



HOCHSCHULE LANDSHUT
HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN

Hochschule für angewandte Wissenschaften Landshut
Fakultät Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen
Wirtschaftsingenieurwesen Energie und Logistik (B. Eng.)

**Analyse und Optimierung der Energieinfrastruktur
am Anwesen Wittibsmühle.
Auf dem Weg zur Energieneutralität**

Bachelorarbeit

Eingereicht von	Louis Schmid
Matrikelnummer	01200497
Datum	27.02.2025
Dozent	Dr. Korbinian Nachtmann

Erklärung zur Bachelorarbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

**Analyse und Optimierung der Energieinfrastruktur am Anwesen
Wittibsmühle. Auf dem Weg zur Energieneutralität**

in allen Teilen selbstständig und nur unter Zuhilfenahme der angegebenen Quellen und Literatur verfasst habe.

.....

Ort, Datum

.....

Louis Schmid

Freigabeerklärung

Name, Vorname der/des Studierenden: Louis Schmid

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Bachelorarbeit in den Bestand der Hochschulbibliothek aufgenommen werden kann und

ohne Sperrfrist

oder nach einer Sperrfrist von

1 Jahr

2 Jahren

3 Jahren

5 Jahren

10 Jahren oder länger

über die Hochschulbibliothek zugänglich gemacht werden darf.

.....

Datum

.....

Louis Schmid

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Dr.-Ing. Korbinian Nachtmann bedanken, der mich während meiner Bachelorarbeit betreut und unterstützt hat. Sein Kurs über „Grundlagen Energietechnik“ hat mein Interesse an diesem Themenfeld geweckt und war ausschlaggebend für meine Entscheidung, meine Abschlussarbeit in diesem Bereich zu schreiben.

Ein besonderer Dank gilt auch Andreas Meinelt, der als Vertreter des gemeinnützigen Vereins BIUKAT eine zentrale Rolle in der Zusammenarbeit einnahm. Durch seine fachliche Expertise und seine Unterstützung bei der Umsetzung des energieneutralen Konzepts der Wittibsmühle hat er maßgeblich zum Erfolg meiner Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich Josef Heise, dem Besitzer des Anwesens, meinen tiefen Dank aussprechen. Er hat mir nicht nur Zugang zum Anwesen gewährt, sondern mich auch tatkräftig bei der Erfassung der Gegebenheiten vor Ort unterstützt. Ein weiterer Dank gilt Marc Haller, der als Unterstützer von BIUKAT ebenfalls zur erfolgreichen Durchführung der Projekt-recherche beigetragen hat.

Nicht zuletzt danke ich allen Beteiligten, die mir wertvolle Einblicke in die energetischen Herausforderungen des Anwesens ermöglicht haben und mich bei der praktischen Umsetzung meiner Ideen unterstützt haben.

Ein großer Dank gilt auch meiner Familie, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt hat. Ihre aufmunternden Worte, aufbauenden Gesten und ihre bedingungslose Unterstützung haben mir die nötige Kraft gegeben, die Höhen und Tiefen des Studiums zu meistern.

Abstract

Die vorliegende Arbeit analysiert die Möglichkeiten zur Optimierung der Energieversorgung des Anwesens Wittibsmühle mit dem Ziel einer weitgehenden elektrischen Autarkie. Durch den gezielten Ausbau von Photovoltaikanlagen in Kombination mit Batteriespeichern soll der Netzstrombezug reduziert und die Eigenverbrauchsquote maximiert werden. Auf Basis einer detaillierten Untersuchung des Lastgangprofils für das Jahr 2023 sowie der verfügbaren Dach- und Freiflächen wurden drei verschiedene Varianten für die Dimensionierung der Energieinfrastruktur entwickelt und hinsichtlich ihrer technischen Machbarkeit, Wirtschaftlichkeit und ökologischen Effizienz bewertet.

Die erste Variante umfasst eine 150 kWp PV-Anlage in Verbindung mit einem 150 kWh Batteriespeicher. Sie ermöglicht eine Autarkie von 62 %, bleibt jedoch stark abhängig vom Netzbezug. Die zweite Variante mit einer 500 kWp PV-Anlage und einem 400 kWh Batteriespeicher bietet eine signifikante Erhöhung des Autarkiegrads auf 86 %. Durch die größere PV-Leistung kann ein größerer Anteil des Energiebedarfs durch Eigenproduktion gedeckt werden, während der Batteriespeicher überschüssigen Strom effizient speichert und bedarfsgerecht zur Verfügung stellt. Diese Variante stellt einen optimalen Kompromiss zwischen Investitionskosten, Einsparpotenzial und wirtschaftlicher Tragfähigkeit dar, da eine hohe Eigenversorgung mit einer moderaten Amortisationszeit kombiniert wird.

Die dritte Variante zielt mit einer PV-Anlage von 1.300 kWp und einem 1.300 kWh Batteriespeicher auf eine nahezu vollständige Autarkie von 97 % ab. Die technische Machbarkeit ist gegeben, jedoch sind die Investitionskosten sowie rechtliche und ökologischen Aspekte für eine derart große Anlage erheblich. Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern somit eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Umsetzung nachhaltiger Energieversorgungskonzepte und dienen als Modell für vergleichbare Betriebe und Anwesen.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung zur Bachelorarbeit	II
Danksagung	IV
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ziel der Arbeit	1
1.2 Vorgehensweise	2
2 Grundlagen	3
2.1 Vorstellung der Wäscherei Heidenreich und dem Anwesen Wittibsmühle	3
2.1.1 Überblick über die Energieverbrauchsstrukturen	3
2.1.2 Beschreibung der Gebäude	5
2.2 Solarenergie	7
2.2.1 Grundlagen der Solarenergie und Bestandteil in Deutschland	8
2.2.2 Funktion Photovoltaik	8
2.3 Agri-PV Kategorie I und II Unterscheidung	9
Agri-PV Kategorie I	9
Agri-PV Kategorie II	10
2.4 Innovative Konzepte: Solarzaun oder PV-Folie und deren Einsatz auf dem Anwesen 11	
2.5 Rechtliche und ökologische Rahmenbedingungen	13
3 Analyse und Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten	17
3.1 Einführung in die Untersuchung	17

3.2	Potenzialanalyse	17
	Ermittlung der benötigten Leistung und Energie (Lastprofil-Analyse 2023).....	18
3.2.1	Ermittlung des Energiebedarfs im Falle einer Dunkelflaute.....	19
3.2.2	Auslegung der Batteriespeicher und der PV-Anlagengröße	20
3.3	Autarkiematrix.....	22
3.3.1	Variante 1: Minimalausbau	23
3.4	Standortanalyse.....	28
3.4.1	Variantenanalyse und Standortbewertung für Photovoltaikanlagen	28
3.4.2	Standortanalyse Batteriespeicher	41
3.5	Wirtschaftliche Bewertung (Investitionskosten, Amortisation)	43
3.5.1	Investitionskosten.....	46
3.5.2	Kostenaufstellung.....	49
4	Schluss	53
4.1	Ausblick auf die nächsten Schritte und mögliche Erweiterungen des Projekts	54
	Literaturverzeichnis.....	IX
5	Anlage:.....	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strahlungskarte Deutschland.....	4
Abbildung 2: Übersicht Anwesen Wittibsmühle	5
Abbildung 3: Übersicht Pferdekoppeln.....	7
Abbildung 4: PV-Entwicklung Deutschland.....	8
Abbildung 5: Silizium-Solarzelle.....	9
Abbildung 6: Agri-PV Kategorie I.....	10
Abbildung 7: Agri-PV Kategorie II	11
Abbildung 8: PV-Zaun	12
Abbildung 9: Landschaftsschutzgebiet Karte	13
Abbildung 10: Lastgangskurve 2023	18
Abbildung 11: Leistungskurve abfallend nach Leistung geordnet.....	18
Abbildung 12: Leistung PV KW28/2023.....	19
Abbildung 13: Leistung PV KW48/2023 – Dunkelflaute.....	19
Abbildung 14: Wie sehr steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad?	20
Abbildung 15: Wie beeinflusst die PV-Leistung den Autarkiegrad?.....	21
Abbildung 16: Autarkiematrix	22
Abbildung 17: Energiebezug Jahresverlauf Variante 1.....	24
Abbildung 18: Autarkie Jahresbedarf Variante 1	24
Abbildung 19: Energiebezug Jahresverlauf Variante 2.....	25
Abbildung 20: Autarkie Jahresbedarf Variante 2.....	26
Abbildung 21: Energiebezug Jahresverlauf Variante 3.....	27
Abbildung 22: Autarkie Jahresbedarf Variante 3.....	27
Abbildung 23: Wäscherei Bestand.....	29
Abbildung 24: Systemübersicht Wäscherei Bestand	29
Abbildung 25: Heizgebäude.....	30
Abbildung 26: Systemübersicht Heizgebäude	30
Abbildung 27: Carport	31
Abbildung 28: Systemübersicht Carport.....	31
Abbildung 29: Jugendherberge	33
Abbildung 30: Systemübersicht Jugendherberge.....	33
Abbildung 31: Mietgebäude 1.....	34
Abbildung 32: Systemübersicht Mietgebäude 1	34

Abbildung 33: Mietgebäude 2.....	35
Abbildung 34: Systemübersicht Mietgebäude 2	35
Abbildung 35: Pferdestall 1.....	36
Abbildung 36: Systemübersicht Pferdestall 1	36
Abbildung 37: Geräteschuppen.....	37
Abbildung 38: Systemübersicht Geräteschuppen	37
Abbildung 39: Pferdestall 2.....	38
Abbildung 40: Systemübersicht Pferdestall 2	38
Abbildung 41: PV-Zaun	40
Abbildung 42: Systemübersicht PV-Zaun.....	40
Abbildung 43: Bewertung der Wirksamkeit, Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Standorte.....	42
Abbildung 44: Energetische Bilanz Variante 1	43
Abbildung 45: Energetische Bilanz Variante 2.....	44
Abbildung 46: Energetische Bilanz Variante 3.....	45
Abbildung 47: Batteriespeicher.....	46
Abbildung 48: Weltweite Preise für Lithium-Ionen-Akkus bis 2023 Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Akkus in ausgewählten Jahren von 2013 bis 2023 (in USD /kWh).....	47
Abbildung 49: Batteriespeicher 3870 Variante.....	52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Daten aus Lastgangskurve 2023.....	18
Tabelle 2: Prognose Variante 1	23
Tabelle 3: Prognose Variante 2	25
Tabelle 4: Prognose Variante 3	26
Tabelle 5: Standortanalyse Variante 1	29
Tabelle 6: Standortanalyse Variante 2	32
Tabelle 7: Standortanalyse Variante 3	39
Tabelle 8: Energiehaushalt pro Jahr Variante 1	43
Tabelle 9: Energiehaushalt pro Jahr Variante 2	44
Tabelle 10: Energiehaushalt pro Jahr Variante 3	45
Tabelle 11: Kosten Variante 1	49
Tabelle 12: Kosten Variante 2.....	49
Tabelle 13: Kosten Variante 3.....	49
Tabelle 14: Kostenübersicht aller untersuchten Varianten	49
Tabelle 15: Amortisation Kosten	50
Tabelle 16: Kostenermittlung Strompreis pro kWh	50
Tabelle 17: Amortisation in Jahren	51

Abkürzungsverzeichnis

EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
PV	Photovoltaik
kWp	Kilowatt Peak (Nennleistung einer PV-Anlage)
kWh	Kilowattstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
H₂	Wasserstoff
AC	Wechselstrom (Alternating Current)
DC	Gleichstrom (Direct Current)
SOFC	Festoxid-Brennstoffzelle (Solid Oxide Fuel Cell)
Li-Ion	Lithium-Ionen (Batterietechnologie)
NH₃	Ammoniak (möglicher Wasserstoffträger)
CO₂	Kohlendioxid
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FiT	Feed-in Tarif (Einspeisevergütung)
Agri-PV	Agrar-Photovoltaik
Nahwärme	Nahwärmenetz
LBO	Landesbauordnung
VdS	Verband der Sachversicherer
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
DIN	Deutsche Industrie-Norm
BayNatSchG	Bayerisches Naturschutzgesetz
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
PPA	Power Purchase Agreement
ASP	Artenschutzprüfung
GLT	Gebäudeleittechnik

1 Einleitung

1.1 Motivation und Ziel der Arbeit

Der wachsende Energiebedarf und die fortschreitende Erderwärmung stellen uns vor die dringende Aufgabe, innovative und nachhaltige Energiekonzepte zu entwickeln, die sowohl ökologisch als auch wirtschaftlich tragfähig sind. Besonders in ländlichen Regionen, in denen große Flächenpotenziale vorhanden sind, bietet die Nutzung erneuerbarer Energien eine vielversprechende Lösung. Das Anwesen Wittibsmühle im Ortsteil Wang in Moosburg bietet hierfür eine ideale Ausgangsbasis.

Die Motivation dieser Bachelorarbeit liegt darin, das gesamte Anwesen weitestgehend elektrisch autark zu machen. Dies soll durch die größtmögliche Nutzung erneuerbarer Energien, insbesondere durch Photovoltaikanlagen, geschehen. Dabei steht die Umstellung des elektrischen Energieverbrauchs der verschiedenen Gebäude und Betriebseinheiten im Fokus, um eine Selbstversorgung mit erneuerbarer Energie zu ermöglichen. Eine zentrale Rolle nimmt dabei die Umwandlung der bestehenden Energieinfrastruktur in ein System, das vorwiegend auf Eigenversorgung durch Solarenergie setzt ein. Neben der technischen Machbarkeit wird auch untersucht, welche Flächen und Gebäude für die Installation von Photovoltaikanlagen besonders geeignet sind. Dazu gehören nicht nur die Dächer, sondern auch die Grünflächen und Zäune.

Ziel der Arbeit ist es, ein umfassendes Konzept für die weitestgehende elektrische Energieautarkie des gesamten Anwesens zu entwickeln.

Diese Arbeit soll aufzeigen, dass es möglich ist, ein vielfältiges und komplexes Anwesen weitestgehend elektrisch nachhaltig und energieneutral zu betreiben. Durch die detaillierte Analyse und die Entwicklung von maßgeschneiderten Energiekonzepten dient das Projekt als Vorbild für ähnliche ländliche Betriebe und Anwesen, die eine Umstellung auf erneuerbare elektrische Energien anstreben. Letztlich soll die Wäscherei Heidenreich durch die vorwiegende Eigenproduktion von elektrischer Energie ihre Betriebskosten senken, ihre Umweltbilanz verbessern.

1.2 Vorgehensweise

Es wird eine systematische Methodik angewandt um die verschiedenen technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Aspekte zu berücksichtigen.

Zunächst erfolgt die Erfassung und Analyse der elektrischen Bezugsenergie des Anwesens anhand der Lastgangkurve des Jahres 2023. Diese Analyse liefert detaillierte Erkenntnisse über den Gesamtstrombezug, tageszeitliche und saisonale Bezugsschwankungen sowie Lastspitzen. Gleichzeitig wird die Erzeugungsleistung der bereits installierten PV-Anlagen auf Basis von Peakleistung und Sonnenstunden errechnet, um deren Beitrag zur Deckung des Stromverbrauchs zu bewerten.

Basierend auf diesen Daten wird eine Entscheidungsmatrix zum Grad der Autarkie in Abhängigkeit von Peakleistung und Batteriespeicher erstellt. Dabei wird insbesondere der Energiebedarf während einer exemplarischen Dunkelflaute im Jahr 2023 analysiert, um eine optimale Batteriespeichergröße zu bestimmen. Ziel ist es, überschüssig erzeugte Energie effizient und wirtschaftlich zwischenzuspeichern und eine kontinuierliche Versorgung des Anwesens sicherzustellen.

Die Dachflächen der einzelnen Gebäude werden auf Tauglichkeit zur Montage von PV-Modulen geprüft. In diesem Zuge wird auch der Installationsaufwand für die Anbringung der Gleichrichter und die Verlegung der Stromleitungen berücksichtigt.

Neben der technischen Dimensionierung der Energieerzeugungs- und Speicheranlagen werden rechtliche und ökologische Rahmenbedingungen untersucht, um Genehmigungsanforderungen sowie potenzielle Umweltauflagen zu berücksichtigen. Darüber hinaus erfolgt eine Bewertung der Anschlussmöglichkeiten an das öffentliche Stromnetz, insbesondere im Hinblick auf eine potenzielle Netzeinspeisung überschüssiger Energie.

Abschließend wird eine umfassende Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt, in der Investitions- und Betriebskosten den erwarteten Einsparungen sowie möglichen Erlösen aus der Stromeinspeisung gegenübergestellt werden. Diese ganzheitliche Vorgehensweise ermöglicht eine fundierte Bewertung der optimalen PV-Anlagengröße und Batteriespeicherkapazität zur Maximierung der Autarkie.

2 Grundlagen

2.1 Vorstellung der Wäscherei Heidenreich und dem Anwesen Wittibsmühle

Die Wäscherei Heidenreich ist ein mittelständisches Unternehmen mit einer langen Tradition, das sich auf die professionelle Reinigung und den Verleih von Textilien spezialisiert hat. Seit der Gründung im Jahr 1956 hat sich der Betrieb kontinuierlich weiterentwickelt und zählt heute zu den führenden Wäschereien in der Region. Der Betrieb, der ursprünglich in Bad Heilbrunn gegründet wurde, verlegte seinen Standort 1990 nach Schwabing und befindet sich seit dem Jahr 2000 in Perlach. Zusätzlich existiert ein weiterer Standort in Moosburg, genauer in der Wittibsmühle. Das Anwesen, auf dem sich die Wäscherei befindet, liegt in der Gemeinde Wang im Landkreis Freising, nördlich der Stadt Moosburg. Es erstreckt sich über eine Fläche von rund 1,6 Hektar und beherbergt neben den Betriebsgebäuden der Wäscherei eine Vielzahl an weiteren Gebäuden und Grünflächen. Das gesamte Anwesen befindet sich in einem landschaftlich geschützten Gebiet. Dies stellt besondere ökologische und rechtliche Anforderungen an Baumaßnahmen.

2.1.1 Überblick über die Energieverbrauchsstrukturen

Das Anwesen nutzt aktuell eine Kombination aus erneuerbaren und fossilen Energieträgern, um seinen Energiebedarf zu decken. Im Jahr 2023 wurden ca. 600 Schüttraummeter Hackschnittel zur Wärmeerzeugung und ca. 100.000 Liter Propan für die Dampferzeugung in der Wäscherei verbraucht. Es wurden zudem vom Stromlieferant Scholt Energy 126.066kWh elektrische Energie bezogen. Der Gesamtverbrauch kann nicht exakt benannt werden, da die bereits vorhandene Photovoltaik-Anlage (PV-Anlage) einen Teil des Verbrauchs deckt aber selbst nicht gemessen wird.

Die auf den Dächern der Wäscherei, des Mietshauses und des Pferdestalls befindliche PV-Anlage hat laut dem (Besitzer des Grundstückes) eine Leistung von 103 kWp.

Auf Basis der Jahressumme der Globalstrahlung im Jahr 2023 aus Abbildung 1 zu entnehmen im Raum Moosburg in Bayern ist mit einer Energieproduktion von ca. 125.000 kWh (Volllaststunden x Installierte Peakleistung) zu rechnen. Davon wurden 2023 47.851 kWh an die Stadtwerke München eingespeist (siehe Anhang 1 und Anhang 2). Die dritte Anlage auf dem Neubau Wäscherei ist erst im Jahr 2024 in Betrieb gegangen und deshalb konnte diese Einspeisung nicht mit in die Arbeit integriert werden. Der Gesamtenergieverbrauch des Objekts liegt laut Herrn Heise nach Inbetriebnahme des Neubaus Wäscherei bei ca. 250.000 kWh. Es besteht der Wunsch durch Zubau zusätzlicher PV-Anlagen und Energiespeichern die Menge an bezogener elektrischer Energie zu minimieren.

Globalstrahlung in Deutschland

Basierend auf Satellitendaten und Bodenwerte aus dem DWD-Messnetz

Jahressumme 2023

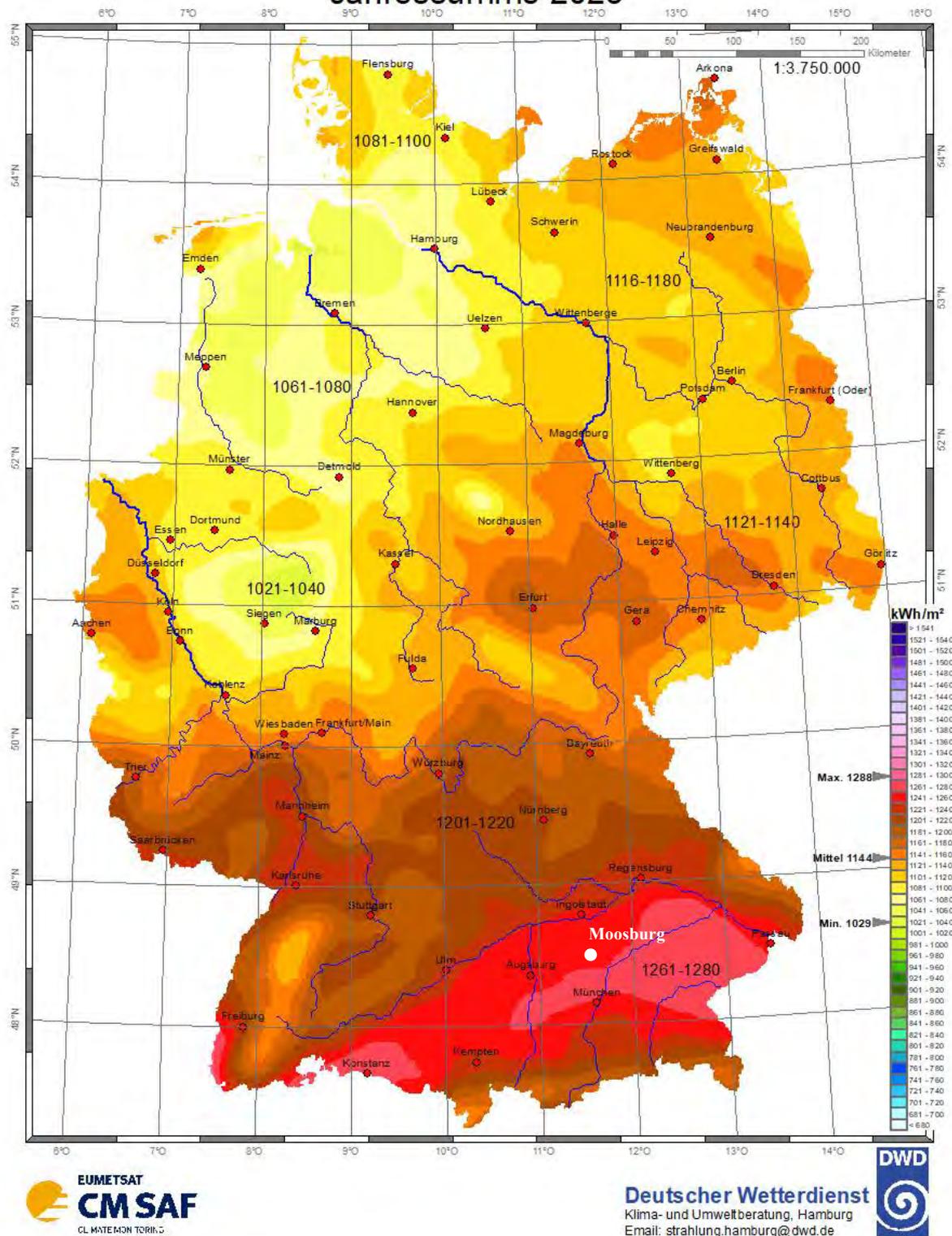


Abbildung 1: Strahlungskarte Deutschland (Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen), 2023)

2.1.2 Beschreibung der Gebäude



Abbildung 2: Übersicht Anwesen Wittibsmühle

Die farblichen Markierungen in Abbildung 2 dienen der Übersicht über den aktuellen und geplanten Ausbau der PV-Anlagen auf den Gebäuden und Wiesen. Gebäude, die bereits vollständig mit PV-Modulen belegt sind, wurden grün gekennzeichnet. Diese Gebäude tragen bereits aktiv zur Eigenstromversorgung bei und sind somit ein zentraler Bestandteil der nachhaltigen Energieversorgung.

