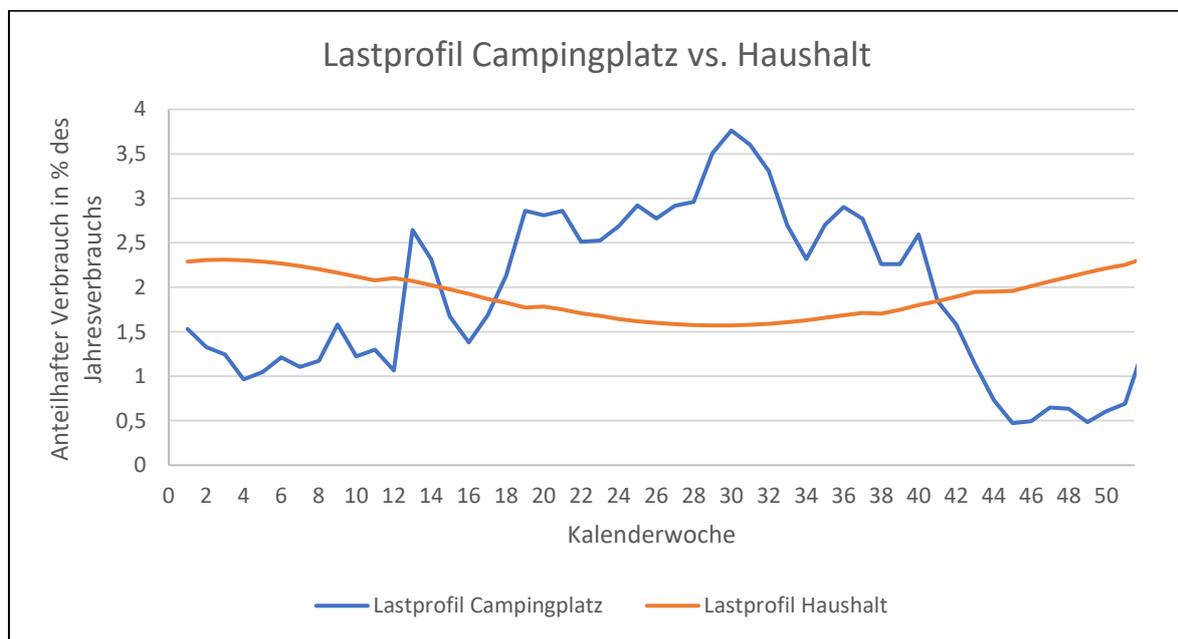


Abbildung 5-9: Vergleich Lastprofil Haushalt vs. Campingplatz
 - aus Darstellungsgründen wurden die Verbrauchswerte jeweils über eine Woche gemittelt

Um zu untersuchen, ob sich der Campingplatz im Vergleich zu einem Haushalt besser für das Modell eignet und sich bessere Ergebnisse in Bezug auf Autarkiegrad und

Ergebnisse

Eigenverbrauchsanteil erzielen lassen, werden in das Modell die Daten eines durchschnittlichen Haushalts übernommen.

Die Fläche für die PV-Anlage wird im selben Verhältnis, wie das der jährlichen Verbräuche verkleinert. Die jährlichen Verbräuche für einen durchschnittlichen Haushalt liegen bei 4.000 kWh und für den Campingplatz bei 294.896 kWh.

Dementsprechend werden die Größe für PV-Anlage und die Speicherkapazität mit einem Umrechnungsfaktor von $\frac{4.000 \text{ kWh}}{294.896 \text{ kWh}} = 0,0136$ multipliziert. Zum Vergleich werden die Ergebnisse aus Szenario 1 und 2 verwendet. Die Größe des Speichers beträgt somit: $400 \text{ kWh} * \frac{4.000 \text{ kWh}}{294.896 \text{ kWh}} = 5,4 \text{ kWh}$.

Da es sich bei einem Verbrauch von 4000 kWh/a um einen Normalverbraucher handelt, werden für die Annuität Stromkosten von 30,5 Cent/kWh angenommen (Siehe Abbildung 5-12). Da die Erzeugungsanlage dabei kleiner ausfällt als $10 \text{ kW}_{\text{peak}}$, so wird auch keine EEG-Umlage auf den Eigenverbrauch fällig.

Für das Szenario 1 und 2 ergeben sich dadurch folgende Ergebnisse:

Tabelle 10: Vergleichswerte Campingplatz mit SLP H0

	Szenario 1 angepasst	Szenario 2 angepasst
PV-Leistung [kW_{peak}]	3,3	7,2
Speicherkapazität [kWh]	5,4	9,5
Autarkiegrad [%]	55,4 (64*)	73,2 (90,4*)
Eigenverbrauchsanteil [%]	66,0 (84*)	39,0 (50*)
Investitionskosten [€]	6.592,0	12.926,0
Annuität [€/a]	286,0	260,0
Jährliche Stromeinsparung [kWh/a]	2.218,0	2.927,0

* Ergebnisse beim Campingplatz

Der Vergleich des Autarkiegrades des Campingplatzes mit dem eines Haushalts, weist beim Szenario 1 einen signifikanten Unterschied von 9 % auf. Stellt man diesen Vergleich bei Szenario 2 an, so ergibt sich ein um 17 % geringerer Autarkiegrad. Dies offenbart somit eine begünstigte Eignung des saisonalen Betriebs auf dem Campingplatz und eine bessere Übereinstimmung des Verbrauchs mit dem Erzeugungsprofil.

In Abbildung 5-10 wird deutlich, dass hauptsächlich die Wintermonate nicht mit PV-Strom zu versorgen sind. Aufgrund der kürzeren Tage und der niedrig stehenden Sonne ist die Summe

Ergebnisse

der Globalstrahlung zu niedrig, um einen nennenswerten Beitrag zur Stromerzeugung zu leisten. Während in den Monaten von September bis April zu wenig Strom produziert wird und somit dieser aus dem Netz bezogen wird, entsteht von April bis August ein Überschuss, welcher in das Netz eingespeist wird. Durch den Saisonbetrieb des Campingplatzes wird wenig Strom im Winter, dafür jedoch viel Strom im Sommer benötigt. Daraus resultiert die bessere Eignung für die Versorgung mit PV-Strom.

