
DIPLOMARBEIT

Herr Ing.

Matthias Lafer

**Planung einer Photovoltaikanlage
für ein 3-Generationen-Wohnhaus
mit Eigenverbrauchsoptimierung
durch einen Speicher und der An-
bindung an die KNX-Gebäudeau-
tomatisierung**

Mittweida, 2024

DIPLOMARBEIT

Planung einer Photovoltaikanlage für ein 3-Generationen-Wohnhaus mit Eigenverbrauchsoptimierung durch einen Speicher und der Anbindung an die KNX-Gebäudeautomatisierung

Autor:
Herr Ing. Matthias Lafer

Studiengang:
Elektrotechnik

Seminargruppe:
KE19wWA

Erstprüfer:
Herr Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig

Zweitprüfer:
Felix Richter, M.Sc.

Einreichung:
Mittweida, 01.02.2024

Verteidigung/Bewertung:
Mittweida, 2024

Bibliografische Beschreibung:

Lafer, Matthias:

Planung einer Photovoltaik-Anlage für ein 3-Generationen-Wohnhaus mit Eigenverbrauchsoptimierung durch einen Speicher und der Anbindung an die KNX-Gebäudeautomatisierung. – 2024. – 93 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida – University of Applied Sciences, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2024.

Referat:

Die vorliegende Abschlussarbeit befasst sich mit der Planung einer Photovoltaik-Anlage für ein Wohnhaus, das von drei Generationen bewohnt wird. Es soll dabei ein Fokus auf die Eigenverbrauchsoptimierung gelegt werden und zu diesem Zwecke soll ein Speicher, der an die bestehende KNX-Gebäudeautomatisierung angebunden wird, mitgeplant werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an all jene aussprechen, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ralf Hartig, der bereits während des Studiums durch seine interessant gestalteten Vorlesungen inspirierte und als Betreuer dieser Arbeit mit fachkundigem Rat zur Seite stand.

Ebenso möchte ich meiner Frau für ihre organisatorische Unterstützung und stetige Hilfsbereitschaft danken. Trotz der umfangreichen Zeit, die dieses Studium in Anspruch nahm, hat sie stets Verständnis gezeigt. Einen weiteren Dank richte ich an meine Tochter, die durch ihre Unterstützung beim Korrekturlesen der zahlreichen Belegarbeiten und dieser Diplomarbeit einen wesentlichen Beitrag geleistet hat.