Die lila markierte Gebäude verfügen bereits teilweise über PV-Anlagen und können mit weiteren Modulen erweitert werden.

Gebäude, die bislang keine PV-Anlagen besitzen, jedoch in Zukunft mit PV-Modulen ausgestattet werden sollen, sind blau gekennzeichnet. Diese Gebäude bieten technisch geeignete Flächen für eine zukünftige PV-Installation.

Rot markierte Gebäude wurden als nicht für PV-Anlagen vorgesehen eingestuft. Dies geschieht insbesondere aufgrund statischer Bedenken oder anderweitiger Nutzungseinschränkungen. Grundsätzlich wurde in dieser Arbeit keine statische Prüfung der Gebäude durchgeführt. Die Bewertung der PV-Potenziale erfolgte ausschließlich auf Grundlage der rein technisch machbaren Auslegung hinsichtlich Fläche und Ertrag. Die tatsächliche Umsetzung einer PV-Installation muss daher in einem weiteren Schritt unter Berücksichtigung der Gebäudestatik und baulicher Voraussetzungen geprüft werden.

Das Anwesen umfasst eine Vielzahl an Gebäuden mit unterschiedlichen Nutzungen, die sowohl dem Wäschereibetrieb als auch Wohn-, Freizeit- und landwirtschaftlichen Zwecken dienen.

1. Wohnhaus von Herrn Heise: Das Wohnhaus des Besitzers und Betreibers der Wäscherei, befindet sich auf dem Anwesen und dient als privater Wohnsitz.
2. Seminar- und Freizeitgebäude: Ein multifunktionales Gebäude, das für Freizeitaktivitäten, Seminare, Klassenfahrten und Gruppenveranstaltungen genutzt wird. Es verfügt über Schlafräume und Aufenthaltsbereiche für Besucher und Gäste.
3. Wärmezentrale & Hackschnitzellager: Ein separates Heizgebäude, in dem eine Hackschnitzelanlage betrieben wird. Diese Anlage stellt die zentrale Wärmeversorgung für Teile des Anwesens sicher. Zudem dient das Gebäude als Lagerraum für die benötigten Hackschnitzel.
4. Wäscherei Anbau/Neubau: Ein Anbau bzw. Neubau der Wäscherei, der bereits mit einer Photovoltaikanlage ausgestattet ist und somit einen Beitrag zur Eigenstromversorgung des Betriebs leistet.
5. Wäscherei Hauptgebäude: Das zentrale Gebäude des Anwesens, in dem der tägliche Betrieb der Wäscherei stattfindet. Hier befinden sich die industriellen Wasch-, Trocken- und Bügelanlagen sowie Verwaltungsräume.
6. Carport: Eine überdachte Stellplatzanlage, die den Mietern und Mitarbeitern als geschützte Abstellmöglichkeit für Fahrzeuge dient.
7. Pferdestall: Ein Stallgebäude, das zur angrenzenden Reitanlage gehört und die Unterbringung sowie Versorgung von Pferden ermöglicht.
8. Mietshaus: Ein ursprünglich als Schulgebäude genutztes Haus, das heute als Wohngebäude vermietet wird. Es bietet Wohnraum für Mieter auf dem Anwesen.
9. Reithalle: Eine große, überdachte Reitfläche, die für den Reitbetrieb und das Training von Pferden genutzt wird.
10. Geräteschuppen: Ein Lagergebäude zur Unterbringung von landwirtschaftlichen und betrieblichen Geräten sowie Maschinen.
11. Reithalle 2: Eine zweite Reithalle, die zusätzliche Kapazitäten für den Reitbetrieb bietet und insbesondere für Trainingseinheiten und Reitveranstaltungen genutzt wird.

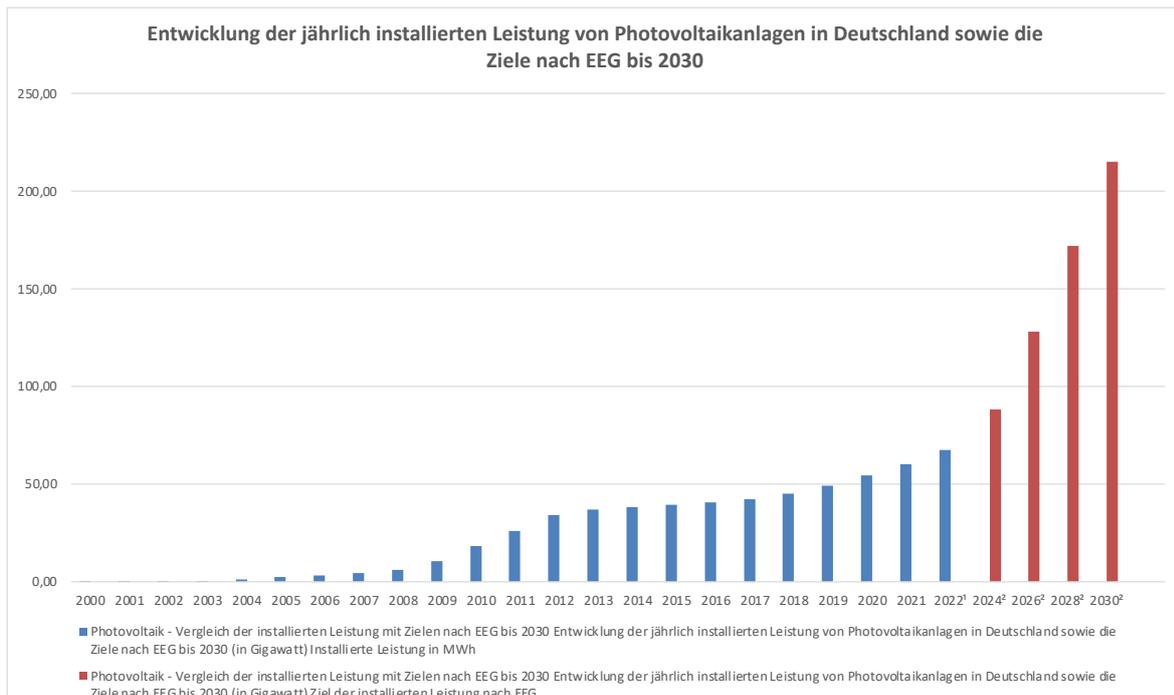


Abbildung 4: PV-Entwicklung Deutschland
(Photovoltaik in Deutschland, 2025)

2.2.1 Grundlagen der Solarenergie und Bestandteil in Deutschland

Solarenergie stellt eine der primären Formen erneuerbarer Energie dar und basiert auf der Umwandlung der von der Sonne emittierten Strahlung in nutzbare Energieformen. Die Sonne strahlt pro Jahr etwa 1.000-mal mehr Energie auf die Erde ab, als die Menschheit verbraucht. Diese immense Energiequelle kann durch technische Verfahren zur Erzeugung von Wärme, Strom oder chemischer Energie verwendet werden (Kaltschmitt et al., 2020). Die Energie der Sonne erreicht die Erde in Form von elektromagnetischer Strahlung, die hauptsächlich im sichtbaren und infraroten Spektrum liegt. Diese Strahlung kann durch verschiedene physikalische Effekte in nutzbare Energie umgewandelt werden. Die beiden am häufigsten eingesetzten Technologien hierfür sind die Photovoltaik und die Solarthermie.

2.2.2 Funktion Photovoltaik

In folgender Beschreibung wird die Funktionsweise einer Solarzelle erläutert, die in Abbildung 5 dargestellt ist. Die Funktion einer Silizium-Solarzelle basiert auf der Nutzung des photovoltaischen Effekts. Eine typische Solarzelle besteht aus einem pn-Übergang, bei dem zwei unterschiedlich dotierte Halbleiterschichten aufeinandertreffen. Die Zelle besteht aus zwei Schichten, einer p-dotierten Basis und einem n-dotierten Emitter. Wenn Licht auf die Zelle fällt, erzeugt die Absorption von Photonen Elektron-Loch-Paare. Diese Paare werden durch das elektrische Feld der Raumladungszone getrennt. Elektronen wandern zum n-dotierten Emitter und Löcher zur p-dotierten Basis. Über Metallkontakte, Frontkontakte auf

der Oberseite und einen Rückkontakt auf der Unterseite, werden die Ladungsträger gesammelt und erzeugen einen Stromfluss, wenn ein Verbraucher angeschlossen ist. Die erzeugte elektrische Leistung hängt von Faktoren wie Lichtabsorption, Halbleiterqualität und Minimierung von Rekombinationsverlusten ab (Mertens, 2022, S. 90).

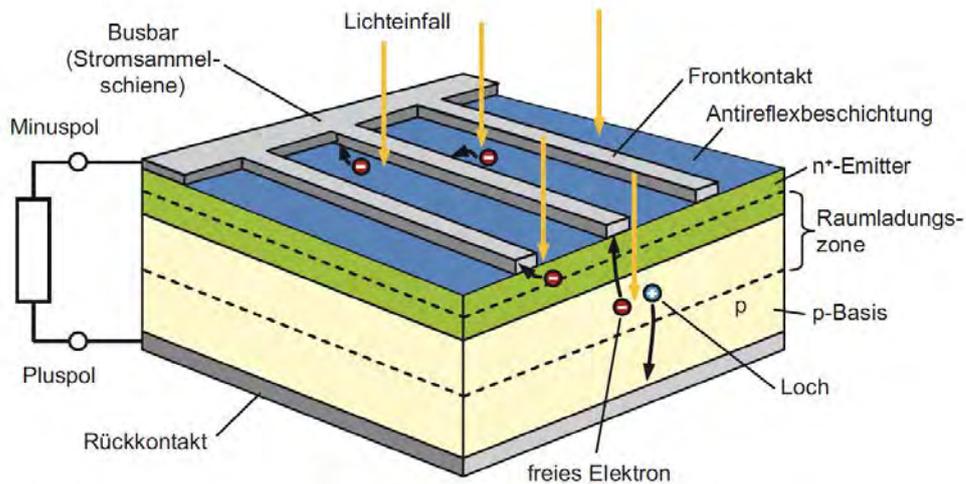


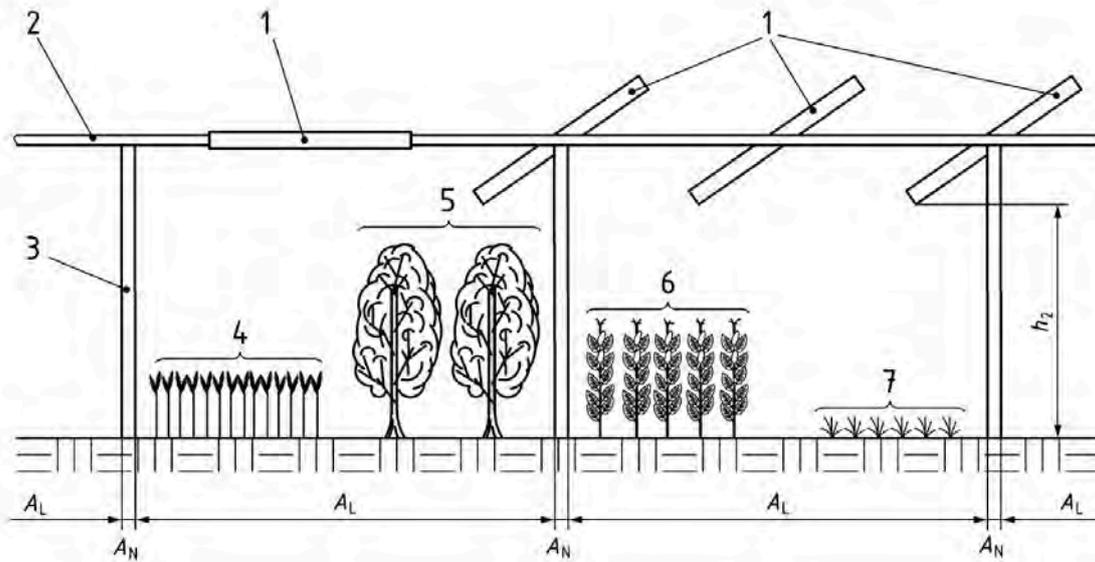
Abbildung 5: Silizium-Solarzelle
(Mertens, 2022, S. 92)

2.3 Agri-PV Kategorie I und II Unterscheidung

Agri-PV ist eine Technologie, die es ermöglicht, Flächen gleichzeitig für die Landwirtschaft und zur Stromerzeugung mittels Photovoltaik zu nutzen. Dadurch kann eine Fläche sowohl für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion als auch für die Solarstromerzeugung dienen. In einigen Fällen werden auch Tierunterstände mit PV-Modulen zur Agri-PV gezählt; hier fehlen jedoch klare Unterscheidungsmerkmale zu herkömmlichen PV-Dachanlagen (Trommsdorff et al., 2024, S. 10). Gemäß DIN SPEC 91434 wird zwischen zwei Kategorien von Agri-PV-Anlagen unterschieden: die Aufständering in lichter Höhe von über 2,1 m (Kategorie I) in Abbildung 6 und die bodennahe Aufständering (Kategorie II) wie in Abbildung 7 dargestellt.

Agri-PV Kategorie I

Anlagen der Kategorie I ermöglichen die Bearbeitung mit konventionellen, im Betrieb vorhandenen landwirtschaftlichen Geräten unter den Solarmodulen. Laut Definition muss die Mindesthöhe 2,1 m betragen. Dadurch kann der Verschattungsgrad an die Bedürfnisse der darunter wachsenden Kulturpflanzen angepasst werden. (Lettenmeier et al., 2024)



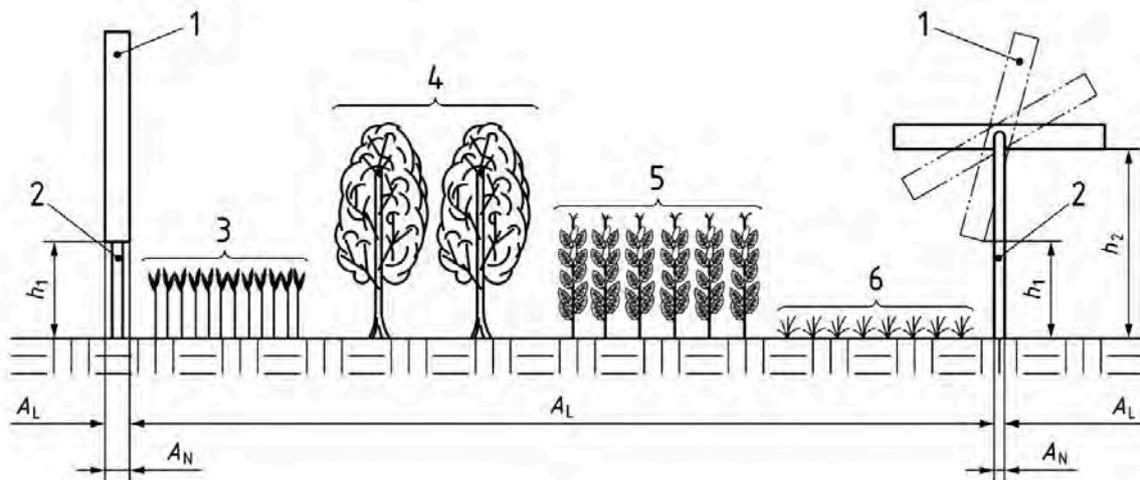
Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Verstreibung
- 3 Aufständering
- 4 bis 7 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 6: Agri-PV Kategorie I
(Lettenmeier et al., 2024)

Agri-PV Kategorie II

Gemäß DIN SPEC 91434 wird die Agri-PV Kategorie II durch folgende Merkmale charakterisiert: Die Module sind niedrig über dem Boden installiert, was die landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen ermöglicht. Diese Kategorie ist geeignet für dieselben Kulturarten wie Kategorie I. Flächen unter den Modulen, die eine lichte Höhe von weniger als 2,10 m haben, gelten nicht als landwirtschaftlich nutzbar, es sei denn, ein Ertrag von mindestens 66 % wird erreicht. Diese Kategorisierung dient dazu, die landwirtschaftliche Hauptnutzung der Fläche sicherzustellen, während gleichzeitig Solarstrom erzeugt wird.



Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_1 lichte Höhe unter 2,10 m
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Aufständerung;
- 3 bis 6 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 7: Agri-PV Kategorie II

(Lettenmeier et al., 2024)

2.4 Innovative Konzepte: Solarzaun oder PV-Folie und deren Einsatz auf dem Anwesen

Ein weiteres innovatives Segment der Photovoltaik sind PV-Zäune und PV-Folie, die alternative Möglichkeiten zur Nutzung von Solarenergie bieten und sich von konventionellen PV-Systemen auf Dächern oder Freiflächen unterscheiden.

PV-Zäune

PV-Zäune, auch als Solarzäune bezeichnet in Abbildung 8 zu sehen, kombinieren die Funktion eines klassischen Zauns mit der Stromerzeugung durch Photovoltaikmodule. Die Module werden dabei vertikal oder leicht geneigt in einer Zaunkonstruktion integriert und dienen gleichzeitig als Grundstücksbegrenzung. PV-Zäune („Solarzaun von Next2Sun“, o. J.) sind insbesondere für landwirtschaftliche, industrielle oder private Flächen attraktiv, auf denen herkömmliche PV-Systeme nur eingeschränkt oder nicht genutzt werden können. Die vertikale Anordnung der Module erlaubt eine Stromerzeugung auch bei tiefem Sonnenstand, insbesondere in den Morgen- und Abendstunden. Zwar ist der Gesamtstromertrag im Vergleich zu Dachanlagen geringer und hängt von Ausrichtung sowie Beschattung ab, doch bieten PV-Zäune eine effiziente Flächennutzung. Sie vereinen die Funktionen der Energiegewinnung mit zusätzlichem Lärm-, Sicht- und Windschutz (Hochwarth, 2024).



Abbildung 8: PV-Zaun
(energie-experten, 2022)

Bifaziale Module

Bifaziale PV-Module sind in der Lage Vorder- und Rückseite zu nutzen um Strom zu produzieren. Durch die senkrechte Aufständigung bei Agri-PV-Anlagen erhalten die Rückseiten der bifazialen Module ebenfalls Lichteinstrahlung, wodurch Strom erzeugt werden kann. Die Module weisen eine beidseitige Verglasung auf und bieten damit eine homogenere Lichtverteilung unter den Modulen. Bifaziale Module sind heute für den Massenmarkt verfügbar (*Next2Sun.pdf*, o. J.).

PV-Folie

Die sogenannte PV-Folie oder Dünnschicht-Photovoltaik stellt eine flexible und leichte Alternative zu herkömmlichen starren PV-Modulen dar. Sie basiert auf Dünnschicht-Solarzellen, die auf flexiblen Materialien wie Kunststoff oder Metallfolien aufgetragen werden und damit vielseitig einsetzbar sind (Lücke, 2021). Aufgrund ihrer geringen Dicke und ihres leichten Gewichts kann PV-Folie auf Oberflächen eingesetzt werden, die für klassische Module ungeeignet wären, wie etwa Fassaden, Fahrzeugdächer oder Zeltkonstruktionen.

PV-Zäune und PV-Folie erweitern die Einsatzmöglichkeiten wie das Bebauen von Carports oder Traglufthallen mit Photovoltaik und eröffnen neue Perspektiven für eine flächensparende und effiziente Energiegewinnung in verschiedenen Bereichen.

2.5 Rechtliche und ökologische Rahmenbedingungen

Das Objekt liegt in einem Landschaftsschutzgebiet welches in Abbildung 9 aufgezeigt wird. Die Errichtung von PV-Anlagen unterliegt somit strengen rechtlichen und ökologischen Rahmenbedingungen, insbesondere bei bodennah aufgeständerten Agri-PV-Anlagen der Kategorie II aus 2.3.

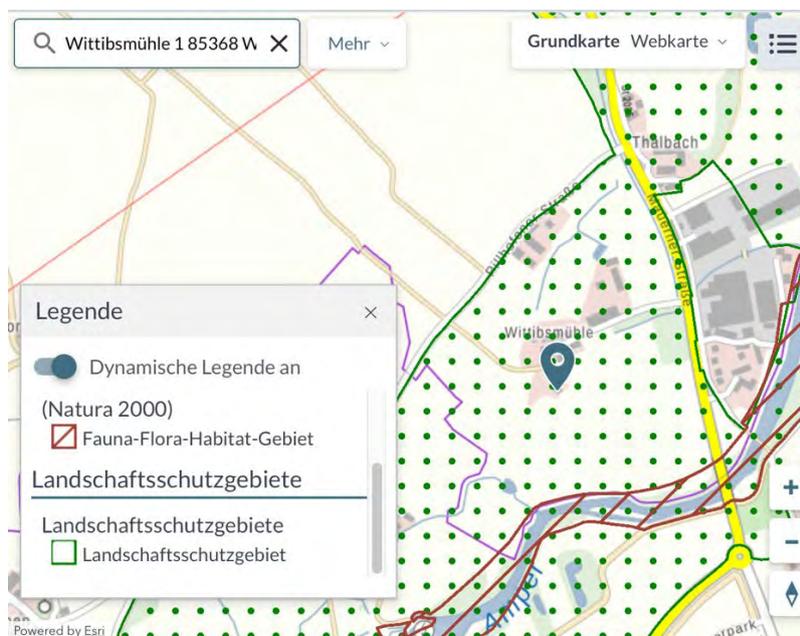


Abbildung 9: Landschaftsschutzgebiet Karte

(Landschaftsschutzgebiete in Bayern | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, o. J.)

Die Errichtung eines PV-Zauns erfordert eine umfassende Prüfung verschiedener rechtlicher und ökologischer Rahmenbedingungen. In dieser Arbeit wird jedoch keine konkrete Prüfung der Genehmigung für den Standort Wittibsmühle, 85368 Wang vorgenommen. Vielmehr wird dargestellt, welche Aspekte bei der Planung eines solchen Projekts berücksichtigt werden müssen und welche Prüfverfahren erforderlich sind. Jede dieser Prüfungen muss individuell erfolgen und kann nicht in dieser Arbeit vorgenommen werden.

Besonders relevant für die Beurteilung dieses Standorts ist die Tatsache, dass sich das gesamte Anwesen innerhalb eines Landschaftsschutzgebiets befindet. Dies führt zu zusätzlichen rechtlichen Einschränkungen, die die Installation eines PV-Zauns erschweren oder besondere Genehmigungen erfordern können (Landschaftsschutzgebiete in Bayern | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, o. J.)

Ein zentrales Element für die rechtliche Einordnung von Agri-PV-Anlagen ist die DIN SPEC 91434:2021-05, die als vor Norm spezifische Anforderungen an die landwirtschaftli-

che Hauptnutzung von Agri-PV-Anlagen definiert. Anlagen, die nach diesen Vorgaben errichtet werden, profitieren von steuerlichen Vorteilen sowie von Fördermöglichkeiten innerhalb des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG). Entscheidend ist dabei die Einhaltung der in 2.3 beschriebenen Bedingungen. Neben diesen planungsrechtlichen Vorgaben müssen Betreiber einer Agri-PV-Anlage zudem eine Einspeisezertifizierung vorlegen. Abhängig von der Anlagengröße sind unterschiedliche Zertifizierungsanforderungen zu erfüllen:

- Anlagen bis 500 kWp benötigen kein gesondertes Zertifikat.
- Für Anlagen zwischen 500 kWp und 950 kWp ist ein vereinfachtes Anlagenzertifikat (Typ B) erforderlich.
- Anlagen über 950 kWp benötigen ein vollständiges Standard-Anlagenzertifikat (Typ A).