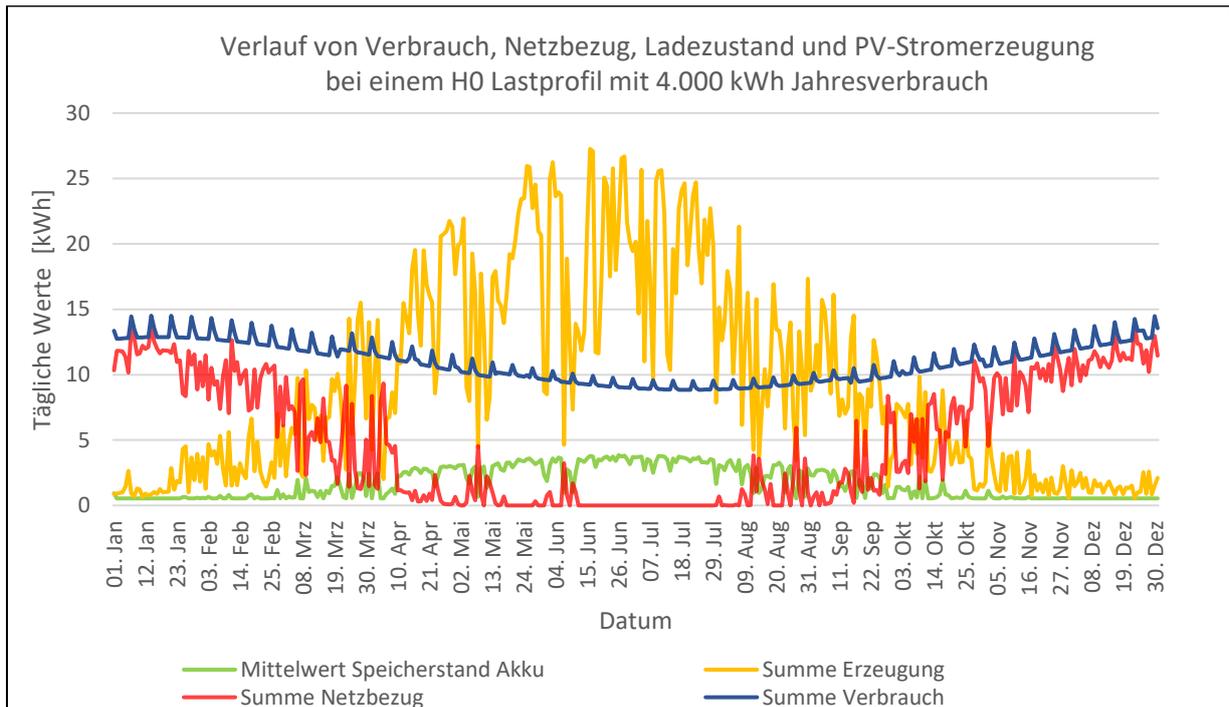


Abbildung 5-10: Verlauf von Verbrauch, Netzbezug, Ladezustand und PV-Stromerzeugung - bei einem H0 SLP mit 4.000 kWh Jahresverbrauch

5.4 Komplette Autarkie

In diesem Szenario soll gezeigt werden, welche Kapazitäten benötigt würden, um sowohl einen Autarkiegrad als auch einen Eigenverbrauchsanteil von 100 % zu gewährleisten. Dies würde einem komplett autarken System entsprechen.

Zunächst wird dabei davon ausgegangen, dass zur Erreichung eines 100%igen Eigenverbrauchsanteils eine Stromerzeugung gegeben sein muss, die dem Verbrauch entspricht. Zu diesem Zweck wird die Größe der PV-Anlage so gewählt, dass diese den benötigten Strom bilanziell für das Jahr erzeugt. Dementsprechend wird der notwendige Speicherbedarf eruiert.

Ergebnisse

Bei diesem Szenario handelt es sich um ein rein theoretisches Modell mit optimalen Annahmen. Der Speicher hat dabei keinerlei Verluste, da durch die im Speicher auftretenden Verluste der Gesamtstrombedarf steigen würde, welcher mit steigender Kapazität proportional zunimmt. Ebenfalls kann der Speicher zu 100 % be- und entladen werden.

Unter diesen Annahmen ergeben sich in dem Modell die in Tabelle 11 dargestellten Parameter. Für eine PV-Anlage mit einer Leistung von 284,8 kW_{peak} wäre eine Speicherkapazität von knapp 55.000 kWh notwendig. Damit wäre zumindest auf dem ersten Blick und unter der Annahme eines absolut verlustfreien Systems ein autarkes System gewährleistet.

Tabelle 11: Ergebnisse 100 % Autarkie

Anlagen		
PV Fläche	m ²	1.780
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	285
Speicherkapazität	kWh	54.985
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	256.320
Speicherkosten	€	37.114.875
Gesamtkosten	€	37.371.195
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	15.676
Speicher	€/a	2.269.824
Stromkosten	€/a	0
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	5.126
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	0
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	68.711
Gewinne	€/a	68.711
Kosten	€/a	2.290.626
Annuität	€/a	-2.221.915
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	0
Netzeinspeisung	kWh	0
Gesamtproduktion	kWh	294.930
Eigenverbrauch	kWh	294.896
Autarkiegrad		100,00%
Eigenverbrauch		100,00%

Ergebnisse

Bei genauer Betrachtung des in Abbildung 5-11 in grün dargestellten Verlaufs des Speicherladezustands zeigt sich, weshalb bei diesem Szenario eine so große Speicherkapazität notwendig ist. Zu Beginn des Jahres benötigt der Speicher bereits Energie, um den Bedarf im Laufe der Wintermonate zu decken. Dieser wird auf 20.361 kWh festgelegt, da dies dem Strombedarf bis Anfang April entspricht. Ab Anfang April kommt es zu einem dauerhaften Überschuss an Energie und der Speicher wird bis in den August weiter bis zu seiner Kapazitätsgrenze geladen. Diese darf jedoch nicht überschritten werden, da sonst die Energie ins Netz gespeist und später wieder aus dem Netz bezogen werden müsste.

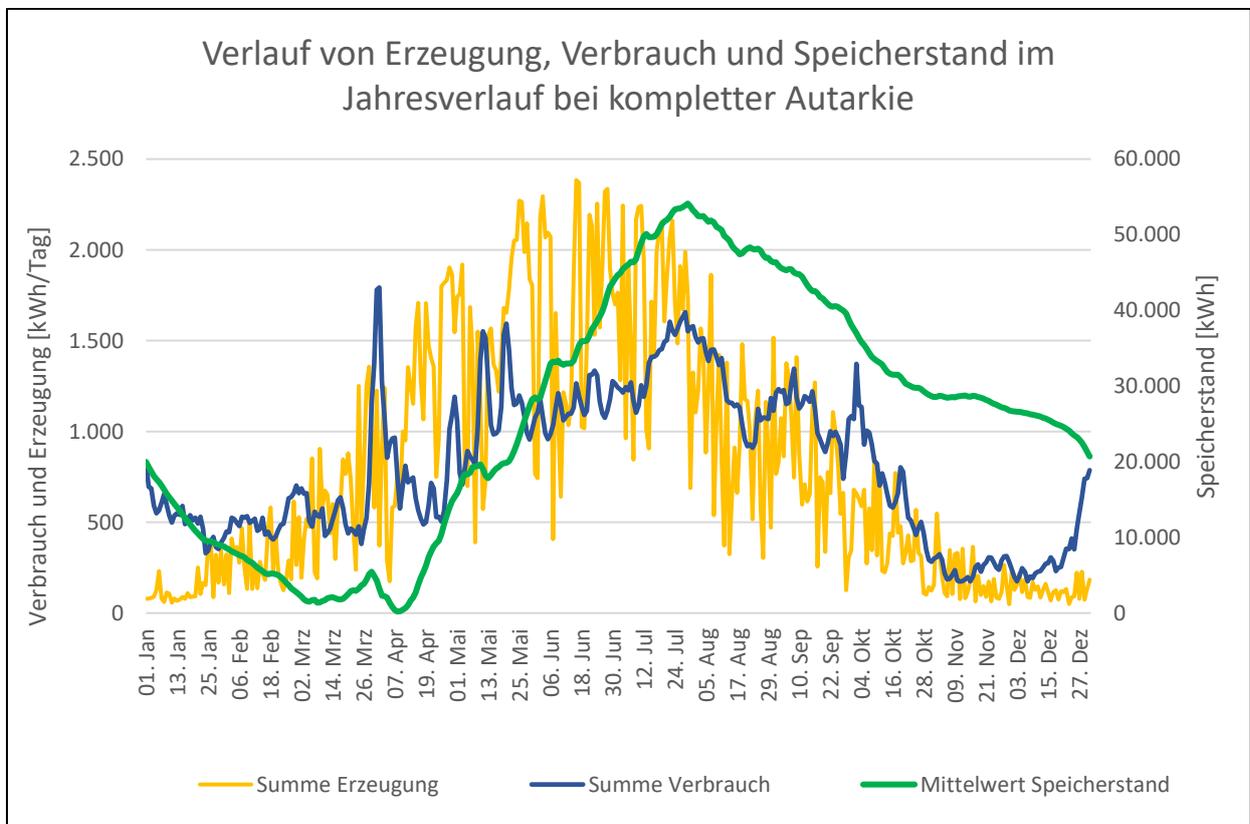


Abbildung 5-11: 100 % Autarkie - Verlauf von Verbrauch, Erzeugung und Ladezustand

Das Szenario der kompletten Energieautarkie, zeigt wie kompliziert dieses zu realisieren ist. Im Falle der Stromerzeugung durch PV wird deutlich, welche Speicherkapazitäten notwendig wären, um den tatsächlichen Bedarf zu decken. Im Realbetrieb müssten der Speicher und die PV-Anlage größer sein als in diesem zur Veranschaulichung erstellten Szenario, um die auftretenden Verluste zu kompensieren.