Abschließend gebührt mein Dank auch meinen Verwandten, Bekannten und meinem sozialen Umfeld, die mich während des Studiums mit wertvollen Ratschlägen und tatkräftiger Unterstützung begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Hintergrund der Arbeit.....	1
1.2	Relevanz und Aktualität der Photovoltaik und Gebäudeautomation.....	2
1.3	Zielsetzung und Forschungsfragen.....	2
1.4	Struktur dieser Ausarbeitung.....	3
2	Grundlagen.....	5
2.1	Verständnis von Photovoltaikanlagen.....	5
2.1.1	Geschichte und Entwicklung der Photovoltaik.....	5
2.1.2	Funktion und Wirkungsweise von photovoltaischen Zellen.....	8
2.1.3	Verschiedene Arten von Photovoltaikzellen und deren Anwendung.....	11
2.2	Eigenverbrauch und Speichertechnologien.....	13
2.2.1	Konzept und Vorteile des Eigenverbrauchs.....	13
2.3	Funktion und Arten von Energiespeichern.....	14
2.3.1	Trends und Innovationen in der Energiespeicherung.....	19
2.4	KNX-Gebäudeautomatisierung.....	20
2.4.1	Definition und Prinzipien der KNX-Technologie.....	20
2.4.2	Anwendungsbereiche und Vorteile der KNX-Technologie.....	21
2.4.3	Aufbau und Komponenten eines KNX-Systems.....	21
3	Bedarfsermittlung und Standortanalyse.....	23
3.1	Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs.....	23
3.1.1	Berechnung des elektrischen Energiebedarfs des 3-Generationen-Wohnhauses..	23
3.1.2	Analyse des Verbrauchsprofils und der Lastspitzen.....	26
3.1.3	Zukünftige Energiebedarfsprognosen.....	29
3.2	Standortbedingungen und ihre Auswirkungen.....	32
3.2.1	Einfluss der geographischen Lage und Dachausrichtung.....	32
3.2.2	Bewertung der klimatischen Umgebungsbedingungen.....	36
3.2.3	Schattenanalyse und deren Auswirkungen.....	38
4	Planung der Photovoltaikanlage und des Speichersystems.....	39
4.1	Planungssoftware und erste Anlagendaten.....	39
4.1.1	Auswahl und Dimensionierung der PV-Module.....	39
4.1.2	Auswahl und Dimensionierung des Energiespeichers.....	40
4.1.3	Auswahl des Wechselrichters und sonstiger Komponenten.....	41
4.1.4	Kriterien und Überlegungen bei der Komponentenauswahl.....	42
4.2	Installation und Inbetriebnahme der Anlage.....	46
4.2.1	Installationsprozess der Photovoltaikanlage und des Speichers.....	47
4.2.2	Tests und Sicherheitschecks nach der Installation.....	49
4.2.3	Wartung und regelmäßige Überprüfung der Anlage.....	50
5	Integration der Photovoltaikanlage und des Speichers in die KNX-Gebäudeautomatisierung	51
5.1	Grundlagen der Integration in KNX-Systeme.....	51
5.2	Übersicht über die Möglichkeiten der Integration.....	51

5.2.1	Voraussetzungen und technische Aspekte der Integration	52
5.2.2	Planung und Ausführung der Integration	52
5.3	Konfiguration und Programmierung des KNX-Systems	53
5.3.1	Anpassung des KNX-Systems an die Photovoltaikanlage und den Speicher.....	53
5.3.2	Programmierung von Automatisierungsregeln und -szenarien	54
5.3.3	Kontinuierliche Optimierung und Anpassung des Systems.....	56
6	Optimierung des Eigenverbrauchs durch KNX-Gebäudeautomation.....	57
6.1	Energieverbrauchsprofile und Lastmanagement.....	57
6.1.1	Erstellung und Analyse von Verbrauchsprofilen.....	57
6.1.2	Strategien und Techniken für das Lastmanagement.....	58
6.1.3	Automatisiertes Load-Shifting und deren Auswirkungen.....	58
6.2	Optimierung des Eigenverbrauchs durch Automation.....	59
6.2.1	Rolle der Gebäudeautomation bei der Optimierung des Eigenverbrauchs	59
6.2.2	Konkrete Maßnahmen zur Automatisierung des Eigenverbrauchs	59
6.3	Messung und Monitoring des optimierten Eigenverbrauchs	60
6.3.1	Methoden zur Messung des Eigenverbrauchs und der Effizienz	60
6.3.2	Einrichtung eines Monitoring-Systems und Interpretation der Daten	61
6.3.3	Datengesteuerte Optimierung und Predictive Maintenance.....	62
7	Wirtschaftlichkeit und Rentabilität.....	65
7.1	Kostenanalyse und Amortisation	65
7.1.1	Übersicht über die Gesamtkosten der Anlage.....	65
7.1.2	Berechnung der Amortisationszeit und des ROI	65
7.2	Auswirkungen der Eigenverbrauchsoptimierung auf die Wirtschaftlichkeit	67
7.2.1	Energie- und Kosteneinsparungen durch erhöhten Eigenverbrauch	67
7.2.2	Langfristige finanzielle Vorteile der Gebäudeautomation.....	68
8	Gesetzliche und regulatorische Aspekte	69
8.1	Gesetze und Verordnungen für Photovoltaikanlagen und Speicher	69
8.1.1	Überblick über relevante Gesetze und Verordnungen	69
8.1.2	Auswirkungen auf die Planung und die Installation der Photovoltaikanlage	69
8.1.3	Änderungen und Trends in der regulatorischen Landschaft	71
8.2	Genehmigungen und Zertifizierungen	71
8.2.1	Notwendige Genehmigungen und deren Einholung.....	71
8.2.2	Umgang mit rechtlichen und bürokratischen Herausforderungen	72
9	Fazit und Ausblick.....	73
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	73
9.2	Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Forschungsfragen.....	73