(NELEV - *Verordnung zum Nachweis von elektrotechnischen Eigenschaften von Energieanlagen I*, o. J.)

Die rechtlichen Anforderungen betreffen darüber hinaus die Vermarktung des erzeugten Stroms. Während die Einspeisung über das EEG eine garantierte Vergütung über 20 Jahre sichert (*Bundesnetzagentur - EEG-Förderung und -Fördersätze*, o. J., S. 3), bietet ein Power Purchase Agreement (PPA) eine marktbasiertere Alternative, bei der Strom direkt an industrielle Abnehmer verkauft wird. Anlagen bis 100 kWp können die feste Einspeisevergütung in Anspruch nehmen, während Anlagen zwischen 100 kWp und 1.000 kWp eine gleitende Marktprämie erhalten, sofern sie sich für die Direktvermarktung entscheiden. Für Anlagen ab 1.000 kWp ist eine Förderung nur über Ausschreibungen möglich, wobei die Höhe der Vergütung von den jeweils erteilten Zuschlägen abhängt (*Bundesnetzagentur - EEG-Förderung und -Fördersätze*, o. J., S. 5).

Rechtliche Rahmenbedingungen für den Standort

Schutzgebietsverordnungen

Landschaftsschutzgebiete sind durch spezielle Verordnungen geschützt, die bestimmte Bauvorhaben einschränken oder verbieten können. In Bayern gelten hierfür die Vorgaben des Bayerischen Naturschutzgesetzes (*Landschaftsschutzgebiete in Bayern | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz*, o. J.)

Ziel der Schutzverordnung ist es, das Landschaftsbild zu erhalten und negative Auswirkungen auf Natur und Umwelt zu verhindern. Die Errichtung von baulichen Anlagen, einschließlich PV-Zäunen, ist in solchen Gebieten häufig nur mit einer Ausnahmegenehmigung oder Befreiung von den bestehenden Verboten möglich. Zuständig für die Genehmigung ist

das Landratsamt Freising und die Untere Naturschutzbehörde (Malte Stöppler et al., 2024, S. 19)

Es ist eine detaillierte Prüfung der Schutzgebietsverordnung erforderlich und eine frühzeitige Abstimmung mit der Naturschutzbehörde, um eine Genehmigung zu erhalten.

Bauplanungsrecht

Die Errichtung eines PV-Zauns auf Freiflächen in einem Landschaftsschutzgebiet ist nicht automatisch zulässig und erfordert eine gesonderte Prüfung durch die Gemeinde Wang sowie das Landratsamt Freising.

Im Außenbereich nach § 35 BauGB (§ 35 *BauGB - Einzelnorm*, o. J.) sind PV-Anlagen grundsätzlich nur in bestimmten Fällen privilegiert, etwa entlang von Autobahnen oder Schienenwegen bis zu 200 m Entfernung. Falls der PV-Zaun nicht unter diese Privilegierung fällt, ist eine Änderung des Flächennutzungsplans oder die Aufstellung eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans nach § 12 BauGB erforderlich (§ 12 *BauGB - Einzelnorm*, o. J.; Malte Stöppler et al., 2024, S. 16).

Eine Abstimmung mit der Gemeinde Wang und dem Landratsamt Freising ist erforderlich, um die bauplanungsrechtliche Zulässigkeit zu klären.

Genehmigungsverfahren

Aufgrund der Lage im Landschaftsschutzgebiet ist eine Befreiung oder Ausnahmegenehmigung gemäß § 67 BNatSchG erforderlich. Dafür muss nachgewiesen werden, dass keine erheblichen Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes entstehen, ein öffentliches Interesse an der Errichtung des PV-Zauns besteht (z. B. nachhaltige Energiegewinnung) und Kompensationsmaßnahmen zur ökologischen Aufwertung des Gebiets durchgeführt werden (§ 67 *BNatSchG - Einzelnorm*, o. J.)

Eine offizielle Voranfrage bei der Unteren Naturschutzbehörde des Landratsamts Freising kann klären, ob und unter welchen Bedingungen eine Genehmigung erteilt werden könnte.

Ökologische Rahmenbedingungen

Neben den rechtlichen Anforderungen sind auch ökologische Faktoren entscheidend für die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens.

Eingriffsregelung

Die Errichtung einer PV-Anlage in einem Landschaftsschutzgebiet stellt einen direkten Eingriff in Natur und Landschaft dar. Nach der Eingriffs-Ausgleichs-Regelung des Bundesnaturschutzgesetzes müssen Maßnahmen zur Vermeidung, Minderung oder Kompensation von Umweltschäden ergriffen werden (Malte Stöppler et al., 2024).

Eine ökologische Standortbewertung durch einen Fachgutachter ist erforderlich, um geeignete Ausgleichsmaßnahmen festzulegen.

Artenschutz

Da sich das Anwesen in einem Landschaftsschutzgebiet befindet, besteht eine erhöhte Wahrscheinlichkeit, dass geschützte Arten in der Umgebung vorkommen (Malte Stöppler et al., 2024). Eine artenschutzrechtliche Prüfung (ASP) ist daher erforderlich.

Besonders zu prüfen sind der Vogelschutz, da PV-Module durch Reflexionen Zugvögel beeinträchtigen können, sowie der Schutz von Fledermäusen und Amphibien, deren Lebensraum durch die Anlage verändert werden könnte.

Eine Artenschutzprüfung durch einen Experten wird empfohlen.

Bodenschutz

Da der Standort landwirtschaftlich genutzt wird, ist darauf zu achten, dass die landwirtschaftliche Nutzung erhalten bleibt und keine Bodenversiegelung erfolgt.

Bodenschutzmaßnahmen sollten so konzipiert sein, dass sie eine landwirtschaftliche Nutzung zwischen den Modulreihen ermöglichen. Die Vorschriften des Bodenschutzkonzepts des Energie-Atlas Bayern sind zu beachten (Bellingrath-Kimura et al., 2023)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Errichtung eines PV-Zauns aufgrund der Lage innerhalb eines Landschaftsschutzgebiets mit besonderen Herausforderungen verbunden ist. Eine detaillierte Prüfung und Genehmigung durch das Landratsamt Freising und die Untere Naturschutzbehörde ist zwingend erforderlich.

Rechtliche Hürden bestehen, da eine Ausnahmegenehmigung oder Befreiung von den Landschaftsschutzauflagen erforderlich ist. Ökologische Herausforderungen betreffen die Eingriffsregelung und Artenschutzmaßnahmen, die beachtet werden müssen.

Eine abschließende Beurteilung der Machbarkeit kann nur durch eine detaillierte Prüfung der lokalen Schutzgebietsverordnung erfolgen. Eine enge Abstimmung mit den zuständigen Behörden ist essenziell, um die Genehmigungsfähigkeit des Vorhabens zu bewerten

3 Analyse und Bewertung der Umsetzungsmöglichkeiten

3.1 Einführung in die Untersuchung

Zunächst wird die energetische Analyse und Konzeptentwicklung für die Umstellung des Anwesens auf eine weitestgehend erneuerbare Energieversorgung durchgeführt. Ziel ist es, die bestehende Energieinfrastruktur so zu optimieren, dass der Energieverbrauch des Anwesens überwiegend durch PV-Systeme gedeckt werden kann.

Es wird überprüft ob durch die Installation eines PV-Zauns entlang den Pferdekoppeln eine möglichst gleichmäßige und effiziente Stromerzeugung über den gesamten Tagesverlauf hinweg erreicht werden kann.

Im Rahmen der Untersuchungen werden die technischen und wirtschaftlichen Potenziale dieser Maßnahmen analysiert. Die verfügbaren Flächen werden hinsichtlich ihrer Eignung für die Installation von PV-Modulen bewertet und es werden Vorschläge zur optimalen Dimensionierung und Ausrichtung der Anlagen entwickelt. Zudem wird geprüft, inwiefern die geplanten Maßnahmen zur Reduktion der Abhängigkeit von externen Energiequellen und zur Erreichung der angestrebten Energieneutralität des Anwesens beitragen können.

3.2 Potenzialanalyse

Für das Jahr 2024 liegen die viertelstunden genauen Lastgangsdaten bis Oktober vor, sodass eine erste Abschätzung des elektrischen Energiebedarfs vorgenommen werden kann. Die vorläufige Analyse dieser Daten deutet darauf hin, dass der Energieverbrauch im Jahr 2024 im Vergleich zu 2023 gestiegen ist. Dennoch basiert die detaillierte Untersuchung auf den vollständigen Lastgangsdaten des Jahres 2023 wie in Abbildung 10 und 11 zu sehen.

Ermittlung der benötigten Leistung und Energie (Lastprofil-Analyse 2023)

- Gesamtbezug elektrischer Energie 2023: 126.076kWh
- Gesamtproduktion der bestehenden PV-Anlagen: ca.125.000 kWh
- Maximale bezogene Leistung: 65,34 kW am 29. November 2023 um 08:45 Uhr

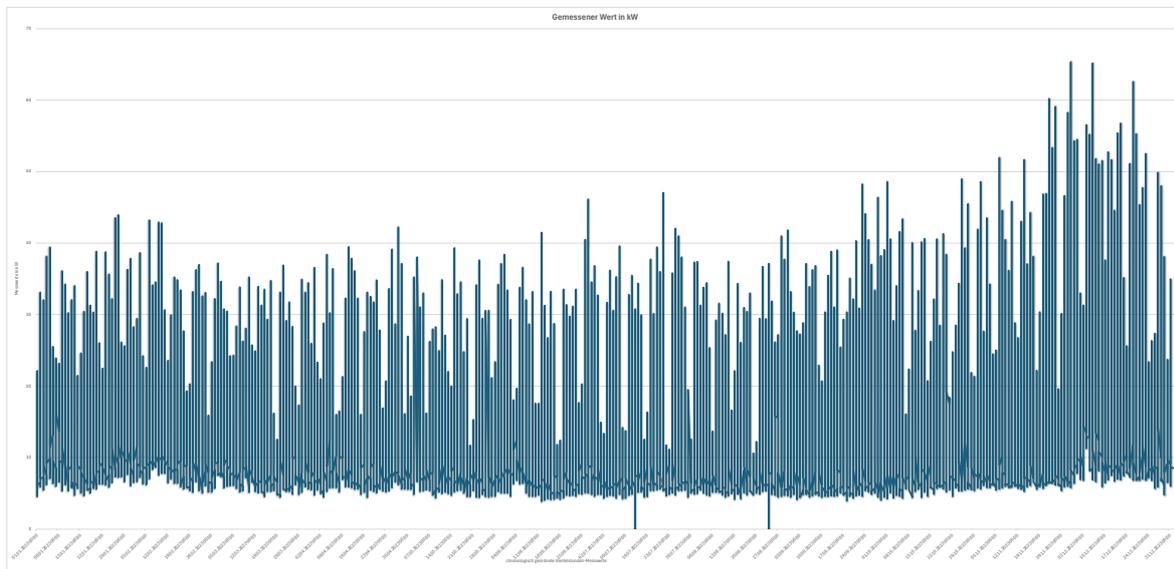


Abbildung 10: Lastgangkurve 2023

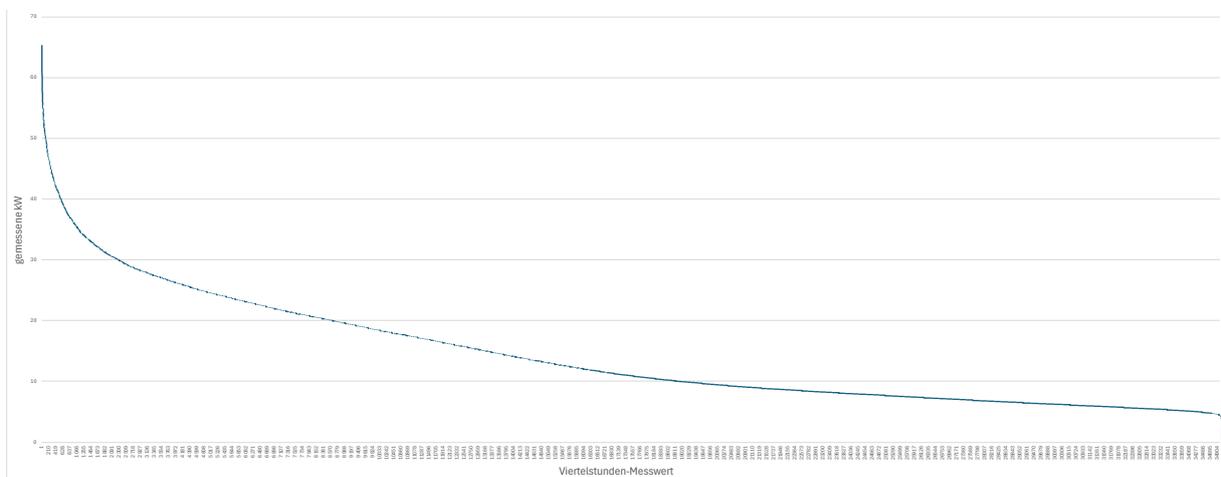


Abbildung 11: Leistungskurve abfallend nach Leistung geordnet

Tabelle 1: Daten aus Lastgangkurve 2023

Durchschnittliche Leistung	14,39kW
Median	10,92kW
Leistung über 40 kW	514 Mal
Leistung über 50 kW	188 Mal
Leistung über 60 kW	9 Mal

3.2.1 Ermittlung des Energiebedarfs im Falle einer Dunkelflaute

Die „Dunkelflauten sind mehrtägige Perioden mit bewölkten (Dunkel-) und windstillen (Flaute) Bedingungen. Der besondere Fall einer Dunkelflaute in Kombination mit kälteren als normalen Bedingungen wird als kalte Dunkelflaute bezeichnet“ (Beideck, 2023).

In den Abbildungen 12 und 13 ist der Unterschied in der Erzeugung von PV-Strom von Schönwetter Phasen in der Kalenderwoche 28 (im Sommer), zu Dunkelflauten in der Kalenderwoche 48 (im Winter) zu erkennen. Um höchstmögliche Autarkie zu erreichen, muss insbesondere der Verbrauch an elektrischer Energie während der Dunkelflaute betrachtet werden. Ein Batteriespeicher müsste ausreichende Kapazität aufweisen, um diesen Verbrauch decken zu können. Zudem muss beachtet werden, dass der Batteriespeicher vor der Dunkelflaute vollständig über die PV-Anlagen aufgeladen werden müsste.

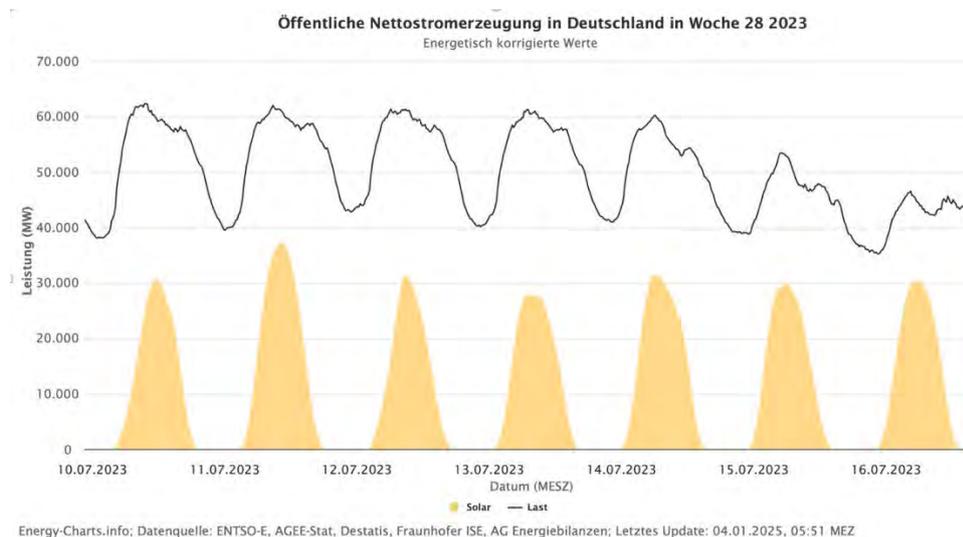


Abbildung 12: Leistung PV KW28/2023
(StromproduktionEnergy-Charts,o. J.-b)

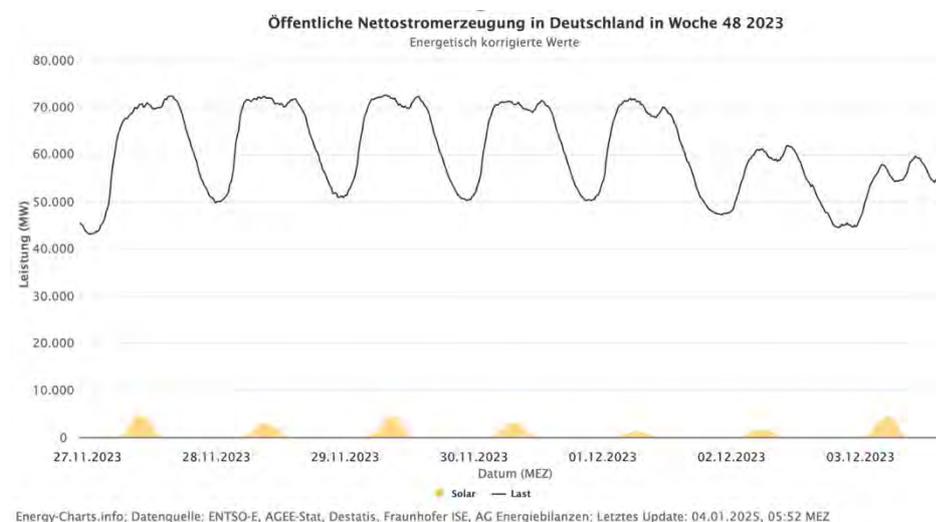


Abbildung 13: Leistung PV KW48/2023 – Dunkelflaute
(StromproduktionEnergy-Charts,o. J.-b)

Auslegung des Batteriespeichers für eine exemplarische Dunkelflaute

Die bezogene Leistung vom Energielieferanten im Zeitraum 27.11. – 03.12.2023 beträgt 3.683 kWh. Da keine verlässliche Quelle für den spezifischen Entladeverlust von Batteriespeichern unter den gegebenen Bedingungen vorliegt, wird ein durchschnittlicher Entladeverlust von ca. 5 % angenommen. Die notwendige Speicherleistung berechnet sich wie folgt: $3.683 \text{ kWh} \times 1,05 = 3.877 \text{ kWh}$

Somit ergibt sich eine erforderliche Speicherleistung von ca. 3.877 kWh.

3.2.2 Auslegung der Batteriespeicher und der PV-Anlagengröße

Bei der Analyse der Speicherauslegung im Gewerbe wurde sich an den Empfehlungen der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin orientiert (Zoll et al., 2023).

Wie sehr steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad?

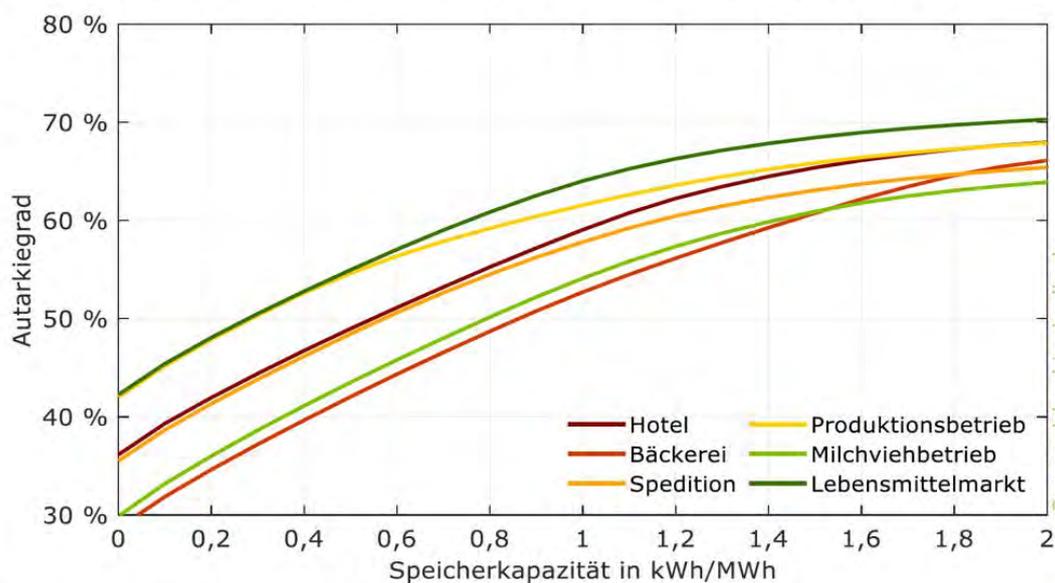


Abbildung 14: Wie sehr steigert ein Batteriespeicher den Autarkiegrad?
(Zoll et al., 2023)

Die Abbildung 14 zeigt den Einfluss des Batteriespeicherkapazitätsverhältnisses auf den Autarkiegrad von Produktionsbetrieben, dargestellt durch die gelbe Kurve. Es ist erkennbar, dass mit zunehmendem Speicherkapazitätsverhältnis der Autarkiegrad steigt, jedoch mit einer abnehmenden, ab 1,8 kWh/MWh nur noch geringen Steigerung.

Die Grafik verdeutlicht den positiven Effekt eines Batteriespeichers auf die Eigenversorgung, da überschüssiger Solarstrom gespeichert und zeitlich verschoben genutzt werden kann. Mit zunehmendem Speicherkapazitätsverhältnis flacht die Kurve ab, was darauf hinweist, dass der zusätzliche Nutzen pro zusätzlicher Speichereigröße sukzessive sinkt. Dies deutet auf einen sinkenden Grenznutzen der Speichergröße und fallende Autarkiegewinne hin.

Die begrenzte Steigerung des Autarkiegrads trotz wachsender Speichergröße ist darauf zurückzuführen, dass der Lastgang von Produktionsbetrieben oft durch kontinuierlichen Energiebedarf geprägt ist. Auch wenn Batteriespeicher eine bessere Nutzung von Solarstrom ermöglichen, verbleibt phasenweise (Dunkelflaute) ein Energiebedarf, der aus dem Netz zu decken ist.

Auf Basis dieser Vorgabe ergibt sich zur Überbrückung der Dunkelflaute ein Speicherverhältnis von 15,15 Speicherkapazität / MWh Energieverbrauch (3.788 kWh Bruttoenergieinhalt der Batterie / 250 MWh jährlicher Energieverbrauch = 15.15).

Des Weiteren empfehlen die Autoren, dass Speicher:

1. „•nur installiert werden, wenn ausreichend Solarstromüberschüsse anfallen. Je nach Gewerbetyp ist hierzu eine PV-Leistung von min. 0,4 kWp bis 0,6 kWp je 1 MWh Stromverbrauch pro Jahr erforderlich.
2. •im Verhältnis zur PV-Anlage nicht zu groß sein. Die nutzbare Speicherkapazität max. 1 kWh je 1 kWp PV-Leistung betragen.
3. •unter Berücksichtigung des individuellen Lastprofils ausgelegt werden. Je nach Gewerbetyp sollte die nutzbare Speicherkapazität 1 kWh bis 1,5 kWh je 1 MWh Stromverbrauch pro Jahr nicht überschreiten“ (Zoll et al., 2023).