Ebenfalls stellt sich die Frage, inwiefern ein komplett autarkes System innerhalb eines großen Versorgungsnetzes überhaupt sinnvoll wäre. Die Vorteile eines solchen Systems sind vor allem die Unabhängigkeit von öffentlichen Stromanbietern und die Nähe von Erzeugung und Verbrauch, wodurch Kapazitäten zur Stromübertragung obsolet werden. Jedoch ist anzunehmen, dass ein System mit wenigen Anlagen anfällig für Ausfälle ist, da für den Ausfall einer Anlage kaum Möglichkeiten besteht, diese zu kompensieren.

Dies ist der Vorteil eines großen Verbundsystems, bei dem der Ausfall einer Erzeugungsanlage durch andere Anlagen ausgeglichen wird. Aufgrund der nötigen Zuverlässigkeit der Energieversorgung ist es daher am einfachsten, an das Verbundnetz angeschlossen zu sein, um den Austausch von Energie zu ermöglichen. Im Falle eines Ausfalls im Stromnetz, besteht dann Möglichkeit der zeitweisen kompletten Versorgung aus eigener Produktion.

Dieses Szenario zeigt, dass die Realisierung eines 100%igen Autarkiegrades mit Kombination aus PV-Anlage und Batteriespeicher weit davon entfernt ist, ökonomisch mit dem Stromnetz zu konkurrieren. Für eine komplette Autarkie müssten sich unterschiedliche Technologien ergänzen. Durch andere Technologien, die entweder bedarfsgerecht oder zu anderen Zeiten ihre Leistung erzeugen, wie z.B. Windkraft oder Biomasse, wäre die Umsetzung ggf. leichter realisierbar.

5.5 Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Standorte in Europa

Wie in Kapitel 4.2 erwähnt, spielen bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vor allem die Strom- und Investitionskosten eine Rolle. Neben den Stromkosten sind allerdings auch die geographischen Aspekte bzw. das Dargebot erneuerbarer Energie von entscheidender Bedeutung. Bei der Frage der Übertragbarkeit der Konzepte aus Kapitel 5.1 werden diese beiden Punkte in Bezug auf die Globalstrahlung und den Strompreis herangezogen.

Betrachtet man die in Abbildung 5-12 dargestellten Strompreise in Europa, so steht Deutschland mit durchschnittlich 30,5 Cent/kWh als Spitzenreiter bei den Strompreisen für Normalverbraucher da. Daraus resultiert ein besonderer finanzieller Anreiz, Strom aus eigenen Quellen zu produzieren und zu nutzen. Ebenfalls zeichnet sich (mit einigen Ausnahmen) der deutliche Trend ab, dass die Preise für netzbezogenen Strom stetig steigen.

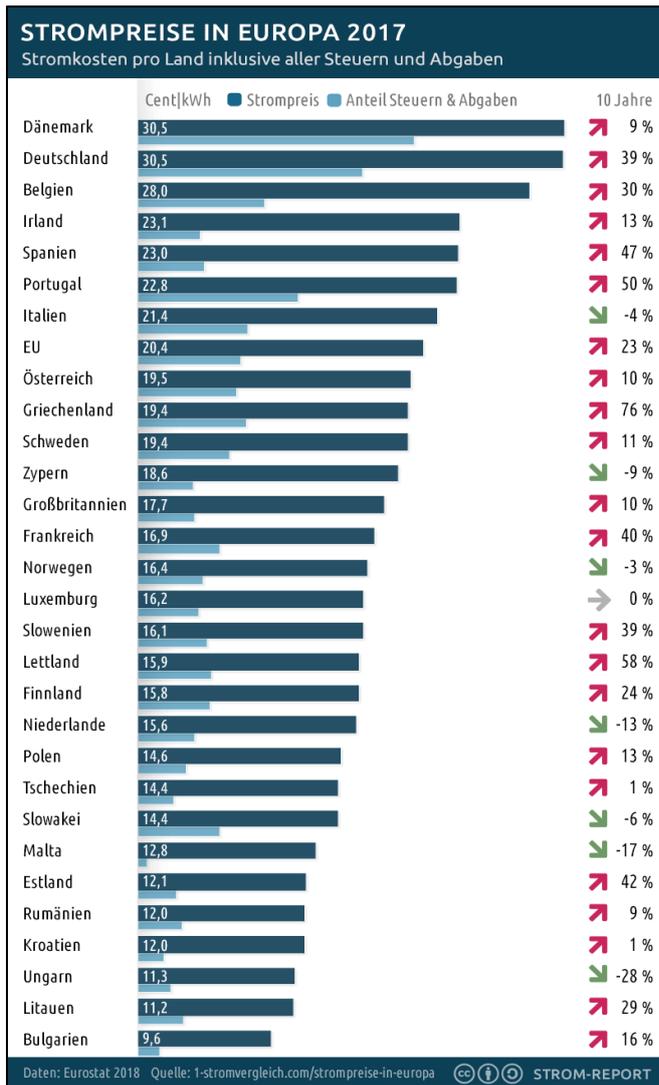


Abbildung 5-12: Strompreise Europa
Quelle: (1-Stromvergleich.com, 2019)

In der Abbildung 5-13 wird durch die farbliche Darstellung der Europakarte die unterschiedliche Strahlungsbilanz je nach Standort veranschaulicht. Diese variiert deutlich in Abhängigkeit des Breitengrades. Südliche Länder zeichnen sich dabei um eine weitaus höhere solare Einstrahlung im Vergleich zu nördlicher gelegenen aus. Deutschland befindet sich dabei europaweit gesehen im Mittelfeld mit etwa 900-1100 kWh/m² jährlich.