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Artikelausschnitt von der Titelseite der New York Times vom 26.04.1954.....	6
Abbildung 2: Weltweit installierte Photovoltaikleistung	7
Abbildung 3: Kristallstruktur Silizium Eigenleitung	8
Abbildung 4: Störstellenleitung bei n- und p-dotiertem Silizium.....	9
Abbildung 5: Ausbildung Raumladungszone	9
Abbildung 6: Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle	10
Abbildung 7: Vergleich der Aufbauten von Glas-Glas PV-Module (b) und PV-Modulen mit Rückseitenfolie (a).....	10
Abbildung 8: Reduktion von SiO ₂ mit Kohlenstoff zu Rohsilizium im Lichtbogenofen	11
Abbildung 9: Unterschiedliche Erscheinungsformen von Mono- und Polykristallinen Solarzellen ..	12
Abbildung 10: Dünnschichtmodul.....	13
Abbildung 11: Unterschiede Peak-Shaving und Load-Shifting	14
Abbildung 12: Eigenverbrauchsanteil bei unterschiedlichen PV-Leistungen und PV-Speicherkapazitäten.....	14
Abbildung 13: Screenshot mit Strompreis Chart des Tarifes „HOURLY“ von aWATTar	15
Abbildung 14: Innerer Aufbau einer LiFePO ₄ -Batteriezelle im teilgeladenen Zustand	16
Abbildung 15: Themengebiete der Forschungsinitiative BATTERY 2030+	19
Abbildung 16: KNX-Logo.....	20
Abbildung 17: Anwendungsgebiete KNX	21
Abbildung 18: Grundrissplan 3-Generationen-Wohnhaus, südliches Grazer-Becken.....	23
Abbildung 19: Jahresstromabrechnung	25
Abbildung 20: Grafik zum H0-Lastprofil für Sommer und Winter	28
Abbildung 21: Screenshot mit technischen Daten des VW ID.7 Pro	29
Abbildung 22: Screenshot mit technischen Daten des VW ID.3 Pro	30
Abbildung 23: Produktdatenblatt Luft-Wasser Wärmepumpe iDM AERO ALM 10-24	31
Abbildung 24: Einstrahlungsscheibe	34
Abbildung 25: Landkarte Steiermark mit durchschnittlicher, jährlicher Globalstrahlung auf realer Fläche.....	35
Abbildung 26: Grafik mit den unterschiedlichen CSER-Werten für vier verschiedene PV-Technologien in den sechs Referenz Klimata nach IEC 61853-4	37
Abbildung 27: Reduzierte Leistung des gesamten Strangs aufgrund eines beschatteten Moduls..	38
Abbildung 28: Leistungsreduktion beschränkt nur auf betroffenes Modul	38
Abbildung 29: Screenshot Gebäudeerstellung im SolarEdge Designer	39
Abbildung 30: Screenshot Modulplatzierung im SolarEdge Designer	40
Abbildung 31: Screenshot Prognose Speicher im SolarEdge Designer	41
Abbildung 32: In Österreich zugelassene Wechselrichter gefiltert nach Hersteller SolarEdge, 3-phasiger Anschluss und Type Hybrid-Wechselrichter	41
Abbildung 33: Geplante Konfiguration mit 2x Hybrid-Wechselrichter mit je 1x Speicher und Backup Interface	42
Abbildung 34: Screenshot Systemüberblick im SolarEdge Designer	43
Abbildung 35: Screenshot Energieerträge im SolarEdge Designer	44
Abbildung 36: Blitz-Schutzonen	45
Abbildung 37: Deckblatt zum Prüfbefund über eine Photovoltaikanlage	49
Abbildung 38: Sektorenkopplung mit KNX	51
Abbildung 39: KNX-SolarEdge Gateway von Elausys	52
Abbildung 40: Screenshot ETS6 KNX-SolarEdge Gateway Grundkonfiguration	53
Abbildung 41: Screenshot ETS6 Kommunikationsobjekte KNX-SolarEdge Gateway.....	54
Abbildung 42: Übersicht Kommunikationsobjekte Homeserver-Logikbaustein Miele.....	55
Abbildung 43: Übersicht Kommunikationsobjekte Homeserver-Logikbaustein Husqvarna Automower	56
Abbildung 44: Lastprofil H0	57
Abbildung 45: Einbindung ise e-charge II KNX-RS485 Gateway	59
Abbildung 46: Visuseite Homeserver Quadclient Photovoltaikanlage	60
Abbildung 47: Ansicht App mySolarEdge	61
Abbildung 48: Screenshot Gira Homeserver QuadConfig mit Photovoltaik-Anzeigefelder	61
Abbildung 49: Screenshot Gira Homeserver Archive	62
Abbildung 50: Verschiedene Energie-Tagesverläufe auf der App mySolarEdge	63
Abbildung 51: Modulmonitoring auf der App mySolarEdge	64