Wie beeinflusst die PV-Leistung den Autarkiegrad?

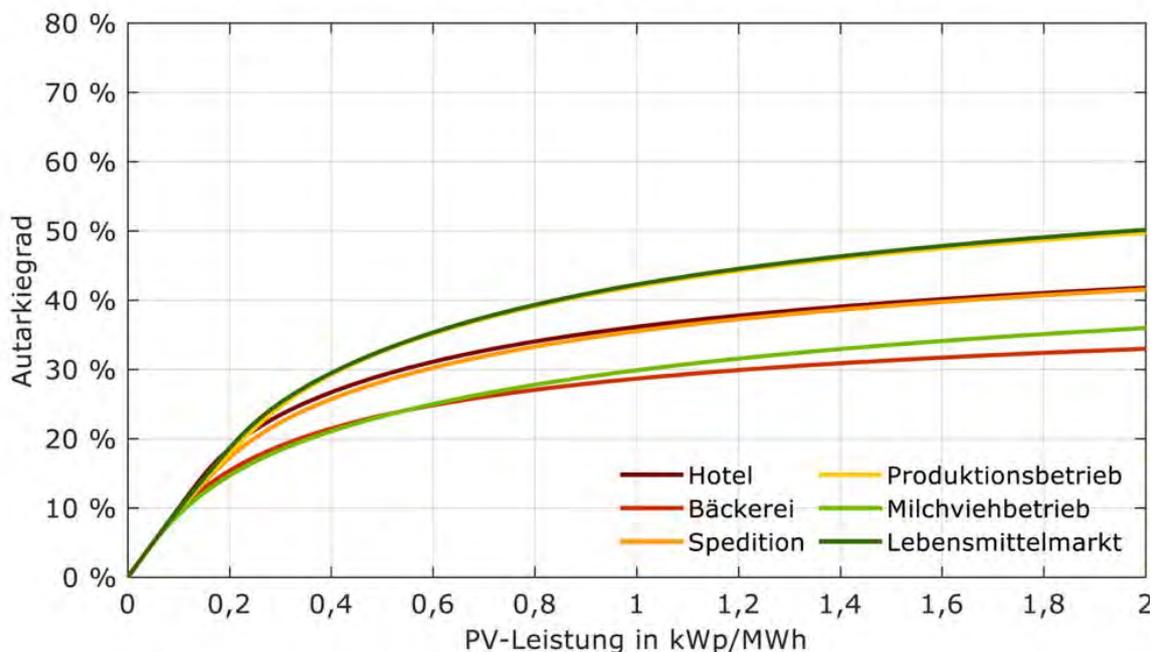


Abbildung 15: Wie beeinflusst die PV-Leistung den Autarkiegrad?
(Zoll et al., 2023)

Die Abbildung 15 zeigt den Zusammenhang zwischen der installierten PV-Leistung in kWp pro MWh Jahresverbrauch und dem erreichbaren Autarkiegrad für verschiedene Betriebe.

Der Fokus liegt hier auf Produktionsbetrieben, die in der Grafik durch die gelbe Linie dargestellt sind.

Es ist erkennbar, dass der Autarkiegrad von Produktionsbetrieben mit steigender PV-Leistung zunimmt, jedoch mit einer abnehmenden Steigung. Dies bedeutet, dass der zusätzliche Nutzen pro zusätzlichem kWp installierter PV-Leistung mit wachsender Anlagengröße geringer wird.

Ein Verhältnis PV-Leistung zu verbrauchter Energie größer als 2 bewirkt nur noch einen geringen Anstieg der Autarkie.

3.3 Autarkiematrix

Zur Erstellung der Autarkiematrix Abbildung 16 wird als Berechnungsgrundlage das Tool „PV_mit_Batteriespeicher“ (Prof. Dr. Henrik te Heesen, 2024) verwendet. Da keine vollständige Lastgangkurve des Eigenverbrauches vorliegt, wird die Lastgangkurve des Energiebezugs zur Berechnung herangezogen. Unter Verwendung von Werten von 0-1300kWh Speichergröße und 0-1300kWp Leistung wurde damit eine Autarkiematrix erstellt.

Die resultierende Matrix in Abbildung 14 ermöglicht es, den zu erwartenden Autarkiegrad für verschiedene Dimensionierungen der PV-Anlage und des Speichers abzulesen.

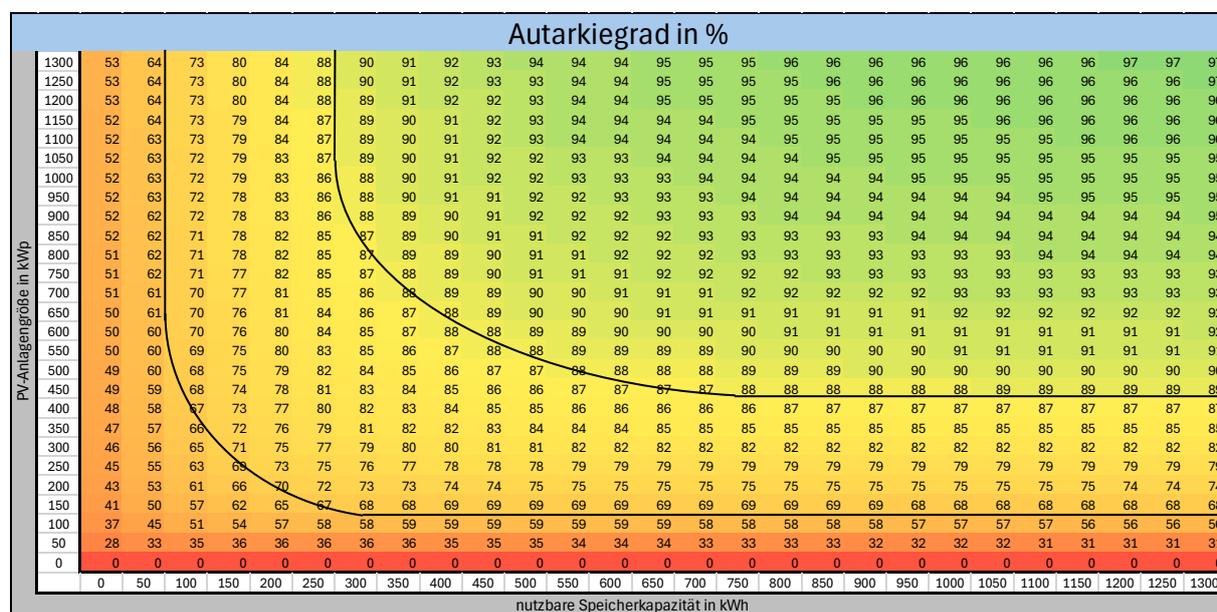


Abbildung 16: Autarkiematrix

Bereiche mit niedrigen Autarkiegraden unter 50 % (rote Bereiche) weisen darauf hin, dass entweder die installierte PV-Leistung, die Speicherkapazität oder beide nicht ausreichend, um eine signifikante Eigenversorgung zu ermöglichen. In den mittleren Autarkiebereichen zwischen 50 % und 90 % (gelbe Bereiche) kann durch eine relative moderate PV-Leistung und eine angemessene Batteriespeicherkapazität bereits eine deutliche Reduzierung des

Netzstrombezugs erreicht werden. Hohe Autarkiegrade von über 90 % (grüne Bereiche) zeigen Kombinationen, bei denen eine hohe Eigenversorgung erreicht werden kann. Hierzu sind sowohl eine hohe PV-Leistung als auch eine große Batteriespeicherkapazität notwendig.

Die Matrix bietet eine Entscheidungsgrundlage eine sinnvolle Lösung für das Unternehmen zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass eine weitestgehende Autarkie nicht zwangsläufig die beste Option ist. Eine vollständige Unabhängigkeit erfordert große PV-Kapazitäten sowie teure Batteriespeicher, was zu einer wirtschaftlich ineffizienten Lösung führt. Stattdessen wird durch die Analyse dreier Szenarien untersucht, welche Kombination von PV-Leistung und Speicher die optimale Lösung für das Unternehmen darstellt.

Im Folgende werden drei unterschiedliche Szenarien basierend auf den Ergebnissen der Autarkiematrix untersucht, um somit eine optimale Strategie für die PV-Integration zu ermitteln.

3.3.1 Variante 1: Minimalausbau

Ausgangslage und Zielsetzung

In diesem Szenario wird der minimale Zubau an PV-Leistung und Speicherleistung bei gleichzeitiger relevanter Autarkie betrachtet. Dabei werden PV-Anlage und Batteriespeicher so dimensioniert, dass im Hochsommer die Energieversorgung nahezu autark ist.

PV-Anlage mit 150kWp und Batteriespeicher 150kWh

Tabelle 2: Prognose Variante 1

PV-Stromertrag	139.865 kWh
Direkter Eigenverbrauch	51.625 kWh
Batterienutzung zur Deckung des Verbrauchs	26.804 kWh
Netzbezug	47.637 kWh
Netzeinspeisung	55.243 kWh
Batterieverluste	6.314 kWh
Autarkiegrad	62 %

Die jährliche Erzeugung und der Verbrauch im Monatsverlauf in Abbildung 17 und 18 zeigen eine starke saisonale Abhängigkeit der Photovoltaikerzeugung. In den Sommermonaten von Mai bis Juli, werden Spitzenwerte von über 20.000 kWh pro Monat erreicht, während die Erzeugung in den Wintermonaten auf ein Minimum ausfällt. Der Eigenverbrauchsanteil ist in den Wintermonaten tendenziell höher, da aufgrund der geringeren PV-Erzeugung weniger Überschuss für die Einspeisung ins Netz zur Verfügung steht.

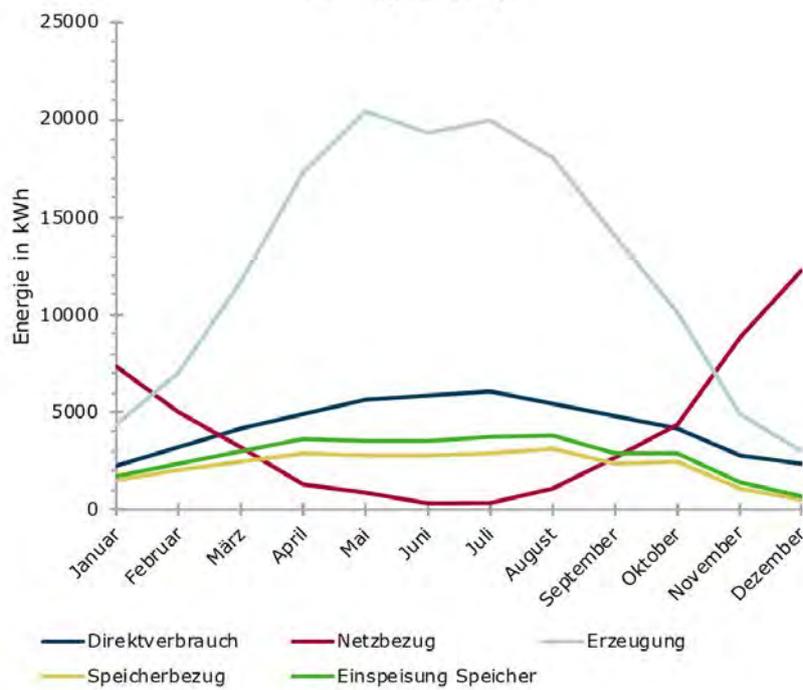


Abbildung 17: Energiebezug Jahresverlauf Variante 1 (Altmeier & te Heesen, 2024)

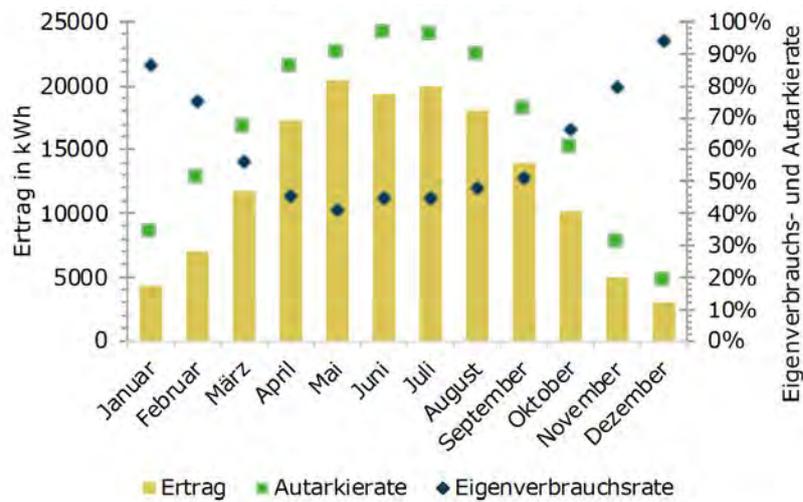


Abbildung 18: Autarkie Jahresbedarf Variante 1 (Altmeier & te Heesen, 2024)

3.3.3 Variante 2: Maximalauslegung nach Vorgabe der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

In diesem Szenario werden die Grenzwerte beziehungsweise Empfehlungen der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (*Empfehlungen zur Speicherauslegung im Gewerbe, o. J.*) angewendet. Zur Analyse wird eine PV-Anlage mit 500kWp und ein Speicher mit 400kWh herangezogen.

PV-Anlage mit 500kWp und Batteriespeicher 400kWh

Tabelle 3: Prognose Variante 2

PV-Stromertrag	511.792 kWh
Direkter Eigenverbrauch	62.077 kWh
Batterienutzung zur Deckung des Verbrauchs	46.631 kWh
Netzbezug	17.359 kWh
Netzeinspeisung	378.114 kWh
Batterieverluste	25.137 kWh
Autarkiegrad	86 %

Die jährliche Erzeugung und der Verbrauch im Monatsverlauf Abbildung 19 und 20 zeigen eine starke saisonale Abhängigkeit der Photovoltaikerzeugung. In den Sommermonaten von Mai bis Juli werden Spitzenwerte von über 70.000 kWh pro Monat erreicht, während die Erzeugung in den Wintermonaten deutlich geringer ausfällt.

Die Autarkierate erreicht in den Sommermonaten nahezu 100 %, während sie in den Wintermonaten aufgrund des erhöhten Netzbezugs auf ca. 12 % sinkt.

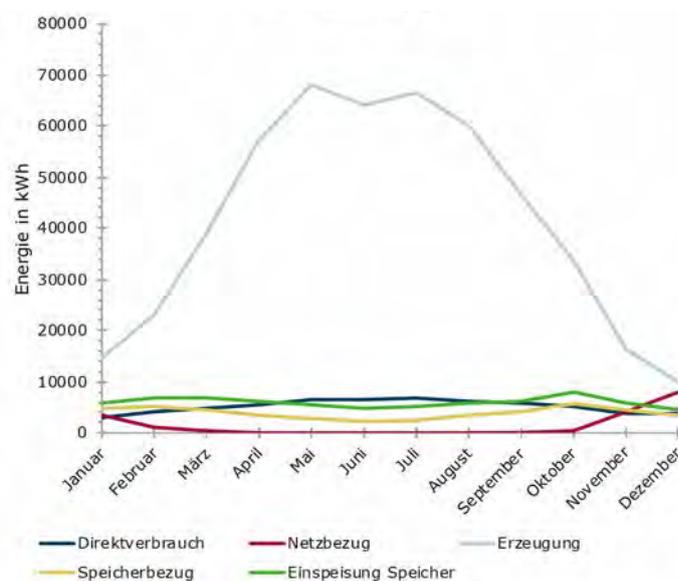


Abbildung 19: Energiebezug Jahresverlauf Variante 2
(Altmeier & te Heesen, 2024)t

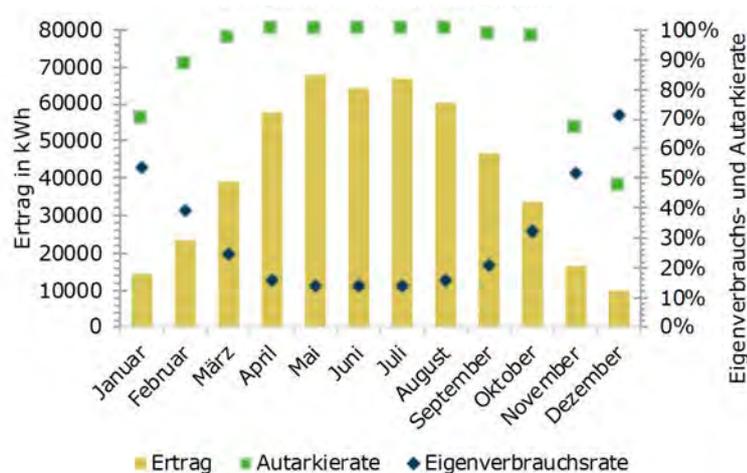


Abbildung 20: Autarkie Jahresbedarf Variante 2
(Altmeier & te Heesen, 2024)

3.3.1 Variante 3: Weitestgehende Autarkie – Vollausbau mit PV-Modulen

Das Ziel dieses Szenarios ist es, die weitestgehende Autarkie zu erreichen, indem die PV-Anlage mit 1300kWp und der Batteriespeicher mit 1300kWh so dimensioniert werden, dass der Eigenverbrauch maximiert und der Netzbezug minimiert wird. Eine weitestgehende energetische Unabhängigkeit erfordert eine sehr große PV-Anlage und eine sehr große Speicherkapazität. Der sehr große Speicher weist Batterieverluste in Höhe von 96.828 kWh auf, dies ist annähernd der bisherige Bezug vom Energieversorger mit 126.000 kWh. In Abbildung 16: Autarkiematrix sind die ermittelte prognostizierten Werte dieses Szenarios zu entnehmen.

PV-Anlage mit 1300kWp und Batteriespeicher 1300kWh

Tabelle 4: Prognose Variante 3

PV-Stromertrag	984.644 kWh
Direkter Eigenverbrauch	66.659 kWh
Batterienutzung zur Deckung des Verbrauchs	55.326 kWh
Netzbezug	4.081 kWh
Netzeinspeisung	766.081 kWh
Batterieverluste	96.828 kWh
Autarkiegrad	97 %

Die jährliche Erzeugung und der Verbrauch im Monatsverlauf in Abbildung 21 und 22 zeigen eine starke saisonale Abhängigkeit der Photovoltaikerzeugung. In den Sommermonaten von Mai bis Juli, werden Spitzenwerte von über 160.000 kWh pro Monat erreicht, während

die Erzeugung in den Wintermonaten deutlich geringer ausfällt. Die Autarkierate erreicht in den Sommermonaten nahezu 100 %, während sie in den Wintermonaten aufgrund des erhöhten Netzbezugs sinkt trotz des großen Speichers.

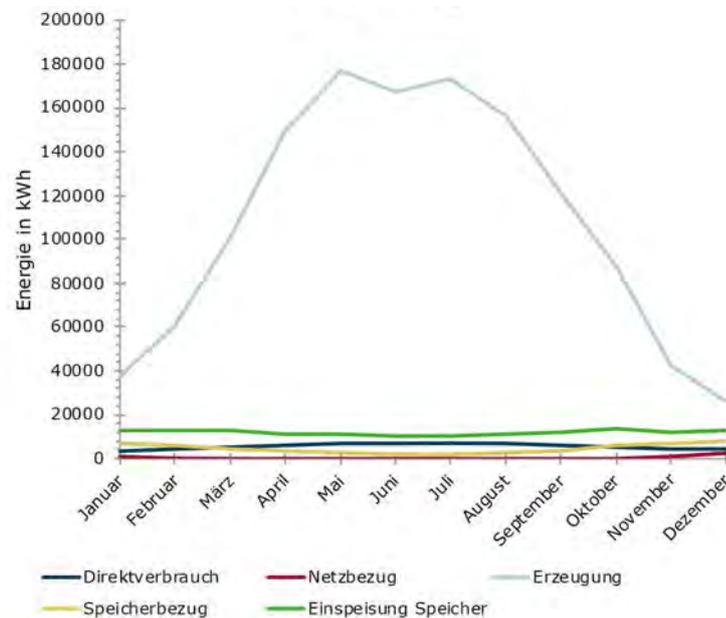


Abbildung 21: Energiebezug Jahresverlauf Variante 3
(Altmeier & te Heesen, 2024)

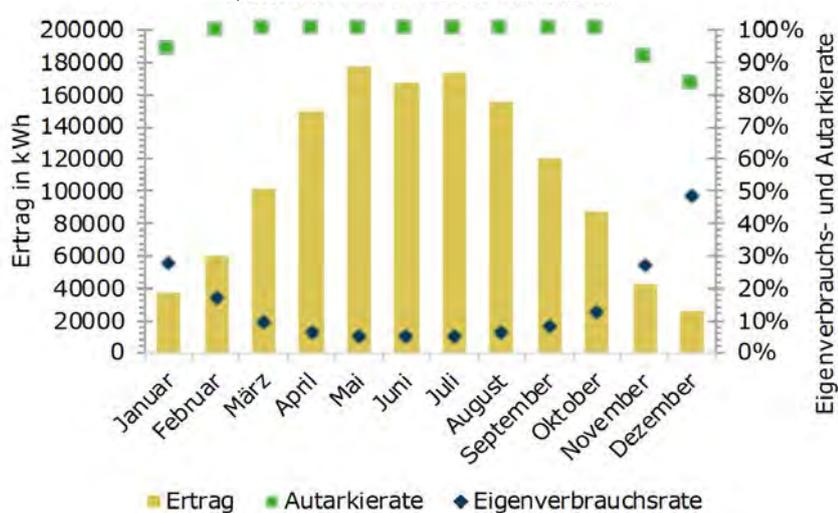


Abbildung 22: Autarkie Jahresbedarf Variante 3
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Eine Variante mit einem Speicher von 3720kWh laut 3.2.1 wird nicht erörtert, da die Speichergröße weit jenseits der Empfehlung von der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin liegt.

3.4 Standortanalyse

Es werden die Dachflächen und Zaunflächen auf Ausbau mit PV-Modulen zu den drei gewünschten PV-Leistungen untersucht.

Zunächst wird die maximal mögliche Belegung der Dachflächen mit PV-Modulen geprüft. Anschließend werden ergänzend PV-Zäune auf den Pferdekoppeln eingeplant, um weitere Potenziale zu nutzen.

Dabei werden verschiedene Gebäude hinsichtlich ihrer Ausrichtung, Dachneigung, Verschattung und Fläche analysiert. Insbesondere große Flächen, wie die Dächer der Wäscherei oder der Lagerhalle, bieten attraktive Voraussetzungen für eine extensive PV-Nutzung.

Die zusätzlich entlang der Pferdekoppel vertikal installierten Module bieten den Vorteil, dass sie bei tiefem Sonnenstand – beispielsweise morgens und nachmittags – gute Erträge liefern und kaum durch Schnee beeinträchtigt werden.

Diese Kombination aus Dachflächen-PV und Zaun-PV ermöglicht eine maximale Nutzung der vorhandenen Flächen, ohne die landwirtschaftliche Nutzung der Koppeln einzuschränken.

3.4.1 Variantenanalyse und Standortbewertung für Photovoltaikanlagen

Die Standortbewertung für die Photovoltaikanlagen erfolgte unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Ein wesentlicher Faktor war die Nähe der Gebäude zum Hausanschlusskasten im Gebäude der Wäscherei Bestand, um die Installations- und Netzanbindungskosten so gering wie möglich zu halten. Die Auswahl der Dächer für die PV-Anlagen basierte auf einer detaillierten Analyse der technischen Machbarkeit unter Einbeziehung von Parametern wie Dachneigung, Verschattung und der potenziellen Stromerzeugung.