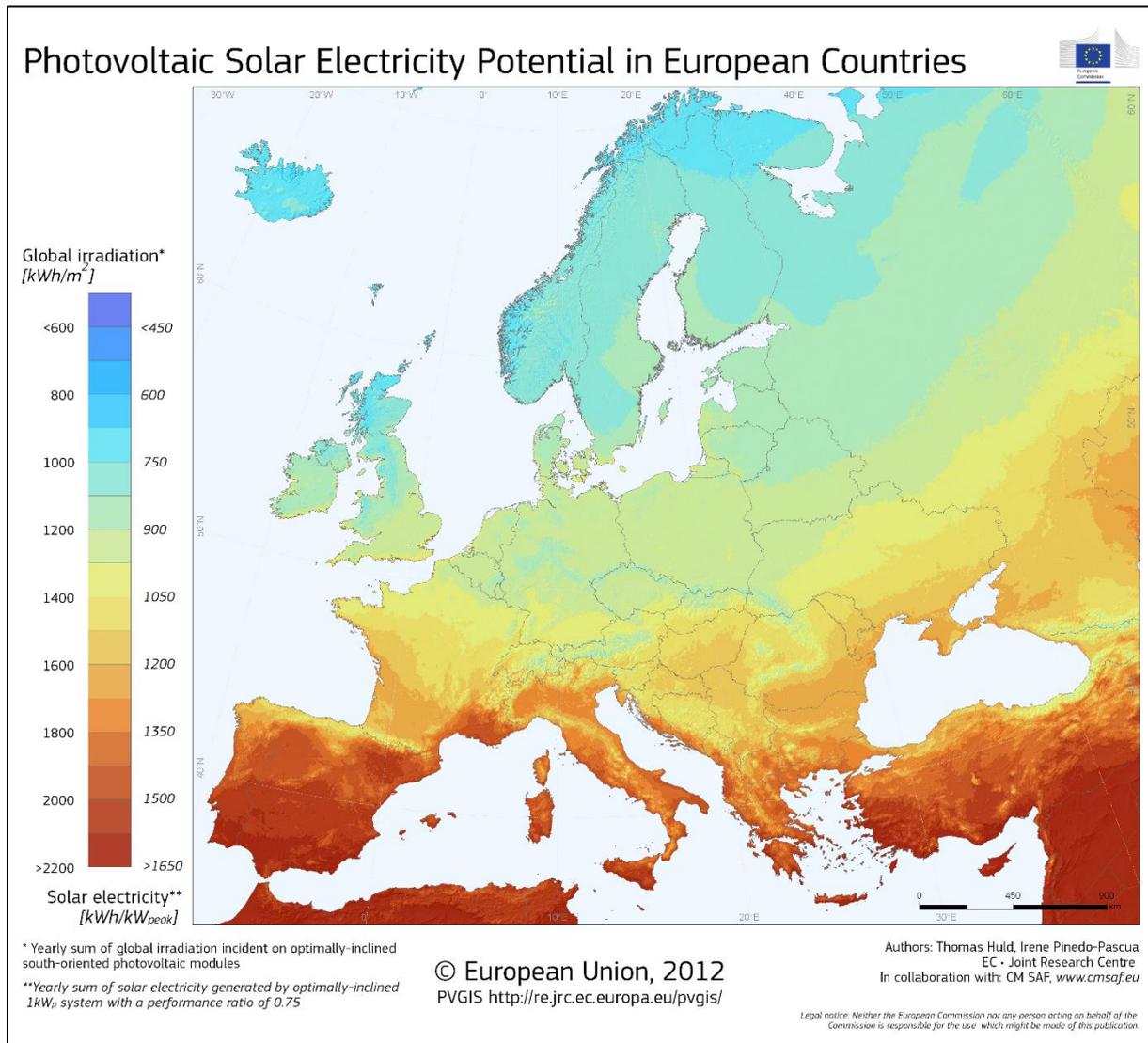


Abbildung 5-13: Solare Einstrahlung Europa
Quelle: (PVGIS, 2017)

Für die Realisierung der Konzepte bieten sich besonders Länder mit hoher jährlicher Strahlungsbilanz und/oder hohen Strompreisen an. Gleicht man die Daten aus Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13 ab, so bieten besonders Portugal, Spanien und Italien eine gute Kombination aus beidem. Dabei liegt die Summe der jährlichen Globalstrahlung im Süden dieser Länder bei über 2.000 kWh/m². Der Strompreis liegt mit 21,4 Cent/kWh (Italien) und ca. 23 Cent/kWh (Spanien und Portugal) etwas über dem EU-Durchschnitt von 20,5 Cent/kWh.

Um die prinzipielle Übertragbarkeit des Konzeptes auf andere Standorte zu verdeutlichen, wird beispielhaft ein Standort auf Sizilien in der Nähe von Syrakus näher betrachtet. Hier befinden sich einige Campingplätze (Camping.Info, 2019).

Ergebnisse



Abbildung 5-14: Standortwahl für Beispielort Sizilien
Quelle: (PVGIS, 2017)

Die Daten für ein typisches meteorologisches Jahr werden wie bereits im Kapitel 3.3 vom PVGIS bezogen. Die Globalstrahlung dient als Referenz für den Ertrag aus Photovoltaikstrom und wird in das Modell übernommen. Man erkennt bereits in der Abbildung 5-15 des jährlichen Strahlungsverlaufs, dass diese in den Wintermonaten im Vergleich zu Norddeutschland deutlich intensiver ist. Auch im Sommer ist die Strahlungsbilanz in Norddeutschland größeren Schwankungen unterlegen, wodurch in Summe etwas weniger Strom erzeugt werden kann.

Ergebnisse

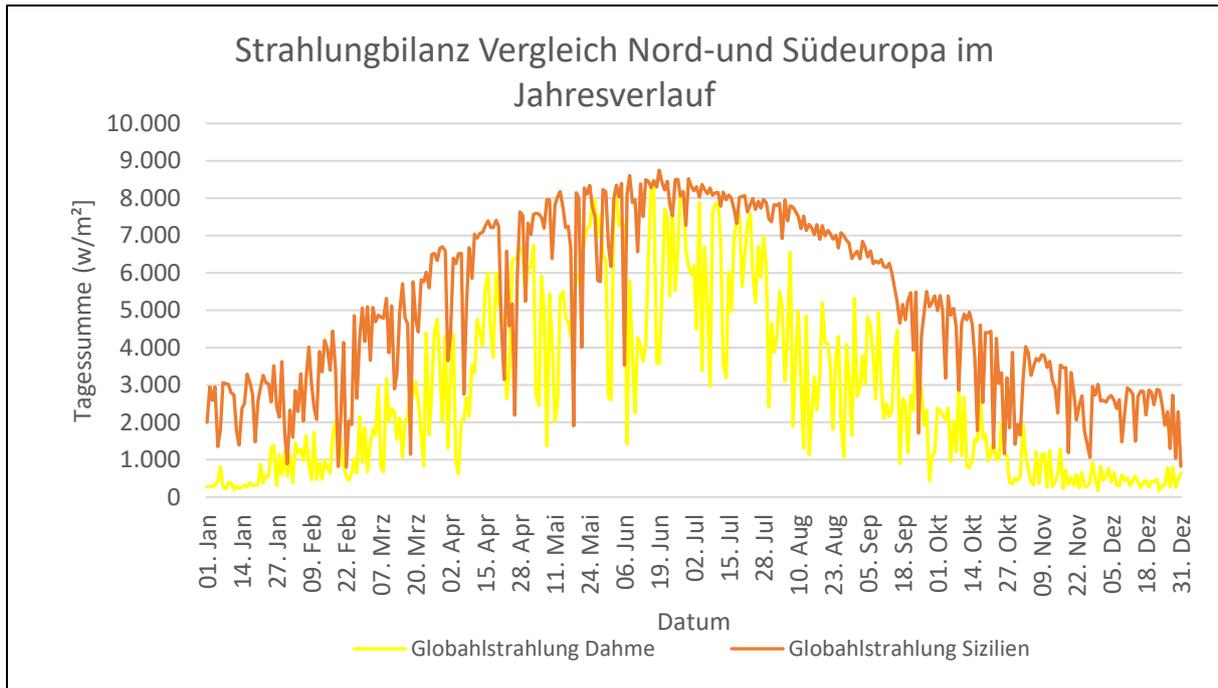


Abbildung 5-15: Strahlungsbilanz - Vergleich Nord- und Südeuropa im Jahresverlauf

Für den Vergleich werden als Stromkosten die in Abbildung 5-12 dargestellten Kosten von 21,4 Cent/kWh angenommen und in das Modell übernommen. Um einen direkten Vergleich zu den vorangegangenen Szenarien zu ermöglichen, werden dieselben kW_{peak} -Leistungen zur Stromerzeugung wie in Kapitel 5.1.1 als Referenz herangezogen.