Abbildung 52: Auszug der in Steiermark geltenden Gesetze, Verordnungen aus der Schnellübersicht im Leitfaden ÜBERSICHT ZUR ANZEIGE- UND GENEHMIGUNGSPFLICHT VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN.....	71
Abbildung 53: Formular Ansuchen Photovoltaikanlage.....	72

Abkürzungsverzeichnis

kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
°C	Grad Celsius
µm	Mikrometer
1/4 h	¼-stündlich
AC	Wechselspannung
Akku	Akkumulator
API	Application Programming Interface
a-Si	amorphes Silizium
AUVA	Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt
BCI	BatiBUS Club International
BEV	Battery Electric Vehicle
BTU	Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
CdTe	Cadmiumtellurid
CIGS	Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid
CO ₂	Kohlendioxid
CSER	Climate Specific Energy Rating
DC	Gleichspannung
EHSA	European Home Systems Association
EIBA	European Installation Bus Association
EVU	Energieversorgungsunternehmen
GW	Gigawatt
h	Stunden
IEA	International Energy Agency
IEA-PVPS T13	International Energy Agency – Photovoltaic Power Systems Taskforce 13
KFE	Kuratorium für Elektrotechnik
km	Kilometer
km/a	Kilometer pro Jahr
KNX	KNX Association cvba
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh/a	Kilowattstunden pro Jahr
kWh/m ²	Kilowattstunden pro Quadratmeter
kWp	Kilowatt-Peak
LiFePo ₄	Lithium-Eisenphosphat
LPZ	Ligthing Protection Zone
m ²	Quadratmeter
mAh	Milliamperestunden
mm	Millimeter
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-MH	Nickel-Metallhydrid
OVE	Österreichische Verband der Elektrotechnik
PL	Powerline
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
PV-Modul	Photovoltaik-Modul
REST	Representational State Transfer
ROI	Return on Investment
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance
SoC	State of Charge
STC	Standard-Test Conditions
TP1	Twisted Pair
TP1-256	Twisted Pair mit 256 Geräten
TP1-64	Twisted Pair mit 64 Geräten
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft
VdS	Verband der Sachversicherer

VNB.....	Verteilnetzbetreiber
W	Watt
W/m ²	Watt pro Quadratmeter
WDVS	Wärme-Dämm-Verbund-System
WEA.....	Windenergieanlage
Wh/kg.....	Wattstunden pro Kilogramm
Wh/km.....	Wattstunden pro Kilometer
WLAN.....	Wireless Local Area Network