Zur Planung der PV-Anlagen wurde die Software Sunny Design (*Sunny Design*, 2025) genutzt. Mit dieser Software konnten alle Dachflächen sowie der geplante Solarzaun detailliert simuliert werden. Dabei wurden neben der Dachneigung und der genauen Gebäudeausrichtung auch die zu erwartende jährliche Stromerzeugung berechnet. Dies ermöglichten eine präzise Standortbewertung und eine optimierte Belegung der Flächen.

Variante 1

Für Variante 1 wurden ausschließlich die Dächer der Wäscherei Bestand Süd, Nord und Nord Vorbau, der Carport, sowie das Heizgebäude genutzt. Diese Auswahl wurde getroffen, um die PV-Module möglichst nahe am Netzanschlusspunkt zu platzieren und somit Netzverluste zu minimieren.

Tabelle 5: Standortanalyse Variante 1

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596
3	Carport	30	108	48,6	860	41796
Gesamtleistung aller Dächer			364	165,6		139865,4

Wäscherei Bestand Nord-Süd



Abbildung 23: Wäscherei Bestand (Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

- 46 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Wäscherei Bestand: Wäscherei Bestand (Süd))
Azimut: -5°, Neigung: 35°, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 20,70 kWp
- 110 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Wäscherei Bestand: Wäscherei Bestand (Nord))
Azimut: 175°, Neigung: 35°, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 49,50 kWp
- 55 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Wäscherei Bestand Vorbau (Nord))
Azimut: 175°, Neigung: 14°, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 24,75 kWp

- 1 x SMA STP 25-50
- 2 x SMA STP 25-50

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	211	Performance Ratio*:	74,4 %
Peak-Leistung:	94,95 kWp	Spez. Energie-Ertrag*:	719 kWh/kWp
Anzahl der PV-Wechselrichter:	3	Leistungsverluste (in % von PV-Energie):	---
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	75,00 kW	Schiefelast:	0,00 VA
AC-Wirkleistung:	67,50 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
Wirkleistungsverhältnis:	71,1 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	68.234 kWh		
Mehrertrag durch SMA Shadefix:	538 kWh		
Ergienutzungsfaktor:	85,5 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	458 t

*Wichtig: Die angegebenen Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für diese Angaben. Die tatsächlichen Ertragswerte können abweichen. Bitte beachten Sie die Anmerkungen zum Berechnungsverfahren in der Dokumentation der PV-Module oder den einschlägigen Normen zur Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 24: Systemübersicht Wäscherei Bestand (Sunny Design, 2025)

Carport



Abbildung 27: Carport
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht			
108 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex 5+) (05/2024) (Carport: Fläche 1)			
Azimut: -3 °, Neigung: 30 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 48,60 kWp			
2 x SMA STP 25-50			
PV-Auslegungsdaten			
Gesamtanzahl der PV-Module:	108	Spez. Energie-Ertrag*:	860 kWh/kWp
Peak-Leistung:	48,60 kWp	Leistungsverluste (in % von PV-Energie):	---
Anzahl der PV-Wechselrichter:	2	Schiefelast:	0,00 VA
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	50,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
AC-Wirkleistung:	45,00 kW		
Wirkleistungsverhältnis:	92,6 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	41.802 kWh		
Energienutzungsfaktor:	72,3 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	281 t
Performance Ratio*:	63,3 %		

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für den realen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 28: Systemübersicht Carport
(Sunny Design, 2025)

Variante 2

In Variante 2 wurde eine maximale Nutzung aller verfügbaren Dachflächen berücksichtigt, wodurch eine Gesamtleistung von 522,45 kWp erreicht werden könnte. Dafür wurden sämtliche zusätzlichen geeigneten Dächer in die Analyse aufgenommen, um das vollständige Potenzial zur PV-Integration ermitteln. Die Systemdaten der erweiterten PV-Installation wurden mit der Simulationssoftware Sunny Design berechnet und integriert, um eine fundierte Bewertung der Energieerträge und der technischen Machbarkeit sicherzustellen.

Tabelle 6: Standortanalyse Variante 2

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883
1	Wäscherei Bestand Nord Vorba	14	55	24,75	719	17795
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596
3	Carport	30	108	48,6	860	41796
4	Jugendherberge Westdach	39	48	33,3	960	31968
4	Jugendherberge Ostdach	39	155	50,4	960	48384
5	Mietgebäude 1 Nordwest	30	72	33,3	678	22577
6	Mietgebäude 2 Südwest	50	27	14,4	846	12182
6	Mietgebäude 2 Nordost	50	29	9,9	846	8375
7	Pferdestall 1 Nordwest	25	30	14,4	943	13579
7	Pferdestall 1 Südost	25	46	19,8	943	18671
8	Geräteschuppen Nord	16	44	19,8	1010	19998
8	Geräteschuppen Süd	16	44	19,8	1010	19998
9	Pferdestall 2 Ost	14	125	58,5	1021	59729
9	Pferdestall 2 West	14	125	58,5	1021	59729
Gesamt aller Dächer			1164	522,45		472851,45

Jugendherberge Ost-West

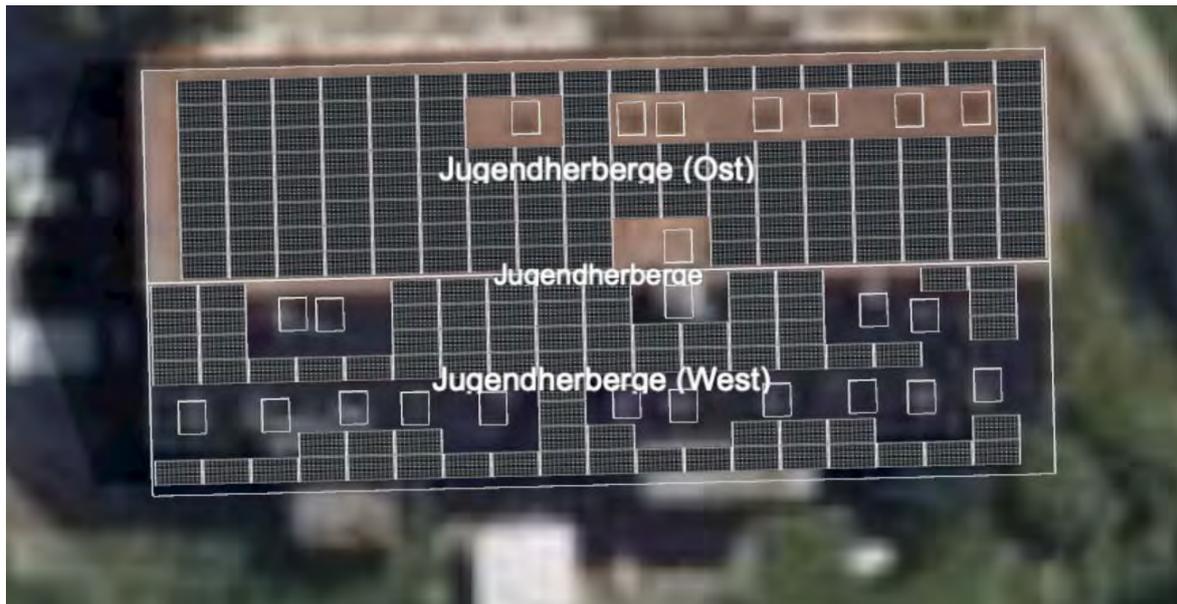


Abbildung 29: Jugendherberge
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

74 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Jugendherberge: Jugendherberge (West))

Azimut: 88 °, Neigung: 36 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 33,30 kWp

112 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Jugendherberge: Jugendherberge (Ost))

Azimut: -92 °, Neigung: 36 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 50,40 kWp

1 x SMA STP110-60 (CORE2)

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	186	Spez. Energie-Ertrag*:	960 kWh/kWp
Peak-Leistung:	83,70 kWp	Leitungsverluste (in % von PV-Energie):	---
Anzahl der PV-Wechselrichter:	1	Schieflast:	0,00 VA
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	110,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
AC-Wirkleistung:	99,00 kW		
Wirkleistungsverhältnis:	118,3 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	80.343 kWh		
Energienutzungsfaktor:	100 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	540 t
Performance Ratio*:	87,9 %		

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte, die unter mathematisch optimalen Umständen ermittelt wurden. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für diesen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 30: Systemübersicht Jugendherberge
(Sunny Design, 2025)

Mietgebäude 1 Nordwest



Abbildung 31: Mietgebäude 1
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht			
74 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Mietgebäude 1: Mietgebäude 1 (Nordwest))			
Azimut: 152 °, Neigung: 30 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 33,30 kWp			
1 x SMA STP 25-50			
PV-Auslegungsdaten			
Gesamtanzahl der PV-Module:	74	Performance Ratio*:	78,6 %
Peak-Leistung:	33,30 kWp	Spez. Energie-Ertrag*:	678 kWh/kWp
Anzahl der PV-Wechselrichter:	1	Leitungsverluste (in % von PV-Energie):	---
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	25,00 kW	Schiefelast:	0,00 VA
AC-Wirkleistung:	22,50 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
Wirkleistungsverhältnis:	67,6 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	22.574 kWh		
Mehrertrag durch SMA Shadefix:	26 kWh		
Energienutzungsfaktor:	90,9 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	152 t

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für den realen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 32: Systemübersicht Mietgebäude 1
(Sunny Design, 2025)

Mietgebäude 2 Nordost-Südwest

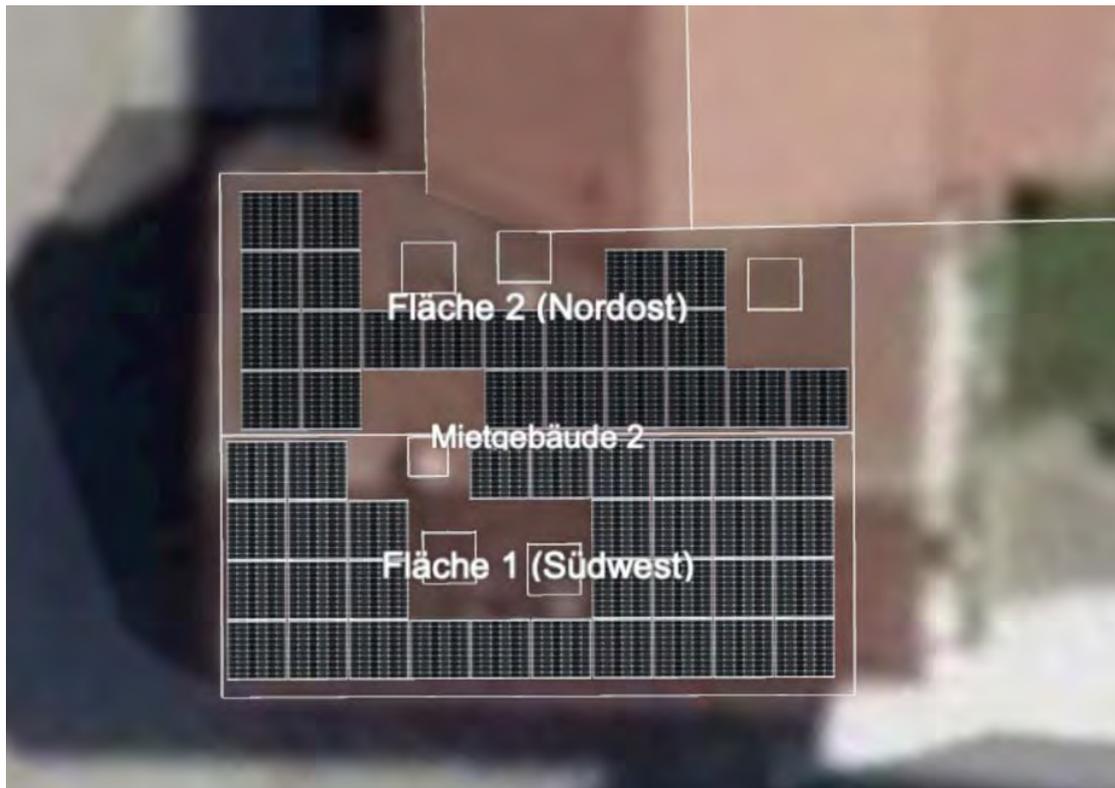


Abbildung 33: Mietgebäude 2
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

32 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Mietgebäude 2: Mietgebäude 2 (Südwest))

Azimut: 65 °, Neigung: 50 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 14,40 kWp

22 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Mietgebäude 2: Mietgebäude 2 (Nordost))

Azimut: -115 °, Neigung: 50 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 9,90 kWp

1 x SMA STP 20-50

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	54	Performance Ratio*:	81,5 %
Peak-Leistung:	24,30 kWp	Spez. Energie-Ertrag*:	846 kWh/kWp
Anzahl der PV-Wechselrichter:	1	Leistungsverluste (in % von PV-Energie):	---
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	20,00 kW	Schiefelast:	0,00 VA
AC-Wirkleistung:	18,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
Wirkleistungsverhältnis:	74,1 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	20.568 kWh		
Mehrertrag durch SMA Shadefix:	176 kWh		
Energienutzungsfaktor:	92,9 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	138 t

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für diesen realen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände (z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module).

Abbildung 34: Systemübersicht Mietgebäude 2
(Sunny Design, 2025)

Pferdestall 1 Northwest-Südost



Abbildung 35: Pferdestall 1
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

32 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Pferdestall: Pferdestall 1 (Nordwest))

Azimet: 154 °, Neigung: 25 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 14,40 kWp

44 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Pferdestall: Pferdestall 1 (Südost))

Azimet: -26 °, Neigung: 25 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 19,80 kWp

2 x SMA STP 20-50

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	76	Performance Ratio*:	81,7 %
Peak-Leistung:	34,20 kWp	Spez. Energie-Ertrag*:	943 kWh/kWp
Anzahl der PV-Wechselrichter:	2	Leistungsverluste (in % von PV-Energie):	---
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	40,00 kW	Schieflast:	0,00 VA
AC-Wirkleistung:	36,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
Wirkleistungsverhältnis:	105,3 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	32.235 kWh		
Mehrertrag durch SMA Shadefix:	392 kWh		
Energienutzungsfaktor:	93,2 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	216 t

*Wichtig: Die angegebenen Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für den realen Ertragswert, der von den hier angegebenen Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 36: Systemübersicht Pferdestall 1
(Sunny Design, 2025)

Geräteschuppen Nord-Süd

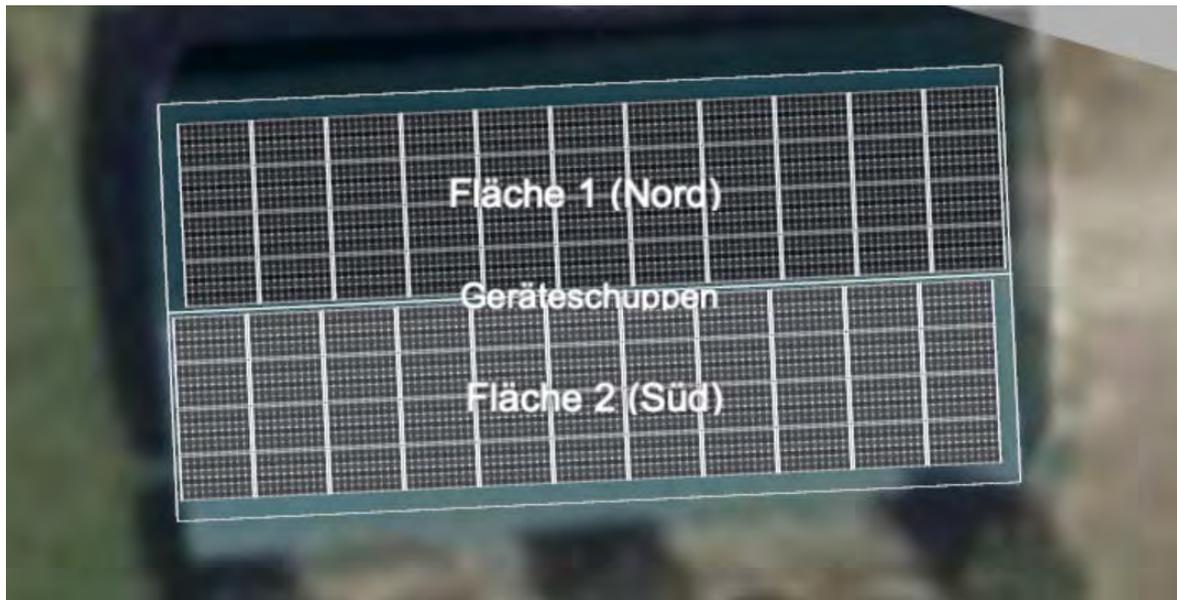


Abbildung 37: Geräteschuppen
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

44 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Geräteschuppen: Fläche 1 (Nord))

Azimut: 161 °, Neigung: 16 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 19,80 kWp

44 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Geräteschuppen: Fläche 2 (Süd))

Azimut: -19 °, Neigung: 16 °, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 19,80 kWp

1 x SMA STP 50-40/41 (CORE1)

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	88	Performance Ratio*:	87,5 %
Peak-Leistung:	39,60 kWp	Spez. Energie-Ertrag*:	1010 kWh/kWp
Anzahl der PV-Wechselrichter:	1	Leistungsverluste (in % von PV-Energie):	---
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	50,00 kW	Schieflast:	0,00 VA
AC-Wirkleistung:	45,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
Wirkleistungsverhältnis:	113,6 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	39.999 kWh		
Mehrertrag durch SMA Shadefix:	0 kWh		
Energienutzungsfaktor:	100 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	269 t

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für den realen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 38: Systemübersicht Geräteschuppen
(Sunny Design, 2025)

Pferdestall 2 Ost-West



Abbildung 39: Pferdestall 2
(Sunny Design, 2025)

Systemübersicht

130 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Pferdestall: Pferdestall 2 (Ost))

Azimet: -107°, Neigung: 14°, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 58,50 kWp

130 x Trina Solar Energy TSM-450NEG9R.25 (Vertex S+) (05/2024) (Pferdestall: Pferdestall 2 (West))

Azimet: 73°, Neigung: 14°, Montageart: Dach, Peak-Leistung: 58,50 kWp

5 x SMA STP 20-50

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	260	Spez. Energie-Ertrag*:	1021 kWh/kWp
Peak-Leistung:	117,00 kWp	Leitungsverluste (in % von PV-Energie):	---
Anzahl der PV-Wechselrichter:	5	Schiefast:	0,00 VA
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	100,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
AC-Wirkleistung:	90,00 kW		
Wirkleistungsverhältnis:	76,9 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	119,44 MWh		
Energienutzungsfaktor:	99,5 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	802 t
Performance Ratio*:	87,4 %		

Alle Werte sind geschätzte Werte basierend auf den angegebenen Parametern. SMA ist eine Marke der SMA Solar Technology AG. Sunny Design ist eine Marke der Sunny Design GmbH. Die PV-Wechselrichter sind von SMA Solar Technology AG. Die PV-Module sind von Trina Solar Energy. Die PV-Systeme sind von Sunny Design GmbH. Die PV-Systeme sind von Sunny Design GmbH.

Abbildung 40: Systemübersicht Pferdestall 2
(Sunny Design, 2025)

Variante 3

Diese Variante beinhaltet neben der vollständigen Nutzung aller Dachflächen zusätzlich eine Erweiterung durch PV-Zäune entlang der Pferdekoppeln. Die Module wurden in Ost-West-Ausrichtung sowie in Südausrichtung platziert, um eine bestmögliche Energieausbeute zu erzielen. Insgesamt ergibt sich in dieser Variante eine Gesamtleistung von 1299,07 kWp, wovon 776 kWp auf die Freiflächen entfallen.

Tabelle 7: Standortanalyse Variante 3

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883
1	Wäscherei Bestand Nord Vorba	14	55	24,75	719	17795
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596
3	Carport	30	108	48,6	860	41796
4	Jugendherberge Westdach	39	48	33,3	960	31968
4	Jugendherberge Ostdach	39	155	50,4	960	48384
5	Mietgebäude 1 Nordwest	30	72	33,3	678	22577
6	Mietgebäude 2 Südwest	50	27	14,4	846	12182
6	Mietgebäude 2 Nordost	50	29	9,9	846	8375
7	Pferdestall 1 Nordwest	25	30	14,4	943	13579
7	Pferdestall 1 Südost	25	46	19,8	943	18671
8	Geräteschuppen Nord	16	44	19,8	1010	19998
8	Geräteschuppen Süd	16	44	19,8	1010	19998
9	Pferdestall 2 Ost	14	125	58,5	1021	59729
9	Pferdestall 2 West	14	125	58,5	1021	59729
Gesamt aller Dächer			1164	522,45		472851,45
Freifläche						
	Ost-West-Ausrichtung	90	995	538,49	659	354864,91
	Süd-Ausrichtung	0	440	238,13	659	156927,67
Gesamt Agri-Flächen			1435	776,62		511792,58
Gesamt Dächer und Agri				1299,07		984644,03

Die Standortanalyse für die geplanten Photovoltaikanlagen erfolgte unter Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte. Zunächst wurden alle relevanten Gebäude und Flächen durch Bilddokumentation erfasst, um eine umfassende Datengrundlage zu schaffen. Dabei wurden wesentliche Parameter wie Dachausrichtung und Neigungswinkel, mögliche Verschattung durch umliegende Strukturen sowie die potenzielle Stromerzeugung anhand der verfügbaren Flächen berücksichtigt.

Die bestehende Netzkapazität wurde analysiert, um die Möglichkeiten der Netzeinspeisung zu evaluieren. Die technische Machbarkeitsanalyse umfasste die Berechnung der erwarteten jährlichen Stromerzeugung pro Dachflächen sowie PV-Zäune.

Pferdekoppel Agri-PV-Zaun



Abbildung 41: PV-Zaun

Systemübersicht

995 x Trina Solar Energy TSM-440NEG9RC.27 (Vertex S+) (05/2023) (Ost-West-Ausrichtung)

Azimit: 90 °, Neigung: 90 °, Montageart: Freie Aufstellung, Peak-Leistung: 538,49 kWp, Bifacial Gain: 23 %

440 x Trina Solar Energy TSM-440NEG9RC.27 (Vertex S+) (05/2023) (Süd-Ausrichtung)

Azimit: 0 °, Neigung: 90 °, Montageart: Freie Aufstellung, Peak-Leistung: 238,13 kWp, Bifacial Gain: 23 %

 **6 x SMA STP110-60 (CORE2)**

 **1 x SMA STP110-60 (CORE2)**

PV-Auslegungsdaten

Gesamtanzahl der PV-Module:	1435	Spez. Energie-Ertrag*:	659 kWh/kWp
Peak-Leistung:	776,62 kWp	Leitungsverluste (in % von PV-Energie):	---
Anzahl der PV-Wechselrichter:	7	Schieflast:	0,00 VA
AC-Nennleistung der PV-Wechselrichter:	770,00 kW	Jährlicher Energieverbrauch:	126 MWh
AC-Wirkleistung:	693,00 kW		
Wirkleistungsverhältnis:	89,2 %		
Jährlicher Energie-Ertrag*:	511,63 MWh		
Energienutzungsfaktor:	99,9 %	CO ₂ -Reduktion nach 20 Jahren:	3.436 t
Performance Ratio*:	87,4 %		

*Wichtig: Die angezeigten Ertragswerte sind Schätzwerte. Sie werden mathematisch ermittelt. SMA Solar Technology AG übernimmt keine Haftung für den realen Ertragswert, der von den hier angezeigten Ertragswerten abweichen kann. Gründe für Abweichungen sind verschiedene äußere Umstände, z. B. Verschmutzungen der PV-Module oder Schwankungen der Wirkungsgrade der PV-Module.