Mit den Strahlungswerten ergeben sich daraus folgende in Tabelle 12 dargestellten Ergebnisse für Autarkiegrad und Eigenverbrauch. Dabei zeigt sich, dass der Standort signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Bei Szenario 1 mit einer 1.500 m² großen PV-Anlage mit 240 kW_{peak} ergibt sich in diesem Szenario ein Autarkiegrad von 82,14 % im Vergleich zu 64 % bei gleicher Konstellation in Norddeutschland. Der Eigenverbrauchsanteil sinkt dabei jedoch von 64 % auf 54 %. Grund dafür ist die durch die intensivere Einstrahlung resultierende höhere Stromerzeugung, welche bei gleichbleibendem Verbrauch eingespeist oder in Wärme umgewandelt werden kann.

Ergebnisse

Tabelle 12: Ergebnisse Szenario 1 für Südeuropa

Anlagen		
PV Fläche	m ²	1.500
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	240
Speicherkapazität	kWh	400
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	216.000
Speicherkosten	€	270.000
Gesamtkosten	€	486.000
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	13.210
Speicher	€/a	16.512
Stromkosten	€/a	11.268
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	4.320
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	12.947
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	51.840
Gewinne	€/a	64.787
Kosten	€/a	34.042
Annuität	€/a	30.745
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	52.655
Netzeinspeisung	kWh	202.297
Gesamtproduktion	kWh	449.915
Eigenverbrauch	kWh	242.242
Autarkiegrad		82,14%
Eigenverbrauch		54%

Der Vergleich mit Szenario 2 (Tabelle 13) macht den Standortvorteil in südlichen Regionen umso deutlicher. Bei einem Autarkiegrad von knapp 98 % lassen sich in diesem Fall jährlich 39.010 € als Gewinn verbuchen. Selbst bei rein wirtschaftlicher Betrachtung und Außerachtlassung aller ökologischen Aspekte, ist dieses Modell dadurch an dem betrachteten Standort der reinen Versorgung durch das Verbundnetz vorzuziehen. Weitere positive Aspekte, wie der Imagevorteil und vermiedene Folgekosten durch Umweltauswirkungen konventioneller fossiler Energiegewinnung, würden den Anreiz zur Umsetzung eines solchen Konzeptes weiter erhöhen.

Ergebnisse

Tabelle 13: Ergebnisse Szenario 2 für Südeuropa

Anlagen		
PV Fläche	m ²	3.337
Wirkungsgrad PV	%	16%
PV Leistung	kW _{Peak}	534
Speicherkapazität	kWh	700
Investitionskosten		
Absolute Kosten PV	€	480.528
Speicherkosten	€	472.500
Gesamtkosten	€	953.028
Jährliche Kosten (20 Jahre Laufzeit)		
PV	€/a	29.388
Speicher	€/a	28.897
Stromkosten	€/a	1.299
Kosten Wartung / Versicherung	€/a	9.611
Einnahmen durch Netzeinspeisung	€/a	45.095
Einsparung durch Eigenverbrauch	€/a	61.809
Gewinne	€/a	106.904
Kosten	€/a	67.895
Annuität	€/a	39.010
Verbrauch und Erzeugung		
Verbrauch	kWh	294.896
Netzbezug	kWh	6.068
Netzeinspeisung	kWh	704.614
Gesamtproduktion	kWh	1.000.911
Eigenverbrauch	kWh	288.828
Autarkiegrad	97,94%	
Eigenverbrauch	29%	

In Tabelle 14 wird noch einmal der Vergleich der beiden Standorte verdeutlicht.

Tabelle 14: Vergleich der Ergebnisse in Norddeutschland mit Süditalien

	Szenario 1 Sizilien	Szenario 2 Sizilien
PV-Leistung [kW _{peak}]	240	543
Speicherkapazität [kWh]	400	700
Autarkiegrad [%]	<u>82,4</u> (64*)	<u>97,9</u> (90,4*)
Eigenverbrauchsanteil [%]	54,0 (76*)	29,0 (50*)
Annuität [€/a]	30.745	39.010
Jährliche Stromeinsparung [kWh/a]	242.242	288.828

*Werte in Dahme

Nach eingehender Betrachtung des Vergleichs beider Standorte lässt sich abschließend festhalten, dass der Standort einen sehr hohen Einfluss auf die Effizienz eines solchen Systems

Ergebnisse

hat. Auch in diesem Zusammenhang zeigt sich, dass mit steigendem Autarkiegrad, jede weitere Steigerung mit höherem Aufwand verbunden ist. Während das Szenario mit kleiner Anlage, im Süden einen um ca. 18 % gesteigerten Autarkiegrad aufweist, lässt sich bei dem Szenario 2 nur eine Steigerung von 7,5 % erreichen. Bewertet man die beiden Szenarien in diesem Fall nach deren Wirtschaftlichkeit, so besteht die Möglichkeit weitere Speicher installieren und eine positive Annuität beizubehalten. Szenario 2 lässt sich so beispielsweise durch den Zubau um weiterer 518 kWh Akkukapazität auf 100 % Autarkiegrad erweitern. Die Annuität halbiert sich dabei auf 18.500 €/a.

Abschließend lässt sich festhalten, dass obwohl bereits in Norddeutschland eine wirtschaftliche Umsetzung möglich ist, in anderen Ländern ein weitaus größeres Potential besteht ein solches Konzept umzusetzen. Besonders sonnenreiche Gegenden bieten sich optimal für die Versorgung mit PV-Strom an.

6 Fazit und Ausblick

Die eingangs gestellten Forschungsfragen konnten im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit beantwortet werden. Nach einer Analyse der verfügbaren Technologien und der Rahmenbedingungen des betrachteten Objektes konnte eine Vorauswahl für Erzeugungs- und Speichertechnologien für den Campingplatz Stieglitz getroffen werden. Nach Evaluierung der Kosten für Photovoltaik und Li-Ionen Akkumulatoren konnte mithilfe des entwickelten Excel-Modells gezeigt werden, dass sich durch Stromerzeugung aus Photovoltaik in Kombination mit einem Speichersystem, ein signifikanter Teil des Strombedarfs decken lässt.

In dieser Arbeit konnte dargelegt werden, dass Autarkiegrade von über 90 % über eine Laufzeit von 20 Jahren tragfähig und sogar kostengünstiger als netzbezogener Strom ist. Je nach verfügbarer Fläche lassen sich wirtschaftliche Konzepte an dem untersuchten Campingplatz realisieren, jedoch nimmt der Autarkiegrad mit kleiner werdenden Flächen sukzessive ab. Werden nur die Dächer der Mobilheime für die Installation von PV verwendet, ließe sich ein Autarkiegrad von 71 % ökonomisch erreichen.

Essentiell für die Erreichung hoher Autarkiegrade ist die zeitliche Übereinstimmung von Erzeugung und Verbrauch. Es konnte zu dieser Problematik gezeigt werden, dass der saisonale Betrieb des Campingplatzes ein besseres Potential zur Deckung des Strombedarfs aus PV-Strom bietet als ein ganzjähriger Betrieb. Im Vergleich zu Haushalten lassen sich bei im Verhältnis gleicher Erzeugungs- und Speicherkapazität bessere Autarkie- und Eigenverbrauchswerte erzielen. Dies führt durch den geringeren Bedarf an netzbezogenem Strom zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und ist dadurch, neben ökologischen Gesichtspunkten, aus heutiger Sicht ein zusätzlicher Anreiz ein solches System zu installieren.