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kathodenmaterialien (+) für Lithiumionen-Akku	17
Tabelle 2: Bestimmung der Anwendungsfelder durch Speicherkapazität	18
Tabelle 3: Wohnflächen-Aufstellung 3-Generationen-Wohnhaus	24
Tabelle 4: Geräte-Aufstellung 3-Generationen-Wohnhaus	24
Tabelle 5: Jahresverbrauchsberechnung 3-Generationen-Wohnhaus	25
Tabelle 6: Auflistung der Standardlastprofile	26
Tabelle 7: Ausschnitt aus dem Standardlastprofil H0	27
Tabelle 8: Jahresverbrauchsaufstellung Elektroautos	30
Tabelle 9: Jahresenergiebedarf Wärmepumpe	32
Tabelle 10: Weltweiter Ländervergleich mit den unterschiedlichen Globalstrahlungen	33
Tabelle 11: Mittelwerte einzelner Länder aus dem Bericht IEA-PVPS T13-20:2020	36
Tabelle 12: Aufstellung Investitionssumme Photovoltaikanlage	65
Tabelle 13: Amortisationsrechnung Photovoltaikanlage	66
Tabelle 14: Berechnung Gestehungskosten	67

1 Einleitung

1.1 Hintergrund der Arbeit

Bereits in frühen Epochen der Menschheitsgeschichte begann die Nutzung fossiler Energieträger. Zu den anfänglich leicht zugänglichen Energieträgern zählten beispielsweise Holz oder Kohle. Im Laufe der Zeit kamen Erdöl und Erdgas hinzu, welche als Brennstoff in Petroleum- und Gasleuchten Verwendung fanden. Die erste industrielle Revolution im 18. Jahrhundert markiert den Zeitpunkt, zu dem fossile Energieträger zum Betrieb von Maschinen eingesetzt wurden. Der kontinuierliche technische Fortschritt eröffnete sukzessive weitere Anwendungsmöglichkeiten für diese Energieträger.

Ein wesentlicher Nachteil der Nutzung dieser Energieträger ist die überwiegende Emission von Kohlendioxid (CO₂), welches auf den ersten Blick als ungefährlich erscheint. Für Flora und Fauna mag dies zutreffen, jedoch führt eine erhöhte CO₂-Konzentration in der Atmosphäre unseres Planeten zur Verstärkung des Treibhauseffektes. Wie Bödeker & Moebus (2023) unter Bezugnahme auf Paracelsus feststellen: „Allein die Dosis macht, dass ein Ding (k)ein Gift sei“. Es ist die enorme Menge an Kohle, Erdgas und Erdöl, die von der Menschheit verbrannt wird und als „Gift“ wirkt. Die durch Verbrennung freigesetzte CO₂-Menge akkumuliert sich in der Atmosphäre und führt zu einem Anstieg der globalen Jahres-Durchschnittstemperaturen. Dieser als Treibhauseffekt bekannte Mechanismus wurde bereits im 20. Jahrhundert von Wissenschaftlern untersucht.

Demgegenüber steht die Umwandlung von Sonnenenergie direkt in andere nutzbare Energieformen. Diese Energieumwandlungen können mit sehr hohen Wirkungsgraden arbeiten und haben somit nahezu keine Auswirkungen auf das Klima. Es existieren mehrere Methoden zur direkten Nutzung der Sonneneinstrahlung, abhängig von der benötigten Endenergieform. Eine Methode ist die Solarthermie, welche eine direkte Umwandlung in Wärmeenergie ermöglicht. Eine weitere Methode ist die Photovoltaik, die es ermöglicht, direkt elektrische Energie aus Sonnenlicht zu gewinnen. Während Wärmeenergie leichter speicherbar, aber nicht so universell einsetzbar ist wie elektrische Energie, wird letztere bei der Speicherung kleiner Energiemengen vorwiegend als chemische Energie in Akkumulatoren gespeichert. Für die Speicherung im großen Maßstab sind Akkumulatoren ökonomisch nicht sinnvoll, stattdessen wird beispielsweise die Umwandlung in potenzielle kinetische Energie, wie bei einem Pumpspeicherkraftwerk (PSW), genutzt.