Abbildung 42: Systemübersicht PV-Zaun
(Sunny Design, 2025)

3.4.2 Standortanalyse Batteriespeicher

Die Installation von stationären Batteriespeichern, insbesondere im größeren Leistungsbereich (150 kWh, 400 kWh, 1300 kWh), erfordert ein umfassendes Brandschutzkonzept, das den geltenden gesetzlichen Vorschriften und Normen entspricht. Als grundlegende Orientierung dient die Landesbauordnung (LBO) Bayern (*BayBO: Art. 44a Solaranlagen - Bürgerservice*, o. J.) für allgemeine bauliche Brandschutzanforderungen.

Es wird empfohlen, ein detailliertes Brandschutzkonzept von einem Fachplaner erstellen zu lassen, das im Rahmen des Baugenehmigungsverfahrens geprüft werden muss. Dieses Konzept sollte alle relevanten Aspekte des Brandschutzes abdecken, von der Brandabschnittsbildung und Brandfrüherkennung bis hin zur Brandbekämpfung und den Fluchtwegen zu sehen in Abbildung 42. Die frühzeitige Einbindung der örtlichen Feuerwehr in die Planung wird dringend empfohlen. Eine Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz zur Identifizierung potenzieller Gefahren und Festlegung von Schutzmaßnahmen ist ebenso ratsam wie die Schulung des Personals im Umgang mit den Batteriespeichern und den Sicherheitsvorkehrungen.

Diese Empfehlungen stellen jedoch keine abschließende Beurteilung dar und müssen im konkreten Einzelfall anhand der spezifischen Gegebenheiten und der jeweils geltenden Vorschriften geprüft werden. Die Berücksichtigung der Herstellerangaben zu Brandschutz und Installation sowie die Abstimmung des Versicherungsschutzes sind ebenfalls wichtige Punkte, die im Detail zu prüfen sind. Die hier aufgeführten Informationen dienen als allgemeine Richtlinie und ersetzen keine individuelle Beratung durch Experten.

Kriterium	Aufstellort				
	Technikraum	Separater Batterieraum	Garage [^]	Container	
Wirksamkeit der Brandschutzmaßnahmen	Vor Inbetriebnahme				
	Fluchtwege	-	+	++	-
	Tragwerk mind. Feuerhemmend	-	o	+	++
	Schutz vor mechanischer Beschädigung	o	+	-	++
	Zugangskontrolle	-	+	--	++
	Aufwand bei der Erstellung	o	-	++	-
	Im Betrieb				
	Möglichkeit zur Klimatisierung und Belüftung des Raums	o	o	-	+
	Detektion (Elektrolyt)Gas	-	o	--	++
	Nähe zu brennbaren Materialien	--	o	-	+
	Im Brandfall				
	Schutz vor Brandausbreitung	-	o	-	++
	Ausreichende Ventilation	-	o	+	-
	Rückverfolgung der Alarmierung im Brandfall	o	++	-	++
	Begrenzung der Brandabschnitte	o	+	--	+
	Dichtheit des Raumes zur Sauerstoffreduzierung	o	o	--	++
	Löschwasserrückhaltung	--	+	o	+
	Ableiten von Überdruck	+	o	++	-
	Lösch- und Rettungsarbeiten	-	o	o	-
Zugänglichkeit zu dem Speicher	-	+	--	++	
Realisierbarkeit	Skalierbarkeit	-	o	--	++
	Wartungsaufwand	-	o	+	--
	Aufbaukosten	-	+	++	--
Wirtschaftlichkeit	Zusätzliche Infrastrukturkosten	o	+	+	--
	Instandhaltung	+	++	o	++

Tabelle 1: Bewertung der Wirksamkeit, Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Standorte.

[^]Das Aufstellen eines Batteriespeichers innerhalb einer Garage ist in Deutschland aktuell und auch perspektivisch nicht zulässig.

Legende:	Sehr gut	Gut	Mittel	Schlecht	Sehr schlecht
		++	+	o	-

Abbildung 43: Bewertung der Wirksamkeit, Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Standorte.

(Bewertung von Aufstellorten stationärer Batterieheimspeicher, o. J.)

3.5 Wirtschaftliche Bewertung (Investitionskosten, Amortisation)

Variante 1 :

Die energetische Analyse in Tabelle 8 und Abbildung 44 zeigt, dass die geplante PV-Anlage mit 150 kWp jährlich 139.865 kWh Strom erzeugt, während der Gesamtverbrauch des Anwesens 126.067 kWh beträgt. Davon werden 51.625 kWh direkt genutzt und 26.804 kWh über den 150 kWh Batteriespeicher gespeichert. Dennoch bleibt ein Netzbezug von 47.637 kWh erforderlich, während 55.243 kWh ins Netz eingespeist werden. Der Autarkiegrad liegt bei 62 Prozent, die Eigenverbrauchsrate bei 56 Prozent. Dies verdeutlicht das Potenzial der PV-Anlage zur Reduzierung der Netzabhängigkeit, zeigt aber auch, dass für eine höhere Autarkie eine optimierte Speicher- und Anlagengröße erforderlich wäre.

Tabelle 8: Energiehaushalt pro Jahr Variante 1
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Energiehaushalt pro Jahr	
Stromertrag	139.865 kWh
Stromverbrauch	126.067 kWh
Direkter Eigenverbrauch	51.625 kWh
Eigenverbrauch aus Batterie	26.804 kWh
Netzbezug	47.637 kWh
Netzeinspeisung	55.243 kWh
Batterieverluste	6.314 kWh

Kennzahlen	
Zyklenzahl	1.002
Autarkierate	62%
Eigenverbrauchsrate	56%
Geometrisches Mittel	59%

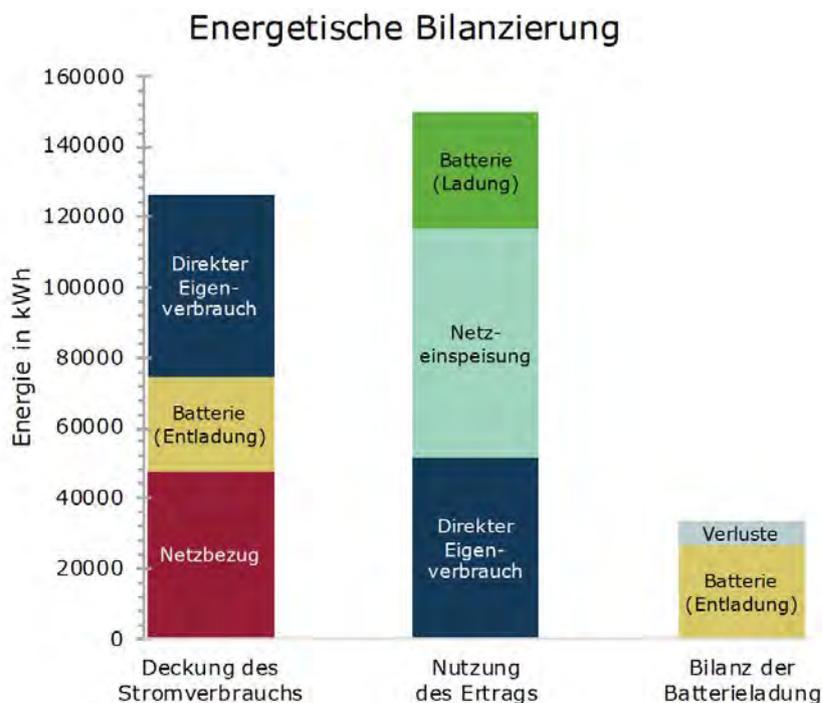


Abbildung 44: Energetische Bilanz Variante 1
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Variante 2:

Die Auswertung in Tabelle 9 und Abbildung 45 weist auf, dass die geplante PV-Anlage mit 500 kWp jährlich 472.851 kWh Strom erzeugt, während der Gesamtverbrauch des Anwesens 126.067 kWh beträgt. Davon werden 62.077 kWh direkt genutzt und 46.631 kWh über den 400 kWh Batteriespeicher gespeichert. Dennoch bleibt ein Netzbezug von 17.359 kWh erforderlich, während 339.173 kWh ins Netz eingespeist werden. Die Batterieverluste belaufen sich auf 25.137 kWh. Der Autarkiegrad liegt bei 86 Prozent, die Eigenverbrauchsrate bei 23 Prozent. Dies verdeutlicht das hohe Potenzial der PV-Anlage zur Reduzierung der Netzabhängigkeit, wobei durch die größere PV-Leistung und Speicherkapazität eine deutlich höhere Eigenversorgung als in der ersten Variante erreicht wird.

Tabelle 9: Energiehaushalt pro Jahr Variante 2
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Energiehaushalt pro Jahr	
Stromertrag	472.851 kWh
Stromverbrauch	126.067 kWh
Direkter Eigenverbrauch	62.077 kWh
Eigenverbrauch aus Batterie	46.631 kWh
Netzbezug	17.359 kWh
Netzeinspeisung	339.173 kWh
Batterieverluste	25.137 kWh

Kennzahlen	
Zyklenzahl	747
Autarkierate	86%
Eigenverbrauchsrate	23%
Geometrisches Mittel	45%

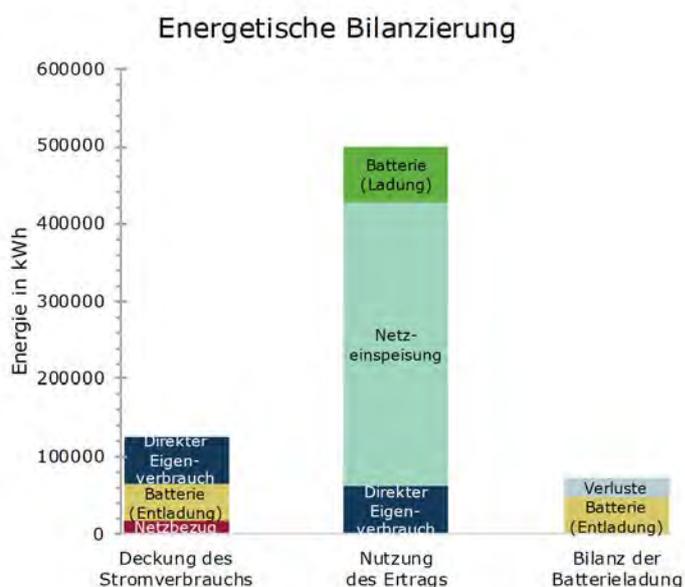


Abbildung 45: Energetische Bilanz Variante 2
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Variante 3:

Die energetische Analyse in Tabelle 10 und Abbildung 46 zeigt, dass die geplante PV-Anlage mit Maximalausbau 1.300 kWp jährlich 984.644 kWh Strom erzeugt, während der Gesamtverbrauch des Anwesens 126.067 kWh beträgt. Davon werden 66.659 kWh direkt genutzt und 55.326 kWh über den 1.300 kWh Batteriespeicher gespeichert. Dennoch bleibt ein Netzbezug von 4.081 kWh erforderlich, während 766.081 kWh ins Netz eingespeist werden. Die Batterieverluste belaufen sich auf 96.828 kWh. Der Autarkiegrad liegt bei 97 Prozent, die Eigenverbrauchsrate bei 12 Prozent. Dies verdeutlicht das hohe Potenzial der PV-Anlage zur Reduzierung der Netzabhängigkeit, zeigt aber auch, dass trotz nahezu vollständiger Autarkie ein großer Teil des erzeugten Stroms nicht selbst genutzt werden kann.

Tabelle 10: Energiehaushalt pro Jahr Variante 3
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Energiehaushalt pro Jahr	
Stromertrag	984.644 kWh
Stromverbrauch	126.067 kWh
Direkter Eigenverbrauch	66.659 kWh
Eigenverbrauch aus Batterie	55.326 kWh
Netzbezug	4.081 kWh
Netzeinspeisung	766.081 kWh
Batterieverluste	96.828 kWh

Kennzahlen	
Zyklenzahl	413
Autarkierate	97%
Eigenverbrauchsrate	12%
Geometrisches Mittel	35%

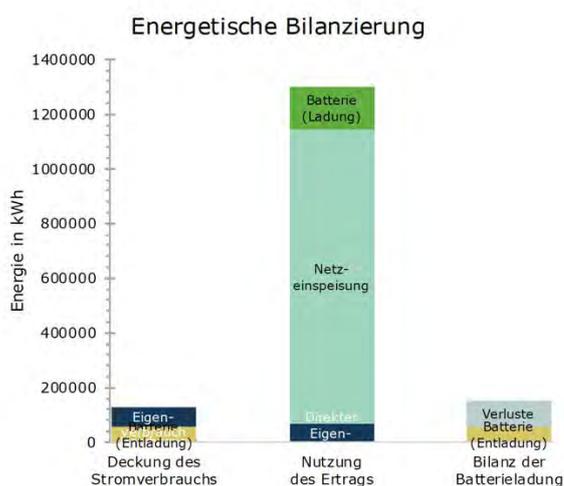


Abbildung 46: Energetische Bilanz Variante 3
(Altmeier & te Heesen, 2024)

Die wirtschaftliche Bewertung der geplanten PV-Anlagen und Batteriespeicherlösungen für das Anwesen umfasst die Analyse der Investitionskosten, der Amortisationszeit sowie der

erwarteten wirtschaftlichen Einsparungen. Dabei werden die drei untersuchten Varianten hinsichtlich ihrer finanziellen Tragfähigkeit und Rentabilität bewertet.

3.5.1 Investitionskosten

Die Investitionskosten setzen sich aus mehreren Komponenten zusammen, darunter die Kosten für die PV-Module, die Batteriespeicher sowie die erforderlichen Installations- und Netzanschlussarbeiten. Die die Hauptbestandteile der Investitionen sind.

PV-Module: Die Kosten für die PV-Module belaufen sich bei den Dachflächen Modulen auf 55,90 € pro Stück (*Trina Vertex S+ 450W Glas-Glas Black Frame TSM-NEG9R.28*, o. J.) und bei den Agri-PV Modulen auf 59,90 € pro Stück (*Trina Solar Vertex S+ 440 Wp bifaziales Glas-Glas Solarmodul TSM-NEG9RC.27*, o. J.) und ist Stand Februar 2025. Die Anzahl der installierten Module variiert je nach Gebäude und verfügbarer Dach- bzw. Freiflächenkapazität. Für die Untersuchung und Simulation wurden für die Dachflächen Trina Solar TSM-450NEG9R.28 Vertex S+ verwendet und für die Agri-PV-Flächen wurden Trina Vertex S+ 440W Bifazial Glas-Glas Full Black TSM-NEG9RC.27 verwendet genauere Technische Daten dazu sind der Anlage 4 und 5 zu entnehmen.

Installationskosten:

Die Montage von PV-Modulen auf Dächern erfordert höhere Installationsaufwände als bodennahe Systeme. Die Installationskosten betragen etwa 1.200 € pro kWp für Dachanlagen und 800 € pro kWp für PV-Zäune auf Freiflächen.

Batteriespeicher:

 <p>Batteriespeicher GRES 150kWh VDE AR-N 4105 konformer...</p> <p>Weitere Informationen finden Sie auch auf unserer FAQ Seite: https://energiewende-faq.scu-group-...</p> <p>89.900,00 €* In den Warenkorb</p>	 <p>Batteriespeicher GRES 225kWh VDE AR-N 4105...</p> <p>Weitere Informationen finden Sie auch auf unserer FAQ Seite: https://energiewende-faq.scu-group-...</p> <p>119.900,00 €* In den Warenkorb</p>	 <p>Batteriespeicher 1075 kWh VDE AR-N 4110 konformer...</p> <p>Weitere Informationen finden Sie auch auf unserer FAQ Seite: https://energiewende-faq.scu-group-...</p> <p>459.000,00 €* In den Warenkorb</p>
---	--	--

Abbildung 47: Batteriespeicher
(Batteriespeicher o. J.)

Die Kosten für die Batteriespeicher hängen von der Kapazität ab und betragen für eine 150 kWh Speicher 72.819 €, für einen 400 kWh Speicher 194.400 € (dieser Preis setzt sich aus 2 x 225 kWh Speicher zusammen) und für einen 1.300 kWh Speicher 468.909 € (setzt sich aus 1075 kWh und 225 kWh Speicher zusammen). Hier sind nur die reinen Stückpreise aufgeführt ohne Transport und Installationskosten. Ein deutlicher Rückgang der Kosten ist zu erwarten, da die Preise fortlaufend stark fallen wie zu sehen in Abbildung 48.

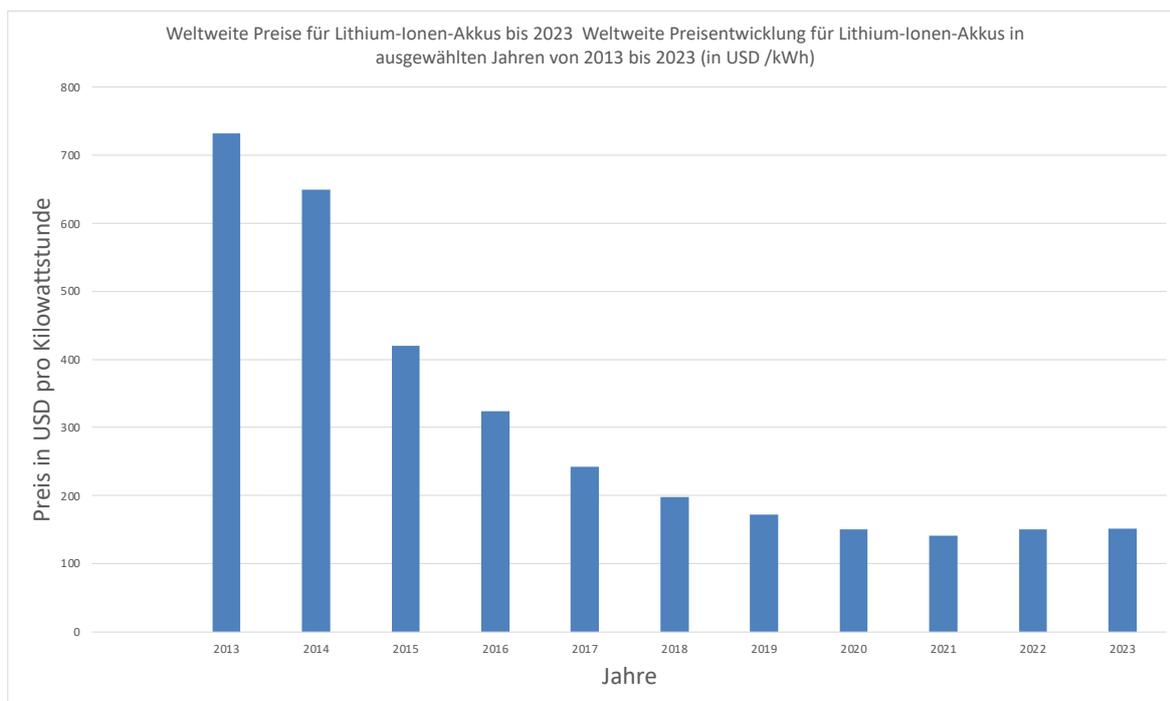


Abbildung 48: Weltweite Preise für Lithium-Ionen-Akkus bis 2023 Weltweite Preisentwicklung für Lithium-Ionen-Akkus in ausgewählten Jahren von 2013 bis 2023 (in USD /kWh)
(Lithium-Ionen Großspeicher, 2022)

Die Installations- und Montagekosten umfassen die mechanische Aufstellung, Verkabelung und die Integration in das bestehende Energiesystem. Diese Aufwendungen steigen mit der Größe des Speichers, da größere Systeme einen höheren technischen und planerischen Aufwand erfordern. Die Kosten belaufen sich hierbei auf etwa 22.000 € für einen 150 kWh Speicher, ca. 58.000 € für einen 400 kWh Speicher und etwa 142.000 € für ein 1.300 kWh System. Bei dieser Rechnung handelt es sich um 30% der Speicherkosten und wird oft in der Praxis bei Planungsbüros zur Kalkulation angewendet. Die Gesamtkosten für die Batteriespeicher inklusive aller zusätzlichen Aufwendungen ergeben sich somit wie folgt: Für ein 150 kWh Speichersystem belaufen sich die Gesamtkosten auf rund 94.819 €, während für ein 400 kWh System 252.400 € und für ein 1.300 kWh System etwa 609.909 € zu veranschlagt sind. Diese Kalkulation berücksichtigt alle notwendigen Maßnahmen zur vollständigen Inbetriebnahme des Speichers, wobei je nach Standort und individuellen Anforderungen zusätzliche Kosten entstehen können.

Transformatoren:

Für die Netzintegration sind Transformatoren erforderlich. In Variante 2 wird ein 800 kVA-Transformator für ca. 70.000 € eingeplant, während Variante 3 einen leistungsfähigeren 1.600 kVA-Transformator für ca. 100.000 € benötigt. Hierbei wurde ebenfalls nur auf den Transformator eingegangen ohne Transport und Installation. Die Kosten für die elektrische Installation sowie den Transport belaufen sich auf etwa 30% der Transformatorenkosten.

Basierend auf der Anzahl der PV-Module wurden die Material- und Installationskosten für die einzelnen Dachflächen sowie die PV-Freiflächen berechnet.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen 11, 12 und 13 zusammengefasst.