Die Frage nach einer komplett autarken Lösung konnte in dieser Untersuchung für den Campingplatz als ökonomisch nicht tragbar deklariert werden. Die saisonale Diskrepanz von Erzeugung und Verbrauch erfordert Speicherkapazitäten, welche sich selbst unter Idealbedingungen ohne Verluste, nicht durch aktuelle Akkutechnologie wirtschaftlich realisieren lassen. Der technische Aufwand für die Steigerung des Autarkiegrades nimmt dabei exponentiell zu, je näher man an 100 % gelangt.

Bei der Frage der Übertragbarkeit auf andere Standorte konnte anhand eines Beispiels dargelegt werden, dass sich das Konzept im Süden Europas deutlich besser umsetzen lässt. Neben dem Strompreis spielt vor allem die höhere Sonneneinstrahlung eine zentrale Rolle, welche bei gleicher Erzeugungskapazität knapp 80 % mehr Stromertrag generiert. Somit stellt das Konzept besonders für strahlungsreiche Regionen eine wirtschaftliche Alternative zur konventionellen Stromversorgung dar.

Die vorliegende Masterarbeit hat erstmals die mögliche Umsetzung eines energieautarken Systems beim Campingplatz Stieglitz untersucht und schließt somit eine Forschungslücke. Dabei lassen sich die Konzepte auch auf Campingplätze mit ähnlichen Gegebenheiten anwenden. Es wird eine Vielzahl an Fragen, die im Rahmen von energieautarken Konzepten gestellt werden können, beantwortet. Jedoch resultieren aus der Arbeit auch weitere Fragestellungen, die mithilfe weiterer Forschung und Erfahrungswerten aus der Praxis beantwortet werden können.

Offen bleibt z.B. die Frage, wie sich andere Erzeugungs- und Speichertechnologien an anderen Standorten unter anderen Rahmenbedingungen in ein autarkes Energiesystem integrieren lassen. Da sich die Anwendung weiterer Technologien, wie Wind, Wasser und Biomasse, an dem untersuchten Standort als nicht praktikabel erweist, wurden diese nicht näher betrachtet.

Zudem wurden einzelne Ideen zur Umsetzung lediglich kurz erläutert. Diese umzusetzen bedarf weiterer Forschung, z.B. bei der Elektromobilität als Teil des Systems. Um PV-Regendächer zu installieren, bedarf es einer genauen Planung der Konstruktionen. Ideen um die Gäste an das Thema heranzuführen, sollten ebenfalls im Detail entwickelt werden.

Die Frage, wie ein größtenteils energieautarker Campingplatz von Gästen angenommen wird und sich auf die Gästeanzahl und deren Zahlungsbereitschaft auswirkt, wurde nicht näher betrachtet. Es ist davon auszugehen, dass sich ein „grünes Image“ des Campingplatzes positiv hierauf auswirkt und somit die Umsetzung eines energieautarken Konzeptes weiter begünstigt wird. Auch Autarkiegrade, die sich im Rahmen des Excel-Modells als unökonomisch erweisen, könnten sich durch diesen Zusammenhang als tragbar herausstellen. Die voraussichtliche Attraktivität des Campingplatzes im Vergleich zu Campingplätzen mit konventioneller

Fazit und Ausblick

Stromversorgung, ließe sich auch im Vorhinein durch Befragung der Gäste als empirische Untersuchung bewerten. Die Ergebnisse könnten gegebenenfalls dazu genutzt werden, die Konzepte anzupassen.

Durch die aktuelle gesellschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung wächst das Umweltbewusstsein. Durch das Fortschreiten des Klimawandels und zunehmenden Umweltproblematiken ist davon auszugehen, dass sich diese Entwicklung auch in Zukunft weiter fortsetzen wird. Dabei ist es auch Aufgabe der Politik, gute Rahmenbedingungen für die Transformation der Energiewirtschaft zu schaffen. Beispielsweise sollte die EEG-Umlage auf eigenverbrauchten Strom abgeschafft werden, um so den Anreiz für die eigene Stromproduktion nicht zu bremsen. Dies würde unverzüglich eine erhöhte Wirtschaftlichkeit für die eigene Stromproduktion im Vergleich zu der derzeitigen Situation zur Folge haben.

Würde sich der Preisanstieg für netzbezogenen Strom in gleicher Weise die nächsten Jahre fortsetzen wie die letzten 10 Jahre, so könnte dies einen steigenden Anteil an privaten PV-Anlagen nach sich ziehen. Auch heute lassen sich (wie in Kapitel 5.3 erörtert) PV-Anlagen mit einem Stromspeicher wirtschaftlich betreiben. Durch steigende Stromkosten nimmt dieser Anreiz zu und so könnte sich das Interesse an diesem Thema steigern.

Zusätzlich ist davon auszugehen, dass besonders die Speichertechnologie in den nächsten Jahren günstiger wird und sich somit das monetäre Einsparpotential erhöht. Auch die PV-Module könnten in Zukunft noch etwas günstiger werden. Allerdings tragen hier die reinen Modulkosten nur 45 % zum Gesamtpreis bei, wodurch sich deren Preisverfall nicht mehr ganz so stark auf die Wirtschaftlichkeit auswirken sollte (Fraunhofer ISE, 2019, S. 8).

Aus heutiger Sicht sollten alle Bemühungen unternommen werden, um fossile Energieträger zu ersetzen. Dass die Annahmen des IPCC korrigiert werden müssen, da aktuelle Messungen auf eine schnellere Erwärmung hindeuten als angenommen, ist bereits einige Male passiert und kann auch in Zukunft wieder vorkommen (Müller-Jung, 2019, S. 1). Wie schnell der Klimawandel tatsächlich voranschreitet, können wir heute nicht mit Gewissheit vorhersagen. Die Möglichkeit einen Teil des Energiebedarfs aus eigener Produktion erneuerbarer Energie zu verbrauchen und so fossile Energieträger zu ersetzen, stellt dabei eine gute Möglichkeit dar, sich aktiv für eine Vermeidung von Treibhausgasen einzusetzen.

Literaturverzeichnis

- AEE, Agentur für Erneuerbare Energie. (12 2017). *ERNEUERBARE ENERGIEN IN BÜRGERHAND*. Abgerufen am 07. 10 2019 von https://www.unendlich-viel-energie.de/media/image/21541.AEE_Eigentuemersstruktur_Photovoltaik_2016_Jan18_72dpi.jpg
- AGEB, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen. (01 2018). *Zusammenfassung Anwendungsbilanzen für die Energiesektoren 2013-2016, Stand: 01/2018*. Abgerufen am 06. 10 2019 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte>
- Andreas Bloess, W.-P. c. (2018). Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies,. In *Applied Energy* (S. 1611-1626). Berlin: Elsevier.
- Andreas Ratka, S. H.-W. (2015). *Technik Erneuerbarer Energien*. Stuttgart: UTB GmbH.
- Bankengruppe, K. (01. 06 2019). *Konditionenübersicht für Endkreditnehmer*. Von <https://www.kfw-formularsammlung.de/Konditionenanzeiger/Net/KonditionenAnzeiger?ProgrammNameNr=270> abgerufen
- BDEW, B. d.-u. (19. 06 2019). *BDEW*. Von https://www.bdew.de/media/documents/20190626_BDEW-Zahl-der-Woche-Beitrag-Erneuerbare-Energien-Stromverbrauch.pdf abgerufen
- Bernhard Weller, C. H. (2009). *Photovoltaik, Technik Gestaltung Konstruktion*. Regensburg: Detail.
- BMU, B. f. (23. 05 2018). *BMU*. Von <https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundesregierung-fuehrt-beschleunigten-atomausstieg-konsequent-fort/> abgerufen
- BMWi. (08 2019). *Bundesministerium für Wirtschaft und Energie*. Von https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/entwicklung-der-erneuerbaren-energien-in-deutschland-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=25 abgerufen
- BMWi, B. f. (2010). *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Berlin, Berlin, Deutschland.
- BMWi, B. f. (02 2018). *Erneuerbare Energien*. Von <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> abgerufen
- Brühne, T. (2008). *Erneuerbare Energie als Herausforderung für Geographiedidaktik*. Köln: VS Reserch.
- Bundesministerium für Umwelt, N. B. (2008). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*. Von https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/aussenanlagen/neubau/v_2016/BNB_AA_2016_121.pdf abgerufen
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (02 2015). *Die Energiewende – ein gutes Stück Arbeit, Offshore-Windenergie, Ein Überblick über die Aktivitäten in Deutschland*. Abgerufen am 24. 05 2019 von www.erneuerbare-energien.de: [https://www.erneuerbare-](https://www.erneuerbare-energien.de)