Photovoltaikanlagen, die mit einem Energiespeicher ausgestattet sind, benötigen eine gut abgestimmte Regelung, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Insbesondere wenn Zusatzfunktionen, wie eine Notstromfunktion mit eventueller Schwarzstartmöglichkeit, erwünscht sind, ist eine sorgfältige Planung erforderlich. Diese muss die Photovoltaikanlage, den Energiespeicher und das Verbraucherverhalten des Kunden harmonisch integrieren, um eine technisch und ökonomisch sinnvolle Anlage errichten zu können.

Die vorliegende Arbeit adressiert das hochaktuelle Thema der Planung einer Photovoltaikanlage für ein 3-Generationen-Wohnhaus. Berücksichtigt werden die Eigenverbrauchsoptimierung durch einen Speicher und die Anbindung an eine KNX-Gebäudeautomatisierung. Ziel ist es, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie die Photovoltaikanlage, ein Speicher und die KNX-Gebäudeautomatisierung optimal miteinander vernetzt werden können, um sowohl für Eigentümer von Wohngebäuden als auch für die Umwelt einen Mehrwert zu schaffen.

1.2 Relevanz und Aktualität der Photovoltaik und Gebäudeautomation

Der photoelektrische Effekt und die darauf basierende Photovoltaik, obwohl seit Langem bekannt, wurden erst durch den technischen Fortschritt preislich attraktiv und somit für die breite Masse zugänglich. Ursprünglich fand die Photovoltaik ausschließlich in Spezialgebieten wie der Raumfahrt als Energiequelle Verwendung. Preisliche und technische Herausforderungen prägten die Anfangsphase. Die Implementierung der Photovoltaik förderte jedoch Erkenntnisse, die zur technischen Weiterentwicklung der Photovoltaikzellen beitrugen. Diese Weiterentwicklung in technischer Reife und Preisgestaltung führte dazu, dass Photovoltaik auch im privaten Sektor für die Energieversorgung relevant wurde.

Mittlerweile kann Photovoltaik zur Versorgung ganzer Wohnhäuser eingesetzt werden. Ihre Stärken, wie der nahezu emissionslose Betrieb und die Nutzung kostenloser Sonneneinstrahlung als Primärenergiequelle, werden dabei voll ausgespielt.

Bereits früh wurden die Auswirkungen der Freisetzung großer Mengen an CO_2 , resultierend aus der Verbrennung fossiler Energieträger, erkannt. Die sichtbaren Auswirkungen reichen von punktuellen Extremwetterereignissen mit Waldbränden und Überschwemmungen bis zum kontinuierlichen Schrumpfen der Gletscher. Hier bietet die Photovoltaik eine effiziente Alternative, um elektrische Energie kostengünstig und CO_2 -neutral direkt aus Sonneneinstrahlung zu generieren.

Für die optimale Steuerung von Energieverbräuchen und -flüssen der so gewonnenen Energie ist die Gebäudeautomation unerlässlich. Das Prinzip, dass im elektrischen Netz stets ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch herrschen muss, kann durch Gebäudeautomation realisiert werden. Alle Verbraucher, Speicher sowie Erzeuger werden in dieses System integriert und mit intelligenten Logiken verknüpft. Die Gebäudeautomation eignet sich, um die einzelnen, an sich autarken Systeme zentral zu steuern. Daten der Systeme, wie die aktuelle Erzeugungsleistung der Photovoltaikanlage oder der Ladezustand (State of Charge, SoC) des PV-Speichers, dienen dabei als Auslöser.