3.5.2 Kostenaufstellung

Photovoltaik-Dachanlagen und Agri-PV

Tabelle 11: Kosten Variante 1

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a	Installationskosten	Materialkosten	Gesamtkosten
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883	21.060,00 €	2.180,10 €	23.240,10 €
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591	61.020,00 €	6.316,70 €	67.336,70 €
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596	56.160,00 €	5.813,60 €	61.973,60 €
3	Carport	30	108	48,6	860	41796	58.320,00 €	6.037,20 €	64.357,20 €
Gesamtleistung aller Dächer			364	165,6		139865,4	196.560,00 €	20.347,60 €	216.907,60 €

Tabelle 12: Kosten Variante 2

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a	Installationskosten	Materialkosten	Gesamtkosten
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883	21.060,00 €	2.180,10 €	23.240,10 €
1	Wäscherei Bestand Nord Vorbau	14	55	24,75	719	17795	29.700,00 €	3.074,50 €	32.774,50 €
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591	61.020,00 €	6.316,70 €	67.336,70 €
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596	56.160,00 €	5.813,60 €	61.973,60 €
3	Carport	30	108	48,6	860	41796	58.320,00 €	6.037,20 €	64.357,20 €
4	Jugendherberge Westdach	39	48	33,3	960	31968	25.920,00 €	2.683,20 €	28.603,20 €
4	Jugendherberge Ostdach	39	155	50,4	960	48384	83.700,00 €	8.664,50 €	92.364,50 €
5	Mietgebäude 1 Nordwest	30	72	33,3	678	22577	38.880,00 €	4.024,80 €	42.904,80 €
6	Mietgebäude 2 Südwest	50	27	14,4	846	12182	14.580,00 €	1.509,30 €	16.089,30 €
6	Mietgebäude 2 Nordost	50	29	9,9	846	8375	15.660,00 €	1.621,10 €	17.281,10 €
7	Pferdestall 1 Nordwest	25	30	14,4	943	13579	16.200,00 €	1.677,00 €	17.877,00 €
7	Pferdestall 1 Südost	25	46	19,8	943	18671	24.840,00 €	2.571,40 €	27.411,40 €
8	Geräteschuppen Nord	16	44	19,8	1010	19998	23.760,00 €	2.459,60 €	26.219,60 €
8	Geräteschuppen Süd	16	44	19,8	1010	19998	23.760,00 €	2.459,60 €	26.219,60 €
9	Pferdestall 2 Ost	14	125	58,5	1021	59729	67.500,00 €	6.987,50 €	74.487,50 €
9	Pferdestall 2 West	14	125	58,5	1021	59729	67.500,00 €	6.987,50 €	74.487,50 €
Gesamt aller Dächer			1164	522,45		472851,45	628.560,00 €	65.067,60 €	693.627,60 €

Tabelle 13: Kosten Variante 3

	Standort	Neigung (°)	Modulanzahl	Leistung (kWp)	kWh/kWp	kWh/a	Installationskosten	Materialkosten	Gesamtkosten
1	Wäscherei Bestand Süd	35	39	20,7	719	14883	21.060,00 €	2.180,10 €	23.240,10 €
1	Wäscherei Bestand Nord Vorbau	14	55	24,75	719	17795	29.700,00 €	3.074,50 €	32.774,50 €
1	Wäscherei Bestand Nord	35	113	49,5	719	35591	61.020,00 €	6.316,70 €	67.336,70 €
2	Heizgebäude	23	104	46,8	1017	47596	56.160,00 €	5.813,60 €	61.973,60 €
3	Carport	30	108	48,6	860	41796	58.320,00 €	6.037,20 €	64.357,20 €
4	Jugendherberge Westdach	39	48	33,3	960	31968	25.920,00 €	2.683,20 €	28.603,20 €
4	Jugendherberge Ostdach	39	155	50,4	960	48384	83.700,00 €	8.664,50 €	92.364,50 €
5	Mietgebäude 1 Nordwest	30	72	33,3	678	22577	38.880,00 €	4.024,80 €	42.904,80 €
6	Mietgebäude 2 Südwest	50	27	14,4	846	12182	14.580,00 €	1.509,30 €	16.089,30 €
6	Mietgebäude 2 Nordost	50	29	9,9	846	8375	15.660,00 €	1.621,10 €	17.281,10 €
7	Pferdestall 1 Nordwest	25	30	14,4	943	13579	16.200,00 €	1.677,00 €	17.877,00 €
7	Pferdestall 1 Südost	25	46	19,8	943	18671	24.840,00 €	2.571,40 €	27.411,40 €
8	Geräteschuppen Nord	16	44	19,8	1010	19998	23.760,00 €	2.459,60 €	26.219,60 €
8	Geräteschuppen Süd	16	44	19,8	1010	19998	23.760,00 €	2.459,60 €	26.219,60 €
9	Pferdestall 2 Ost	14	125	58,5	1021	59729	67.500,00 €	6.987,50 €	74.487,50 €
9	Pferdestall 2 West	14	125	58,5	1021	59729	67.500,00 €	6.987,50 €	74.487,50 €
Gesamt aller Dächer			1164	522,45		472851,45	628.560,00 €	65.067,60 €	693.627,60 €
Freifläche									
	Ost-West-Ausrichtung	90	995	538,49	659	354864,91	350.240,00 €	55.620,50 €	405.860,50 €
	Süd-Ausrichtung	0	440	238,13	659	156927,67	154.880,00 €	24.596,00 €	179.476,00 €
Gesamt Agri-Flächen			1435	776,62		511792,58	505.120,00 €	80.216,50 €	585.336,50 €
Gesamt Dächer und Agri				1299,07		984644,03			1.278.964,10 €

Gesamtkosten für die Varianten

Basierend auf den geplanten Installationen wurden die Gesamtkosten für die drei untersuchten Varianten berechnet:

Tabelle 14: Kostenübersicht aller untersuchten Varianten

Variante	PV-Kosten	Batteriespeicher Installation	Transformator Installation	Gesamtkosten
Variante 1	216.907,60 €	72.819,00 €	21.845,70 €	289.726,60 €
Variante 2	693.627,60 €	194.400,00 €	58.320,00 €	1.037.347,60 €
Variante 3	1.278.964,10 €	468.909,00 €	140.672,70 €	2.018.545,80 €

Amortisation

Tabelle 15: Amortisation Kosten

Variante		Eingesparte Stromkosten (€)	Einnahmen aus Netzeinspeisung (€)	Wirtschaftlicher Vorteil (€)
Variante 1		19.528,82 €	4.137,70 €	23.666,52 €
Variante 2		27.068,29 €	25.404,06 €	52.472,35 €
Variante 3	Dächer	30.374,27 €	24.409,61 €	94.400,53 €
	Agri-Fläche		39.616,65 €	

Die Einnahmen aus der Netzeinspeisung ergeben sich auf Grundlage der Vergütungssätze des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) (*Bundesnetzagentur - EEG-Förderung und -Förderersätze*, o. J.) und setzen sich wie folgt zusammen: Für Dachanlagen mit einer Leistung von weniger als 1.000 kWp beträgt die Vergütung zum Stand Februar 2025, 7,49 Cent pro Kilowattstunde. Für Agri-PV-Flächen mit einer installierten Leistung von bis zu 1.000 kWp liegt die Vergütung bei 9,00 Cent pro Kilowattstunde.

Die eingesparten Stromkosten basieren auf der Stromrechnung des Energieversorgers Scholt Energy vom Juli 2024. Gemäß dieser beträgt der Nettostrompreis 0,249 Euro pro Kilowattstunde, wie aus Tabelle 16 hervorgeht. Diese Kosteneinsparungen stellen einen wesentlichen Faktor für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der geplanten Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher dar.

Berechnung der Gesamtkosten pro kWh

Der errechnete kWh-Strompreis aus Tabelle 16 bezieht sich auf Scholt Energy (01.07 – 31.07.2024) Die Stromrechnung ist in der Anlage 3 angehängt.

Tabelle 16: Kostenermittlung Strompreis pro kWh

Kategorie	Wert	Gesamtkosten (€)
Peak-Verbrauch	5.708 kWh × 0,09945 €/kWh	567,65 €
Off-Peak-Verbrauch	5.297 kWh × 0,13414 €/kWh	710,54 €
Garantiert Grün	11.005 kWh * 0,00300 €/kWh	33,02 €
Netzentgelte	Verschiedene Aufschläge	1.370,00 €
Stromsteuer	11.005 kWh × 0,02050 €/kWh	225,60 €
Netto-Kosten		2.744,68 €
Brutto-Kosten	(inkl. 19% USt.)	3.265,68 €
Verbrauch	11.005 kWh	-
Kosten pro kWh (Netto)	2.744,68 € ÷ 11.005 kWh	0,249 €/kWh (24,9 Cent)
Kosten pro kWh (Brutto)	3.265,68 € ÷ 11.005 kWh	0,297 €/kWh (29,7 Cent)

Amortisationszeiten

Tabelle 17: Amortisation in Jahren

Variante	Investitionskosten (€)	Jährliche Einsparungen (€)	Amortisationszeit (Jahre)
Variante 1	289.726,60 €	23.666,52 €	12,24
Variante 2	1.037.347,60 €	52.472,35 €	19,77
Variante 3	2.018.545,80 €	94.400,53 €	21,38

Die Analyse in Tabelle 17 zeigt die Investitionskosten, jährlichen Einsparungen und Amortisationszeiten für die betrachteten Varianten zeigt, dass eine wirtschaftlich tragfähige Umsetzung einer Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher maßgeblich von der richtigen Dimensionierung abhängt.

Die erste Variante mit einer 150 kWp PV-Anlage und einem 150 kWh Batteriespeicher weist die niedrigsten Investitionskosten auf und erzielt eine gute jährliche Einsparung. Die Amortisationszeit verdeutlicht, dass diese Variante eine große Verbesserung der Eigenversorgung bietet und eine kurze Amortisationszeit von 12,24 Jahren. Die zweite Variante mit einer 500 kWp PV-Anlage und einem 400 kWh Batteriespeicher erreicht ein optimales Verhältnis zwischen Investitionskosten und Autarkie. Die Amortisationszeit liegt hier bei 19,77 Jahren.

Die dritte Variante mit einer 1.300 kWp PV-Anlage und einem 1.300 kWh Batteriespeicher bietet die höchste Eigenversorgung, erfordert jedoch eine erhebliche Kapitalinvestition. Trotz der hohen Einsparungen verlängert sich die Amortisationszeit aufgrund der hohen Anschaffungskosten, sodass diese Variante wirtschaftlich nur unter sehr langfristigen Betrachtungen vorteilhaft sein kann.

Zusammenfassend zeigt die Untersuchung, dass eine übermäßige Skalierung der PV- und Speichergröße nicht zwangsläufig wirtschaftliche Vorteile bringt. Die zweite Variante mit 500 kWp und 400 kWh stellt die beste Balance zwischen Autarkiegrad, Investitionskosten und Amortisationszeit dar. Sie bietet eine wirtschaftlich tragfähige Lösung, die sowohl eine hohe Eigenversorgung ermöglicht als auch eine akzeptable Kapitalrendite erzielt.

3.6.4 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die wirtschaftliche Bewertung zeigt, dass Variante 1 zwar eine schnelle Amortisation bietet, jedoch nur einen begrenzten Autarkiegrad erreicht. Variante 2 stellt einen optimalen Kompromiss zwischen Investitionskosten und langfristigen Einsparungen dar. Variante 3 ermöglicht eine nahezu vollständige Autarkie, erfordert jedoch sehr hohe Anfangsinvestitionen.

Besondere Bewertung des 3.877 kWh Speichers

Ein Batteriespeicher mit 3.877 kWh wäre wirtschaftlich nicht tragfähig, da die PV-Anlagen nicht genügend überschüssigen Strom erzeugen würden, um diesen Speicher effizient zu laden. Zudem steigen die Kosten mit der Speichergröße überproportional, wodurch eine sehr lange Amortisationszeit entstehen würde. Daher wird diese Speichergröße als unwirtschaftlich eingestuft, da die Kosten für solch einen Speicher 1.588.000 € betragen würden, was in Abbildung 49 ersichtlich ist, hinzu kommen die großen Abmaße einen solchen Speichers.

	
Batteriespeicher 1720 kWh VDE AR-N 4110 konformer...	Batteriespeicher 2150 kWh VDE AR-N 4110 konformer...
Weitere Informationen finden Sie auch auf unserer FAQ Seite: https://energiewende-faq.scu-group-...	Weitere Informationen finden Sie auch auf unserer FAQ Seite: https://energiewende-faq.scu-group-...
719.000,00 €* In den Warenkorb	869.000,00 €* In den Warenkorb

Abbildung 49: Batteriespeicher 3870 Variante
(Batteriespeicher, o. J.)

4 Schluss

Ausgangspunkt der Untersuchung war die Erfassung des Gesamtstromverbrauchs des Anwesens, der im Jahr 2023 bei etwa 126.067 kWh lag. Bereits vorhandene Photovoltaikanlagen produzierten im gleichen Zeitraum eine Energiemenge von circa 125.000 kWh (rechnerisch ermittelt). Im Rahmen der Untersuchung wurden zunächst die Verbrauchsstruktur und das Lastgangprofil detailliert analysiert. Auf dieser Grundlage erfolgte eine Potenzialanalyse für den weiteren Ausbau von PV-Anlagen, wobei geeignete Dach- und Freiflächen hinsichtlich ihrer Flächennutzung, Ausrichtung und Verschattung bewertet wurden. Gleichzeitig wurde eine optimale Speichergröße ausgelegt, um eine möglichst hohe Eigenversorgung zu gewährleisten. Für die Umsetzung der elektrischen Energieoptimierung wurden drei Varianten entwickelt und hinsichtlich ihres Autarkiepotenzials sowie ihrer wirtschaftlichen Rentabilität bewertet. Die erste Variante umfasst eine PV-Anlage mit einer Leistung von 150 kWp in Kombination mit einem 150 kWh Batteriespeicher. Diese Konfiguration ermöglicht einen Autarkiegrad von 62 Prozent und stellt eine kostengünstige Möglichkeit zur Erhöhung der Eigenverbrauchsquote dar. Aufgrund der begrenzten Speicherkapazität bleibt der Netzbezug insbesondere in den Wintermonaten jedoch weiterhin hoch. Die zweite Variante sieht die optimale Lösung einer PV-Anlage mit 500 kWp sowie einen Batteriespeicher mit einer Kapazität von 400 kWh vor. Diese Dimensionierung steigert den Autarkiegrad auf 86 Prozent und führt zu einer deutlichen Reduzierung des Netzbezugs. Gleichzeitig können überschüssige Strommengen gegen Entgelt ins Netz eingespeist werden. Aufgrund der besseren Skaleneffekte bietet diese Variante ein optimales Verhältnis zwischen Investitionskosten, Autarkie und Wirtschaftlichkeit. Die dritte untersuchte Variante beinhaltet eine maximale Ausbaustufe mit einer 1.300 kWp PV-Anlage und einem 1.300 kWh Batteriespeicher. Hierdurch wird ein Autarkiegrad von 97 Prozent erreicht. Die technische Machbarkeit ist gegeben, jedoch sind die Investitionskosten sowie Rechtliche und Ökologischen Aspekte für eine derart große Anlage erheblich. Eine weitergehende Untersuchung einer noch größeren Speicherlösung mit 3.877 kWh ergab, dass eine solch hohe Speicherkapazität nicht sinnvoll ist. Die geplante PV-Anlage würde nicht ausreichend überschüssigen Strom erzeugen, um diesen Speicher regelmäßig zu füllen. Zudem steigen die Investitionskosten überproportional, wodurch sich eine lange Amortisationszeit ergibt. Während einer Dunkelflaute wäre der Speicher schnell entleert, ohne eine realistische Möglichkeit zur Nachladung.

Die Untersuchung zeigt, dass eine vollständige energetische Autarkie technisch zwar umsetzbar ist, wirtschaftlich jedoch nicht sinnvoll erscheint. Stattdessen ist eine sorgfältige Abstimmung zwischen der Größe der PV-Anlage und der Speicherkapazität erforderlich, um

eine wirtschaftlich tragfähige Lösung zu finden. Die zweite Variante mit einer PV-Leistung von 500 kWp und einem 400 kWh Batteriespeicher stellt dabei die beste Balance zwischen Autarkiegrad, Investitionskosten und Amortisationszeit dar. Sie ermöglicht eine signifikante Reduzierung des Netzbezugs und gewährleistet eine wirtschaftlich tragfähige Eigenversorgung. Für die praktische Umsetzung der vorgeschlagenen Lösung wird empfohlen, die regulatorischen Rahmenbedingungen für die Netzeinspeisung weiter zu optimieren und potenzielle Fördermittel in die Investitionsplanung einzubeziehen. Darüber hinaus könnte die Integration eines intelligenten Lastmanagementsystems die Nutzung des erzeugten Solarstroms weiter optimieren und die Abhängigkeit vom Netz zusätzlich verringern. Langfristig zeigt die Arbeit, dass durch eine durchdachte Kombination von Photovoltaik und Batteriespeicher eine weitgehende Unabhängigkeit von externen Energiequellen möglich ist.

4.1 Ausblick auf die nächsten Schritte und mögliche Erweiterungen des Projekts

Neben der Optimierung der elektrischen Energieversorgung bietet das Anwesen Wittibsmühle weiteres Potenzial zur Untersuchung, um die Abhängigkeit von externen Energiequellen zu reduzieren. Ein zentraler Bereich, der in zukünftigen Untersuchungen vertieft werden sollte, ist die nachhaltige Bereitstellung von Wärmeenergie für die Wäscherei und das gesamte Anwesen. Die in dieser Arbeit durchgeführte Analyse zeigt, dass in Variante 2 mit einer 500 kWp PV-Anlage und einem 400 kWh Batteriespeicher jährlich 339.173 kWh elektrische Energie ins Netz eingespeist werden könnten. Diese überschüssige Energie bietet das Potenzial zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung und der Mobilität.

Durch den Einsatz einer Hochtemperatur-Wärmepumpe mit einem Leistungskoeffizienten von 3,5 könnte die überschüssige elektrische Energie effizient in 1,19 GWh Wärme umgewandelt werden:

$$Q_{\text{Wärme}} = 339.173 \times 3,5 = 1.187.105,5 \text{ kWh} = 1,19 \text{ GWh}$$

Diese Wärmemenge könnte die bestehende Wärmeerzeugung mit fossilen Energieträgern weitgehend ersetzen.

Die erzeugte Wärmemenge könnte dazu genutzt werden, Hackschnitzel oder Propan zu ersetzen. Bei einem Heizwert von Hackschnitzeln trocken von 950 kWh/Srm (*Hackschnitzel - der hochwertige Brennstoff*, o. J.) ergibt sich die folgende Ersetzung:

$$V_{\text{Hackschnitzel, Srm}} = \frac{339.173}{950} = 357 \text{ Srm}$$

Auch eine Substitution von Propan wäre möglich. Bei einem Heizwert von Propan von 6,57 kWh/L (*PROGAS GmbH & Co KG*, 2022.) könnte folgende Menge ersetzt werden:

$$V_{\text{Propan}} = \frac{339.173}{6,57} = 51.636 \text{ Liter}$$

Ein weiterer Anwendungsbereich für den Stromüberschuss ist die Förderung der Elektromobilität. Geht man von einem Verbrauch von ca. 25 kWh pro 100 km aus, könnten mit dem überschüssigen Strom 1,36 Millionen Kilometer elektrisch zurückgelegt werden:

$$S_{\text{elektrisch}} = \frac{339.173}{0,25} = 1.356.692 \text{ km}$$

Darüber hinaus könnte dieser Stromüberschuss genutzt werden, um die Aktuelle MAN LKW-Flotte gegen wie von Amazon benutzte Rivian Busse mit einer Akku-Kapazität von 100 kWh aufzuladen und diese Fahrzeuge zu elektrifizieren. Die Anzahl der möglichen Ladungen beträgt pro Bus:

$$\text{Anzahl Ladungen} = \frac{339.173}{100} = 3.392$$

Da ein voll aufgeladener Amazon Bus 200 km Reichweite hat (Leicht, 2023), ergibt sich eine gesamte Fahrstrecke von 678.400km:

$$\text{Fahrstrecke} = 3.392 \times 200 = 678.400 \text{ km}$$

Würde täglich ein Rivian Bus betrieben werden, könnte der überschüssige Strom für 3.392 Tage reichen, also über neun Jahre.

Würde stattdessen ein E-Auto betrieben werden, das täglich 100 km fährt, ergäbe sich eine mögliche Betriebsdauer von 13.567 Tagen:

$$\text{Anzahl Fahrtage} = \frac{1.356.692}{100} = 13.567 \text{ Tage}$$

Das entspricht einer täglichen Nutzung über 37 Jahre.

Die Ergebnisse dieser Arbeit liefern eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die weitere Entwicklung des Anwesens zu einem vollständig energieautarken Betrieb.

Die Betrachtung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität könnte das Anwesen in Zukunft nicht nur größtenteils energieautark machen, sondern auch als Modellbetrieb für nachhaltige Energielösungen in vergleichbaren Unternehmen dienen.

Literaturverzeichnis

- § 12 BauGB - Einzelnorm. (o. J.). Abgerufen 15. Februar 2025, von https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/___12.html
- § 35 BauGB - Einzelnorm. (o. J.). Abgerufen 19. Februar 2025, von https://www.gesetze-im-internet.de/bbaug/___35.html
- § 67 BNatSchG - Einzelnorm. (o. J.). Abgerufen 15. Februar 2025, von https://www.gesetze-im-internet.de/bnatschg_2009/___67.html
- Altmeier, E., & te Heesen, H. (2024). Photovoltaikanlage mit Batteriespeicher (Version vom 13. November 2024) [Computerprogramm]. Hochschule Trier. <https://www.umwelt-campus.de/energiertools>
- Batteriespeicher. (o. J.). LadeEngel. Abgerufen 19. Februar 2025, von <https://ladeengel.de/Batteriespeicher/>
- BayBO: Art. 44a Solaranlagen—Bürgerservice. (o. J.). Abgerufen 16. Februar 2025, von <https://www.gesetze-bayern.de/Content/Document/BayBO-44a>
- Beideck, A. (2023, Februar 20). Forschung—News Archiv—Dunkelflauten in Deutschland (KIT) [Text]. Alexandra Beideck. <https://www.imk-tro.kit.edu/12085.php>
- Bellingrath-Kimura, Prof. Dr. S., Haaren, Prof. Dr. C. von, Rück, Prof. Dr. F., Zeitz, Prof. Dr. i. R. J., & Broll, Prof. Dr. G. (2023). Freiflächen-Photovoltaik – ja, aber nicht ohne Bodenschutz! www.umweltbundesamt.de/publikationen
- Bewertung von Aufstellorten stationärer Batterieheimspeicher. (o. J.). Abgerufen 16. Februar 2025, von <https://www.vde.com/resource/blob/2198708/4bcc4dd0e2f4ca84694db8c5ea2eb15b/onepager-emilas-data.pdf>
- Bundesnetzagentur—EEG-Förderung und -Fördersätze. (o. J.). Abgerufen 16. Februar 2025, von https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEG_Foerderung/start.html
- Empfehlungen zur Speicherauslegung im Gewerbe. (o. J.). HTW Berlin. Abgerufen 4. Februar 2025, von <https://solar.htw-berlin.de/publikationen/empfehlungen-speicherauslegung-im-gewerbe/>

- energie-experten. (2022, September 14). Moderner Solarzaun: Die ertragsstarke Lösung für Grundstücke. energie-experten. <https://www.energie-experten.org/news/moderner-solarzaun-die-ertragsstarke-loesung-fuer-grundstuecke>
- Hochwarth, D. (2024, September 3). Wie sinnvoll ist ein Solarzaun? Alles, was Sie wissen müssen. ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/wie-sinnvoll-ist-ein-solarzaun-alles-was-sie-wissen-muessen/>
- Kaltschmitt, M., Streicher, W., & Wiese, A. (Hrsg.). (2020). Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte (6., vollständig neu überarbeitete Auflage). Springer Vieweg.
- Landschaftsschutzgebiete in Bayern | Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz. (o. J.). Abgerufen 4. Februar 2025, von <https://www.stmuv.bayern.de/themen/naturschutz/schutzgebiete/landschaftsschutzgebiete/index.htm>
- Leicht, T. H., Marcel Sommer, Uli Baumann, uba, Luca. (2023, Juli 4). Rivian EDV-500 Electric Delivery Van: Wir sind den Amazon-Liefervan gefahren. auto motor und sport. <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektroauto/elektro-lieferwagen-amazon-rivian-transporter/>
- Lettenmeier, F., Schlaak, E. G., Albert, Schindele, S., Trommsdorff, T. K., Andreas Steinhüser, Max, Lindenmeyer, C., SOLAR, — HILBER, Mair, Ing. G., GbR, — Lachhammer Windkraft, Lachhammer, A., Magdalenahof, —, Hilber, F., gmbh, — schlaich bergermann partner – sbp sonne, Weinrebe, Dipl.-Ing. (FH) M. B., Matthis Bohn, Prof. Dr. Mike Schlaich, Dr. Gerhard, (TFZ), — Technologie- und Förderzentrum, Sc., D. F. E., M. Sc. ., Gawan Heintze, M., AG, — TubeSolar, Mayer, T. H., Joachim Mack, Johann, GmbH, — VDE Renewables, Lenck, J. B., Norbert, ... Wagner, Dipl.-Ing. (FH) J. (2024). DIN SPEC 91434: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung.
- Lithium-Ionen Großspeicher: BVES-Leitfaden schafft Klarheit. (2022, Januar 4). Ihr Partner für Chemicals Compliance Consulting – UMCO. <https://www.umco.de/blog/umweltschutz/Lithium-Ionen-Grossspeicher-BVES-Leitfaden.html>