Literaturverzeichnis

- energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/offshore-windenergie.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. (2019). *bmwi*. Von Förderung Energiespeicher: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Energie/foerderung-energiespeicher.html> abgerufen
- Bundesnetzagentur. (05 2019). *Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen*. Von <https://www.bundesnetzagentur.de>: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/EEG_Registerdaten/EEG_Registerdaten_node.html abgerufen
- Bundesnetzagentur. (2019). *Anzulegende Werte für Solaranlagen August bis Oktober 2019*. Abgerufen am 06. 10 2019 von [https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/ Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/PV_Dat enmeldungen/DegressionsVergSaetze_08-10_19.xlsx?__blob=publicationFile&v=2](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/PV_Dat enmeldungen/DegressionsVergSaetze_08-10_19.xlsx?__blob=publicationFile&v=2)
- Bundesnetzagentur. (01 2019). *EEG Registrierdaten und Fördersätze*. Abgerufen am 07. 10 2019 von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/ Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/VOeFF _Registerdaten/2019_01_Batteriespeicher.xlsx;jsessionid=FE1784CDC4502BE09EE 39D4C4DA5DAFD?__blob=public
- Bundesnetzagentur. (2019). *EEG Registrierdaten und Fördersätze*. Von https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/ Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDatenInformationen/PV_Dat enmeldungen/DegressionsVergSaetze_08-10_19.xlsx?__blob=publicationFile&v=2 abgerufen
- C. Bleske, R. H. (2009). Untersuchung zum optimalen Reihenabstand. Berlin. Von https://www.valentin-software.com/sites/default/files/banz_2009_optimaler_reihenabstandcd_version.pdf abgerufen
- Camping Stieglitz. (2019). *Platzplan*. Abgerufen am 06. 10 2019 von <http://camping-stieglitz.de/wp-content/uploads/2011/01/VS-Fly-Stieglitz.pdf>
- Camping.Info. (03. 10 2019). *Camping.Info*. Von <https://www.camping.info/italien/sizilien/campingplaetze> abgerufen
- Caravaning Industrie Verband e.V. (2019). *CIVD*. Von Studie zum Caravaning-Tourismus in Deutschland: <https://www.civd.de/artikel/studie-zum-caravaning-tourismus-in-deutschland/> abgerufen
- CHRISTOPH KOST, S. S. (03 2018). *Stromgestehungskosten Erneuerbar Energie*. Von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE_2018_ISE_Studie_Stromgestehungskosten_Erneuerbare_Energien.pdf abgerufen
- Deutsches Klimarechenzentrum GmbH. (Oktober 2014). *Deutsches Klimarechenzentrum*. Von Globale Mitteltemperatur: <https://www.dkrz.de/media/klimasimulationen/ipcc-ar5/ergebnisse/Mitteltemperatur> abgerufen

Literaturverzeichnis

- Dr. Harry Wirth. (06. 01 2019). *ise.fraunhofer*. Von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> abgerufen
- EEX, EPEX. (2019). *Fraunhofer ISE*. Abgerufen am 06. 10 2019 von https://www.energy-charts.de/price_de.htm?auction=1h&year=2018&week=18
- European Commission, J. R. (21. 09 2017). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. Von https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#TMY abgerufen
- Fraunhofer ISE. (04. 01 2019). *Energy Charts*. Von https://www.energy-charts.de/price_de.htm?auction=1h&year=2018 abgerufen
- Fraunhofer ISE. (06. 01 2019). *ise.fraunhofer*. Von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> abgerufen
- Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, I. (14. 03 2019). *PHOTOVOLTAICS REPORT*. Von <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf> abgerufen
- Georg Flegel, K. B. (2016). *Elektrotechnik für Maschinenbau und Mechatronik*. Koblenz: Hanser.
- Google. (2019). *Google.maps*. Abgerufen am 02. 07 2019 von <https://www.google.de/maps>
- Günther, M. (2015). *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien Möglichkeiten, Potentiale, Systeme*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Günther, M. (2015). *Energieeffizienz durch Erneuerbare Energien: Möglichkeiten, Potenziale, Systeme*. Wiesbaden: Springer.
- Haberschusz, D., Kairies, K.-P., Wessels, O., Magnor, D., & Sauer, D. U. (März 2017). Are PV Battery Systems Causing Ramping Problems in the German Power Grid? *11th International Renewable Energy Storage Conference*, (S. 424–433). Aachen.
- Hans-Martin Henning, A. P. (11 2015). *FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE*. Von Was kostet die Energiewende? Wege zur Transformation des deutschen Energiesystems bis 2050: [https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20\(1\).pdf](https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/Forschungsfelder/Energie-Rohstoffe/Fraunhofer-ISE_Transformation-Energiesystem-Deutschland_final_19_11%20(1).pdf) abgerufen
- IPCC, [T.-K. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, : Cambridge University Press.
- IRENA, I. R. (2019). *Transforming the energy system – and holding the line on the rise of global temperatures*,. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IWR, I. W. (01. 04 2000). *IWR*. Von EEG-Vergütungssätze (2000 - 2004): http://www.iwr.de/re/wf/e_preis.html abgerufen
- Jerrit Hilgedieck, A. M. (2019). Erneuerbare Energie Weltweit. *BWK Das Energie Fachmagazin*, 18-40.