Die klassische Energieversorgung mit Elektrizität hat sich zu einem vermaschten Netz entwickelt, das durch die zunehmende Nutzung volatiler, erneuerbarer Energien belastet wird. Eines der Worst-Case-Szenarien ist die sogenannte Dunkelflaute, wenn Photovoltaikanlagen aufgrund von Dunkelheit und Windenergieanlagen wegen Windstille keine Energie liefern. Hier kann die Gebäudeautomation extern angesteuert werden, um das Netz durch Abschaltung elektrischer Lasten vor Energieknappheit zu schützen.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, eine Beispielplanung einer Photovoltaikanlage mit Speicher und der Vernetzung mittels einer KNX-Gebäudeautomation zur Eigenverbrauchsoptimierung aufzuzeigen.

Darin sollen folgende Forschungsfragen herausgearbeitet werden:

- 1) Ist, beim exemplarisch gewählten Wohnhaus, eine Photovoltaikanlage zur Abdeckung der elektrischen Energie für ein spezifisches 3-Generationen Wohnhaus möglich?
- 2) Ist mit dem Speicher ein schwarzstartfähiger Notstrombetrieb möglich?
- 3) Wie soll die KNX-Gebäudeautomatisierung angebunden sein und welche Funktionen sind möglich?

1.4 Struktur dieser Ausarbeitung

Diese wissenschaftliche Arbeit umfasst 9 Hauptkapitel. Nach der Einleitung werden in Kapitel 2 die Grundlagen der drei Themenschwerpunkte erörtert: erstens die Photovoltaikanlage selbst, zweitens das Speichersystem und drittens die KNX-Gebäudeautomatisierung. Die Bedarfsermittlung der notwendigen elektrischen Energie für ein 3-Generationen-Wohnhaus und die Standortanalyse sind Inhalte des Kapitels 3. Kapitel 4 fokussiert sich auf die Planung der Photovoltaikanlage und des Speichersystems, einschließlich der Bestimmung der notwendigen Größe der Photovoltaikanlage sowie deren Konfiguration.

In Kapitel 5 wird die Integration der Photovoltaikanlage und des Speichers in die KNX-Gebäudeautomatisierung behandelt. Hierbei wird eine Strategie für die Implementierung und Konfiguration der verschiedenen Systemkomponenten entwickelt. Kapitel 6 befasst sich mit der Optimierung des Eigenverbrauchs durch die KNX-Gebäudeautomation, wobei Algorithmen und Logiken zur Maximierung des Eigenverbrauchs einen wesentlichen Bestandteil darstellen. Die finanzielle Analyse, einschließlich der Wirtschaftlichkeit und Rentabilität, wird in Kapitel 7 dargestellt, um den erwarteten finanziellen Nutzen herauszuarbeiten. Kapitel 8 beschäftigt sich mit den gesetzlichen und regulatorischen Aspekten, die im Kontext der Planung und Implementierung der Photovoltaikanlage in ein bestehendes Gebäude zu beachten sind. Abschließend werden im letzten Kapitel ein Fazit sowie ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen gegeben.

2 Grundlagen

2.1 Verständnis von Photovoltaikanlagen

In der Elektro- und Informationstechnik wird der Bereich, welcher sich mit der Gewinnung von elektrischer Energie, insbesondere aus Sonnenenergie, befasst, als „Photovoltaik“ bezeichnet (Cornelsen Verlag GmbH, 2023). Dabei leitet sich der erste Wortteil, „Photo“, vom griechischen Wort für Licht ab, während der zweite Wortteil auf „Volt“ verweist, die Einheit für elektrische Spannung.

2.1.1 Geschichte und Entwicklung der Photovoltaik

Die Historie der Photovoltaik begann mit der Entdeckung der Photokonduktanz des Selens. Dies ist eng verknüpft mit der Verlegung des ersten Transatlantik-Telegraphen-Kabels. Der britische Elektroingenieur Willoughby Smith entwickelte für diese Aufgabe ein Prüfgerät, das kristalline Selen-Stangen enthielt. Bei Messungen traten später Unregelmäßigkeiten auf: Der Aufbau funktionierte zwar nachts, aber bei Tageslicht konnte keine Messung durchgeführt werden. Die Unregelmäßigkeiten waren auf die Photokonduktanz des Selens zurückzuführen, d. h., die Konduktanz änderte sich bei Lichteinfall.