- Lücke, N. (2021, Juli 7). Rekord! Wirkungsgrad von fast 69 Prozent für Dünnschicht-Photovoltaik. ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/rekord-wirkungsgrad-von-fast-69-prozent-fuer-duennschicht-photovoltaik/>
- Malte Stöppler, Michael Grieb, Daniel Eisel, Gawan Heintze, & Dr. Maendy Fritz. (2024, Oktober). TFZ Agri-Photovoltaik Leitfaden. https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/rohstoffpflanzen/dateien/231005_p_tfz_leitfaden_agri-pv.pdf
- Mertens, K. (2022). Photovoltaik: Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis (6., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser.
- NELEV - Verordnung zum Nachweis von elektrotechnischen Eigenschaften von Energieanlagen 1. (o. J.). Abgerufen 16. Februar 2025, von <https://www.gesetze-im-internet.de/nelev/BJNR165100017.html>
- Next2Sun.pdf. (o. J.). Abgerufen 16. Februar 2025, von https://www.netzentwicklungsplan.de/system/files/statements/2037_2023/anon/Next2Sun.pdf
- Photovoltaik in Deutschland. (2025). Statista. <https://bibaccess.fh-landshut.de:2127/statistik/studie/id/6548/dokument/photovoltaik-in-deutschland/>
- PROGAS GmbH & Co KG. (o. J.). Abgerufen 26. Februar 2025, von <https://progas.de/>
- Solarzaun von Next2Sun: Nachhaltige Stromgewinnung & Sichtschutz. (o. J.). Next2Sun. Abgerufen 16. Februar 2025, von <https://next2sun.com/solarzaun/>
- Stromproduktion | Energy-Charts. (o. J.). Abgerufen 4. Februar 2025, von <https://www.energy-charts.info/charts/power/chart.htm?!=de&c=DE&year=2023&interval=week&week=28&legendItems=2wfw4>
- Sunny Design. (2025). [Software]. SUNNY DESIGN. (o. D.-b). <https://www.sunnydesign-web.com/sdweb/#/Home>
- Trina Solar Vertex S+ 440 Wp bifaziales Glas-Glas Solarmodul TSM-NEG9RC.27. (o. J.). Selfio. Abgerufen 21. Februar 2025, von <https://www.selfio.de/photovoltaik/pv-module/trina-solar-vertex-s-440-wp-bifaziales-glas-glas-solarmodul-tsm-neg9rc-27>

- Trina Vertex S+ 450W Glas-Glas Black Frame TSM-NEG9R.28. (o. J.). Solarhandel24. Abgerufen 21. Februar 2025, von <https://solarhandel24.de/products/trina-vertex-s-450w-glas-glas-black-frame-tsm-neg9r-28-staffelpreis>
- Trommsdorff, Dr. M., Gruber, S., Keinath, T., Michaela Hopf, Hermann, C., Schönberger, F., Gudat, C., Boggio, A. T., Gajewski, M., Högy, apl. Prof. Dr. P., Zikeli, Dr. S., Ehmman, A., Weselek, Dr. A., Bodmer, Prof. Dr. U., Rösch, Dr. C., Ketzer, Dr. D., Weinberger, N., Schindele, Dr. S., Vollprecht, R. Dipl.-Forstw. (Univ.) J., & PartGmbB), (Becher Büttner Held. (2024). Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. www.ise.fraunhofer.de
- Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Leistungen—Global-, Diffus- und Direktstrahlung (Monats- und Jahressummen sowie Abweichungen). (o. J.). Abgerufen 4. Februar 2025, von https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/strahlungskarten_sum.html?nn=16102
- Wittibsmühle – Google Earth. (o. J.). Abgerufen 20. Februar 2025, von <https://earth.google.com/web/@48.48474233,11.92493411,412.06853656a,1080.76454803d,30y,0h,0t,0r/data=CgRCAggB-MikKJwolCiExM3g5U2tLNERINDlZZXJoMjdWRFRRVGpKZWdUc3BHWGcgA-ToDCgEwQgIIAEoICJm0suoEEAE>
- Zoll, M., Weniger, J., Sepúlveda, G. B., & Quaschnig, V. (2023). Empfehlungen zur Speicherauslegung im Gewerbe [Forschungsgruppe Solarspeichersysteme]. <https://solar.htw-berlin.de/publikationen/empfehlungen-speicherauslegung-im-gewerbe/>

Anlage 4: Datenblatt Trina Vertex S+ 440W Bifaziales Doppelglas

Vertex S+

BIFAZIALES DOPPELGLAS N-Typ i-TOPCon MODUL

PRODUKT: TSM-NEG9RC.27

LEISTUNGSBEREICH: 415-445 W

445 W

MAXIMALE NENNLEISTUNG

0/+5 W

POSITIVE LEISTUNGSTOLERANZ

22,3%

MAXIMALER WIRKUNGSGRAD



Kleine Maße, große Leistung

- Bis zu 445 W Spitzenleistung, 22,3 % Modulwirkungsgrad mit High-Density-Zellverbindungstechnologie
- Besseres Temperaturverhalten bei hohen Umgebungstemperaturen für mehr Leistung



Transparentes Doppelglas Konzept

- Entwickelt mit Fokus auf Ästhetik
- Ausgezeichnete Beständigkeit gegen Feuer und bei schwierigen Umweltbedingungen
- 5.400 Pa Scheelast und 4.000 Pa Windlast (Testlasten)



Maximaler Ertrag

- Bifazialitätsfaktor bis 85 %
- 25 Jahre Produktgarantie auf die Verarbeitung und 30 Jahre Leistungsgarantie
- N-typ Technologie mit 1 % Degradation im ersten Jahr und 0,4 % in den Jahren 2-30



Universelle Lösung für Wohn- und Gewerbedächer

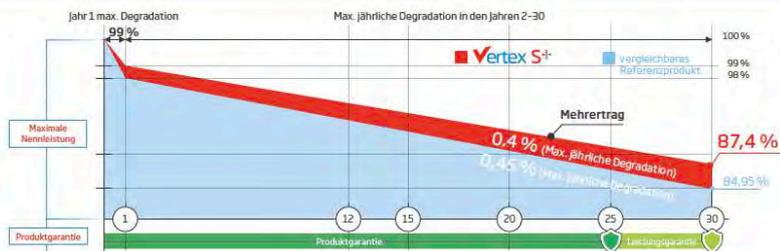
- Hohe Kompatibilität mit verfügbaren Wechselrichtern, Optimierern und Montagesystemen
- Leichte Handhabung durch perfekte Größe und geringes Gewicht

Erweiterte Garantie für Vertex S+

1 %
Max. Degradation in Jahr 1

0,4 %
Max. jährliche Degradation in den Jahren 2-30

25 Jahre
Produktgarantie



Umfassende Produkt- und Systemzertifikate



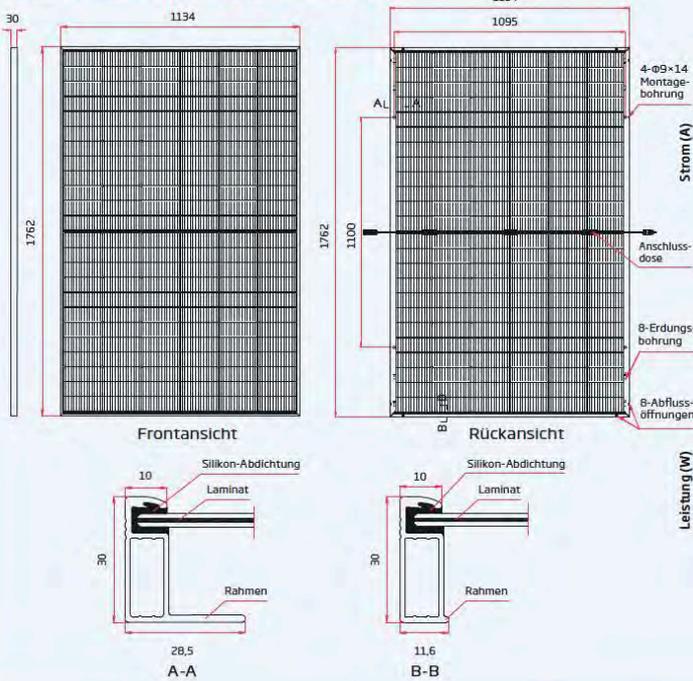
IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716/UL61730
 ISO 9001: Qualitätsmanagementsystem
 ISO 14001: Umweltmanagementsystem
 ISO14064: Verifizierung der CO₂-Bilanz
 ISO45001: Arbeitsschutzmanagementsystem



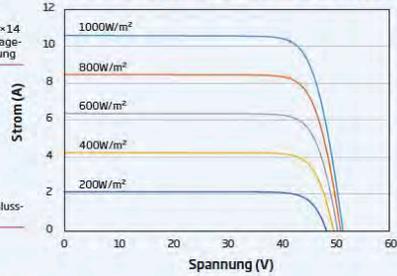


BIFAZIALES DOPPELGLAS N-Typ i-TOPCon MODUL

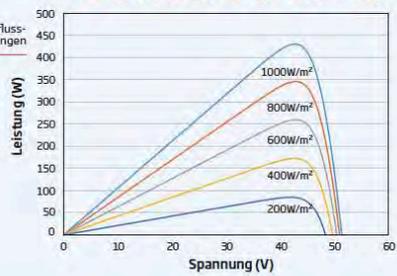
ABMESSUNGEN DES PV-MODULS (Einheit: mm)



I-V KURVEN DES PV-MODULS (430 W)



P-V KURVEN DES PV-MODULS (430 W)



MECHANISCHE DATEN

Solarzellen	Monokristallin
Zellanordnung	144 Zellen
Modulmaße	1762×1134×30 mm
Gewicht	21,0 kg
Glas	1,6 mm, hochtransparentes, anti-reflexbeschichtetes hitzevergespanntes Glas
Verkapselungsmaterial	POE/EVA
Rückseite	1,6 mm, Hitzevergespanntes Glas

Rahmen	30 mm eloxierte Aluminiumlegierung, Schwarz
Anschlussdose	IP 68
Kabel	Photovoltaikkabel: 4,0 mm ² Hochformat: 1100/1100 mm Querformat: 280/350 mm*
Stecker	TS4 / MC4 EV02*

*Nur auf Bestellung.

ELEKTRISCHE DATEN (STC & NOCT)

Testbedingungen	TSM-415 NEG9RC-27		TSM-420 NEG9RC-27		TSM-425 NEG9RC-27		TSM-430 NEG9RC-27		TSM-435 NEG9RC-27		TSM-440 NEG9RC-27		TSM-445 NEG9RC-27	
	STC	NOCT												
Nominalleistung-P _{max} (Wp)*	415	317	420	321	425	325	430	328	435	332	440	336	445	338
Leistungstoleranz-P _{MAX} (W)	0 ~ +5													
Spannung im MPP-U _{MPP} (V)	42,1	39,3	42,5	39,7	42,9	40,0	43,2	40,4	43,6	40,7	44,0	41,0	44,3	41,3
Strom im MPP-I _{MPP} (A)	9,86	8,03	9,89	8,07	9,92	8,09	9,96	8,11	9,99	8,15	10,01	8,17	10,05	8,20
Leerlaufspannung-U _{oc} (V)	50,1	47,6	50,5	47,9	50,9	48,3	51,4	48,8	51,8	49,2	52,2	49,5	52,6	49,9
Kurzschlussstrom-I _{sc} (A)	10,50	8,46	10,53	8,49	10,56	8,51	10,59	8,53	10,64	8,57	10,67	8,60	10,71	8,63
Modulwirkungsgrad η _m (%)	20,8		21,0		21,3		21,5		21,8		22,0		22,3	

STC: Einstrahlung 1000W/m², Zelltemperatur 25 °C, Spektrale Verteilung von AM 1,5. NOCT: Einstrahlung 800 W/m², Umgebungstemperatur 20°C, Windgeschwindigkeit 1 m/s. *Messtoleranz: ±3 %.

ELEKTRISCHE EIGENSCHAFTEN VERSCHIEDENER LEISTUNGSKLASSEN (bezogen auf 5 % & 10 % Zusatzleistung durch die aktive Rückseite)

Zusatzleistung durch aktive Rückseite	5 %		10 %		5 %		10 %		5 %		10 %		5 %		10 %	
	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %	5 %	10 %
Resultierende Gesamtleistung-P _{max} (Wp)	436	457	441	462	446	468	452	473	457	479	462	484	467	490		
Spannung im MPP-U _{MPP} (V)	42,1	42,1	42,5	42,5	42,9	42,9	43,2	43,2	43,6	43,6	44,0	44,0	44,3	44,3		
Strom im MPP-I _{MPP} (A)	10,35	10,85	10,38	10,88	10,42	10,91	10,46	10,96	10,49	10,99	10,51	11,01	10,55	11,06		
Leerlaufspannung-U _{oc} (V)	50,1	50,1	50,5	50,5	50,9	50,9	51,4	51,4	51,8	51,8	52,2	52,2	52,6	52,6		
Kurzschlussstrom-I _{sc} (A)	11,03	11,55	11,06	11,58	11,09	11,62	11,12	11,65	11,17	11,70	11,20	11,74	11,25	11,78		

Bifazialitätsfaktor (Leistung): 80 ± 5 %.

TEMPERATURWERTE

NOCT (Nennbetriebstemperatur der Zelle)	43 °C (±2 °C)
Temperaturkoeffizient von P _{max}	-0,29 %/ °C
Temperaturkoeffizient von V _{oc}	-0,24 %/ °C
Temperaturkoeffizient von I _{sc}	0,04 %/ °C

EINSATZBEREICH

Betriebstemperatur	-40 bis +85 °C
Maximale Systemspannung	1500 V DC (IEC)
Maximale Absicherung	25 A

GARANTIE

25 Jahre Produktgarantie auf die Verarbeitung
30 Jahre Leistungsgarantie
1 % max. Degradation im ersten Jahr
0,4 % max. jährliche Degradation

(Nähere Details finden Sie in den Bedingungen der beschränkten Garantie)

VERPACKUNGSEINHEITEN

Module pro Karton:	36 Stck.
Module pro 40-Fuß-Container:	936 Stck.



ACHTUNG: SICHERHEITS- UND INSTALLATIONSANWEISUNGEN VOR DER VERWENDUNG DES PRODUKTS LESEN.
© 2023 Trina Solar Limited. Alle Rechte vorbehalten. Die Angaben in diesem Datenblatt können jederzeit geändert werden.
Versionsnummer: TSM_DE_2023_D www.trinasolar.com

Anlage 5: Datenblatt Trina Vertex S+ 450W Doppelglas

Vertex S+

DOPPELGLAS N-Typ i-TOPCon MODUL

PRODUKT: TSM-NEG9R.Z8

LEISTUNGSBEREICH: 425-450 W

450 W

MAXIMALE NENNLEISTUNG

0/+5 W

POSITIVE LEISTUNGSTOLERANZ

22,5 %

MAXIMALER WIRKUNGSGRAD



Kleine Maße, große Leistung

- Bis zu 450 W Spitzenleistung, 22,5 % Modulwirkungsgrad mit High-Density-Zellverbindungstechnologie
- Multi-Busbar-Technologie für mehr Absorption, geringeren Serienwiderstand, verbesserte Stromableitung und erhöhte Zuverlässigkeit
- Geringere Montagekosten bei erhöhter Leistung und Effizienz



Doppelglas für max. Zuverlässigkeit

- Ausgezeichnete Beständigkeit gegen Feuer und bei schwierigen Umweltbedingungen
- 5.400 Pa Scheelast und 4.000 Pa Windlast (Testlasten)



Maximaler Ertrag

- 25 Jahre Produktgarantie auf die Verarbeitung und 30 Jahre Leistungsgarantie
- N-typ Technologie mit 1 % Degradation im ersten Jahr und 0,4 % in den Jahren 2-30

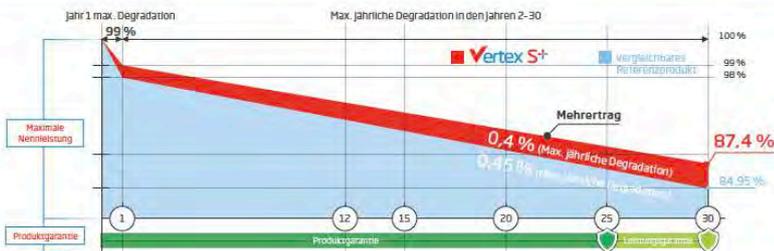


Universelle Lösung für Wohn- und Gewerbedächer

- Hohe Kompatibilität mit verfügbaren Wechselrichtern, Optimierern und Montagesystemen
- Leichte Handhabung durch perfekte Größe und geringes Gewicht. Optimierte Transportkosten
- Flexible Installationslösungen für den Systemeinsatz

Erweiterte Garantie für Vertex S+

- 1 %**
Max. Degradation in Jahr 1
- 0,4 %**
Max. Jährliche Degradation in den Jahren 2-30
- 25 Jahre**
Produktgarantie



Umfassende Produkt- und Systemzertifikate

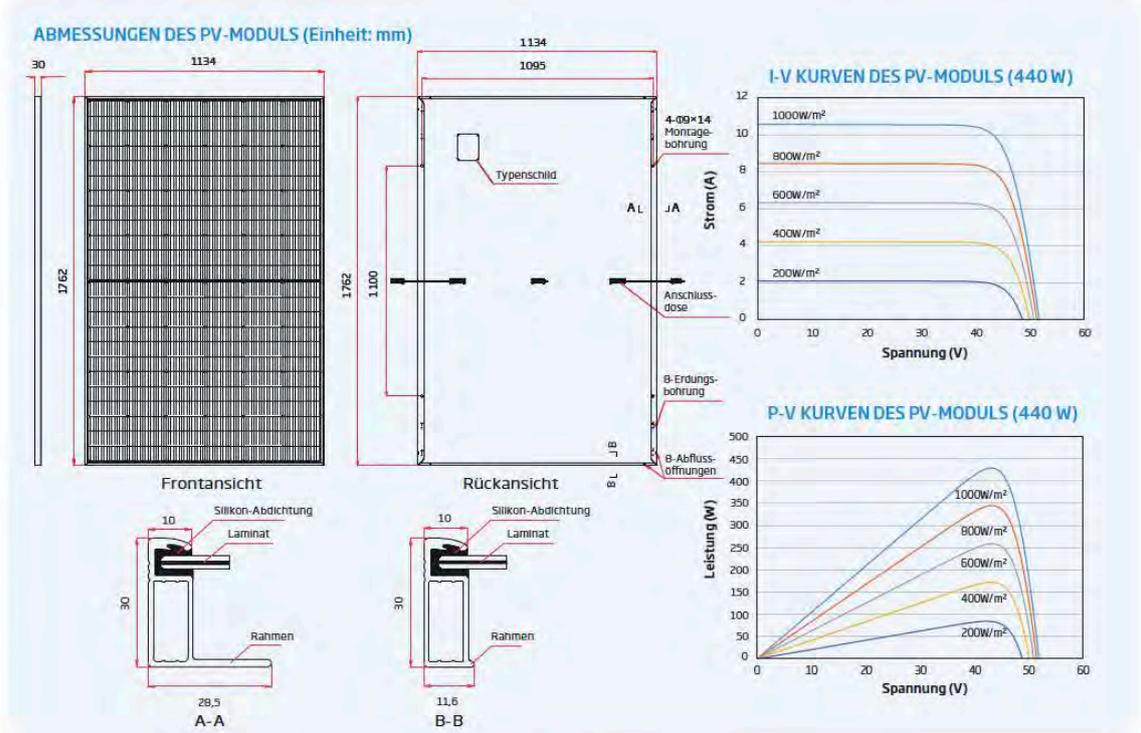


IEC61215/IEC61730/IEC61701/IEC62716
 ISO 9001: Qualitätsmanagementsystem
 ISO 14001: Umweltmanagementsystem
 ISO14064: Verifizierung der CO₂-Bilanz
 ISO45001: Arbeitsschutzmanagementsystem





DOPPELGLAS N-Typ i-TOPCon MODUL



ELEKTRISCHE DATEN (STC)	TSM-425 NEG9R.2B	TSM-430 NEG9R.2B	TSM-435 NEG9R.2B	TSM-440 NEG9R.2B	TSM-445 NEG9R.2B	TSM-450 NEG9R.2B
Nominalleistung-P _{max} (Wp)*	425	430	435	440	445	450
Leistungstoleranz-P _{max} (W)	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5	0/+5
Spannung im MPP-U _{MPP} (V)	42,9	43,2	43,6	44,0	44,3	44,6
Strom im MPP-I _{MPP} (A)	9,92	9,96	9,99	10,01	10,05	10,09
Leerlaufspannung-U _{oc} (V)	50,9	51,4	51,8	52,2	52,6	52,9
Kurzschlussstrom-I _{sc} (A)	10,56	10,59	10,64	10,67	10,71	10,74
Modulwirkungsgrad η _m (%)	21,3	21,5	21,8	22,0	22,3	22,5

STC: Einstrahlung 1000 W/m², Zelltemperatur 25 °C, Spektrale Verteilung von AM 1,5. *Nesttoleranz: ±3 %

MECHANISCHE DATEN	
Solarzellen	Monokristallin
Zellanordnung	144 Zellen
Modulmaße	1762 × 1134 × 30 mm
Gewicht	21,0 kg
Glas	1,6 mm, hochtransparentes, anti-reflexbeschichtetes hitzever gespanntes Glas
Verkapselungsmaterial	POE/EVA
Rückseite	1,6 mm, Hitzever gespanntes Glas
Rahmen	30 mm eloxierte Aluminiumlegierung, Schwarz
Anschlussdose	IP 68
Kabel	Photovoltaikkabel: 4,0 mm ² Hochformat: 1100/1100 mm Querformat: 280/350 mm*
Stecker	TS4 / MC4 EVO2*

*Nur auf Bestellung.

ELECTRICAL DATA (NOCT)	TSM-425 NEG9R.2B	TSM-430 NEG9R.2B	TSM-435 NEG9R.2B	TSM-440 NEG9R.2B	TSM-445 NEG9R.2B	TSM-450 NEG9R.2B
Nominalleistung-P _{max} (Wp)	325	328	332	336	339	343
Spannung im MPP-U _{MPP} (V)	40,1	40,5	40,8	41,1	41,4	41,7
Strom im MPP-I _{MPP} (A)	8,09	8,11	8,15	8,17	8,20	8,24
Leerlaufspannung-U _{oc} (V)	48,3	48,8	49,2	49,5	49,9	50,2
Kurzschlussstrom-I _{sc} (A)	8,51	8,53	8,57	8,60	8,63	8,65

NOCT: Einstrahlung 800 W/m², Umgebungstemperatur 20°C, Windgeschwindigkeit 1 m/s.

TEMPERATURWERTE		EINSATZBEREICH	
NOCT (Nennbetriebsstemperatur der Zelle)	43°C (±2°C)	Betriebstemperatur	-40 to +85 °C
Temperaturkoeffizient von P _{max}	-0,29%/°C	Maximale Systemspannung	1500 V DC (IEC)
Temperaturkoeffizient von V _{oc}	-0,24%/°C	Maximale Absicherung	25 A
Temperaturkoeffizient von I _{sc}	0,04%/°C		

GARANTIE	VERPACKUNGSEINHEITEN
25 Jahre Produktgarantie auf die Verarbeitung	Module pro Karton: 36 Stck.
30 Jahre Leistungsgarantie	Module pro 40-Fuß-Container: 936 Stck.
1 % max. Degradation im ersten Jahr	
0,4 % max. jährliche Degradation	

(Nähere Details finden Sie in den Bedingungen der beschränkten Garantie)



ACHTUNG: SICHERHEITS- UND INSTALLATIONSANWEISUNGEN VOR DER VERWENDUNG DES PRODUKTS LESEN.
 © 2023 Trina Solar Limited. Alle Rechte vorbehalten. Die Angaben in diesem Datenblatt können jederzeit geändert werden.
 Versionsnummer: TSM_DE_2023_D www.trinasolar.com