Literaturverzeichnis

- Johannes Weniger, J. B. (2015). *Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende*. Berlin: BWV • BERLINER wissenschafts-Verlag.
- Johannes Weniger, T. T. (2014). Sizing of residential PV battery systems. In *Energy Procedia* (S. 78-87). Berlin: Elsevir.
- Johannsen, M. (2019). *Schulferien.org*. Von <https://www.schulferien.org/Schleswig-Holstein/schleswig-holstein.html> abgerufen
- Jörg Böttcher, P. N. (2018). *Batteriespeicher, Rechtliche, technische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen*. Berlin: De Gruyter oldenbourg.
- Joseph Bergner, V. Q. (03 2019). *Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer*. Von pvspeicher.htw-berlin.de: https://pvspeicher.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW_2019_Sinnvolle_Dimensionierung.pdf abgerufen
- Korthauer, R. (2013). *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Heidelberg: Springer.
- L.Battisti, E. B. (2018). Small wind turbines effectiveness in the urban environment. In S. Kalogirou, *Renewable Energy* (S. 102-113). Trento: Elsevier.
- Linus Idoko, O. A.-L. (2018). Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique. In *Energy Reports 4* (S. 357-269). Glasgow: Elsevier.
- Luthander, R. J. (2015). *Photovoltaic self-consumption in buildings: A review*. Applied Energy.
- Manfred Lenzen, Y.-Y. S.-P. (06 2018). The carbon footprint of global tourism. *Nature Climate Change volume 8*, 522-528. Von <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0141-x> abgerufen
- Martin Fürnschuß, M. A. (2018). Bedarfsorientierte Konzeptionierung von Photovoltaikanlagen. In T. U. Graz, *15. Symposium Energieinnovation* (S. 224-225). Graz.
- Ministerium für Energiewende, L. U. (05 2019). *Schleswig Holstein*. Von https://www.schleswig-holstein.de/DE/Schwerpunkte/Energiewende/Strom/_documents/einspeisemanagement.html abgerufen
- Müller-Jung, J. (2019). Ozeane erwärmen sich schneller als erwartet. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 2.
- Nico Orth, J. W. (2018). Energieeffizienz verschiedener PV-Speichersystemkonzepte. *Licht + Energie*, 36-41.
- Nischwitz, U. (15. 05 2016). *Wogeno München*. Von https://energie.wogeno.de/files/wogeno-energie/Downloads/CO2-Emissionen/Die_Berechnung_des_CO2-Emissionsfaktors_von_Erdgas__15052016.pdf abgerufen
- ÖKO-Energie, & Oberholz, T. (2019). *Oeko-Energie*. Von <https://www.oeko-energie.de/shop1/de/duschsammler.html> abgerufen
- Öko-Institut e.V., I. f. (01. 02 2013). *oeko.de*. Von <https://www.oeko.de/oekodoc/1572/2013-428-de.pdf> abgerufen

Literaturverzeichnis

- Paschotta, D. R. (2019). *Power to Heat*. Abgerufen am 16. 07 2019 von https://www.energielexikon.info/power_to_heat.html
- Paschotta, D. R. (03. Mai 2019). *RP-Energie-Lexikon*. Von Schwungradspeicher: <https://www.energielexikon.info/zitieren.html?article=Schwungradspeicher> abgerufen
- Pearsall, N. (2017). *The Performance of Photovoltaik (PV) Systems, Modelling, Measurement and Assessment*. Cambridge: Elsevier.
- Peter Hennicke, M. F. (2007). *Erneuerbare Energien mit Energieeffizienz zur Energiewende*. München: C. H. Beck.
- Preisvergleich.de. (2019). *GASPREISE FÜR 2019 & 2020*. Von <https://1-gasvergleich.de/gaspreise/> abgerufen
- pv magazine group GmbH & Co. KG. (März 2019). *PV Magazin*. Von Marktübersicht große Batteriespeicher: https://www.pv-magazine.de/marktuebersichten/grosse-batteriespeicher/?row_id=70 abgerufen
- PVGIS. (10. 05 2017). *European Commission, Joint Research Centre, Energy Efficiency and Renewables Unit*. Von PVGIS users manual: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_static/en/manual.html#tmytab abgerufen
- PVGIS. (17. 09 2017). *JRC Photovoltaic Geographical Information System*. Abgerufen am 15. 03 2019 von European Commission: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP
- PVGIS. (05. 11 2017). *JRC Photovoltaic Geographical Information System*. Abgerufen am 06. 10 2019 von European Commission: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/PVGIS_EU_2012_publication.png
- Quaschnig, V. (2018). *Erneuerbare Energien und Klimaschutz, Hintergründe – Techniken und Planung – Ökonomie und Ökologie –Energiewende*. München: Hanser.
- Ratka, A., Homann-Wenig, S., & Ehrmaier, B. (2015). *Technik Erneuerbarer Energien*. Stuttgart: UTB GmbH; Ulmer.
- Russell McKenna, C. H. (2015). *Energieautarkie: Definitionen*. Karlsruhe: KIT, Karlsruhe.
- RWTH Aachen, I. f. (2012). *Technologischer Überblick zur Speicherung von Elektrizität*. Aachen.
- S.I. Sun, M. S. (2017). Self-sufficiency ratio: an insufficient metric for domestic PV-battery systems? southampton.
- Schmiegel, A. U. (2019). *Energiespeicher für die Energiewende. Auslegung und Betrieb von Speichersystemen*. Reutlingen: Hanser.
- Schoop, E. (2018). *Stationäre Batterie-Anlagen, Auslegung, Installation und Wartung*. Berlin: Huss-Verlag.
- Schütz, M. (2013). *Das große handbuch der Erneuerbaren Energien Grundlagen - Technik - Anwendung*. Wuppertal: Wagner Verlag.
- Shubham Deshmukh, S. B. (2018). Wind turbine noise and its mitigation techniques: A review. In *Energy Procedia* (S. 633-640). Allahabad, Prayagraj, India: Elsevier.

- Stromnetz Berlin GmbH. (2019). *Stromnetz Berlin*. Von Netznutzer:
https://www.stromnetz.berlin/netz-nutzen/netznutzer?_t_id=1B2M2Y8AsgTpgAmY7PhCfg%3d%3d&_t_q=slp&_t_tags=language%3astandard%2csiteid%3a07da14c5-3070-4fdd-a015-3a61d02679be&_t_ip=77.0.61.224&_t_hit.id=Corporate_Web_Cms_ContentTypes_Pages_ContentPage/_ca799 abgerufen
- Stromvergleich.com. (2019). *1-Stromvergleich*. Von STROMPREISE IN EUROPA: <https://1-stromvergleich.com/strompreise-in-europa/#> abgerufen
- Synwoldt, C. (2016). *Dezentrale Energieversorgung mit regenerativen Energien Technik, Märkte, kommunale Perspektiven*. Wiesbaden: Springer.
- Tathagata Sarkur, A. B. (2019). Optimal design and impenentation of solar pV-wind-biogas-VRFB storage integrated smart hybrid microgrid for ensuring zero loss of power supply probability. In *Energy Conversion and Management* (S. 102-118). Shipur: Elsevier.
- Tesvolt. (2019). *Tesvolt*. Von <https://www.tesvolt.com/de/ts-hv-70.html> abgerufen
- Thomas Bürhke, R. W. (2010). *Erneuerbare Energie*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & CO. KGaA.
- Tjarko Tjaden, V. Q. (2013). Chance für den Wärmemarkt. *SONNE WIND & WÄRME*, 94-97.
- Umwelt Arena Schweiz. (2015). *Das Erste energieautarke Mehrfamilienhaus der Welt*. Abgerufen am 03 2019 von <http://www.umweltarena.ch/wp-content/uploads/2018/07/Thema-5-Langzeitspeicherung.pdf>
- Umweltbundesamt. (2012). *Batterien und Akkus, Ihre Fragen - unsere Antworten zu Batterien, Akkus und Umwelt*. Dessau. Abgerufen am 15. 07 2019 von <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4414.pdf>
- Umweltbundesamt. (15. 03 2019). *Erneuerbare Energien - Vermiedene Treibhausgase*. Von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/erneuerbare-energien-vermiedene-treibhausgase> abgerufen
- Verhoog, M. (2017). *Steuerung von Aktueren und Entscheidungen in Baunetzwerken*. Leipzig: Springer Gabler.
- Viktor Wesselak, S. V. (2016). *Photovoltaik wie Sonne zu Strom wird*. Nordhausen: Springer.
- Viktor Wesselak, T. S. (2009). *Regenerative Energietechnik*. Heidelberg: Springer.
- Watter, H. (2009). *Nachhaltige Energiesysteme*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- Wirth, D. H. (29. 05 2019). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. Von Fraunhofer Ise:
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> abgerufen
- Wörten, C. (2010). *Erneuerbare Energien*. Freiburg, Br.; Basel; Wien: Herder.
- Xing Luo, J. W. (2014). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operations. In *Applied Energy* (S. 511-527). Warwick: Elsevier.