Smith führte mehrere Experimente mit Selen durch und veröffentlichte Ergebnisse, die die Photokonduktanz des Selens näher beschrieben. Auf Grundlage dieser Untersuchungen experimentierten weitere Wissenschaftler mit Selen. Dabei stellten der Forscher William Grylls Adams und sein Student Richard Evans Day fest, dass der Lichteinfall auf Selen nicht nur den elektrischen Widerstand verringerte, sondern auch eine Spannung erzeugte.

Die Bezeichnung „photoelektrischer Effekt“ geht auf Adams und Days zurück. Im Jahr 1894 baute der New Yorker Charles Fritts erstmals ein großes Photovoltaik-Modul (PV-Modul) aus den leistungsschwachen Selen-Einzelplatten zusammen (Wesselak & Voswinckel, 2012). Allerdings wies es mit nur 1 bis 2 % Wirkungsgrad im Vergleich zu heutigen PV-Modulen mit über 20 % einen bescheidenen Wirkungsgrad auf. Das Selen-PV-Modul weckte großes Interesse in der Wissenschaft, da es die direkte Umwandlung der Sonnenlichtenergie in elektrische Energie ermöglichte.

Die genauen Prozesse beim inneren Photoeffekt konnten zu dieser Zeit noch nicht erklärt werden. Die ersten Hinweise wurden erstmalig von Albert Einstein in seiner Veröffentlichung von 1905 gegeben, in der er die Vermutung äußerte, dass Licht eine Quantenform besitzt. Seit den 1920er-Jahren wird der innere Photoeffekt als photovoltaischer Effekt bezeichnet, benannt nach dem italienischen Physiker Alessandro Volta.

Die geringe Leistung und die hohen Herstellungskosten des Selen-PV-Moduls verhinderten jedoch eine Anwendung in der Energieerzeugung. Der Durchbruch erfolgte erst in den 1950er-Jahren mit der aufkommenden Siliziumtechnik. In den Bell Laboratories wurden die ersten Solarzellen entwickelt, die Silizium mit einem p-n-Übergang verwendeten. Dadurch konnte der Wirkungsgrad um das Sechsfache gesteigert werden, auf bis zu 6 % im Vergleich zur Selenzelle.

The New York Times

Vast Power of the Sun Is Tapped By Battery Using Sand Ingredient

Special to The New York Times.

MURRAY HILL, N. J., April 25—A solar battery, the first of its kind, which converts useful amounts of the sun's radiation directly and efficiently into electricity, has been constructed here by the Bell Telephone Laboratories.

The new device is a simple-looking apparatus made of strips of silicon, a principal ingredient of common sand. It may mark the beginning of a new era, leading eventually to the realization of one of mankind's most cherished dreams—the harnessing of the almost limitless energy of the sun for the uses of civilization.

they had achieved an efficiency of 6 per cent in converting sunlight directly into electricity. This, they asserted, compares favorably with the efficiency of steam and gasoline engines, in contrast with other photoelectric devices, which have a rating of no more than 1 per cent.

With improved techniques the efficiency may be expected to be increased substantially, they added. They observed that nothing is consumed or destroyed in the energy conversion process and there are no moving parts, so the solar battery "should theoretically last indefinitely."

The experimental solar battery

Abbildung 1: Artikelausschnitt von der Titelseite der New York Times vom 26.04.1954

(Wesselak & Voswinckel, 2012)

In den 1950er-Jahren, als die Raumfahrt aufkam, erwies sich die Photovoltaik als ideal, da sie ihre Fähigkeit zur direkten Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie voll ausschöpfen konnte. Ihre Vorzüge bestanden damals und bestehen auch heute noch in ihrem geringen Gewicht, dem Fehlen mechanischer Teile, der Einfachheit ihrer Komponenten und ihrem emissionsfreien Betrieb.

Der Ölpreisschock in den 1970er-Jahren führte zu einem Umdenken von fossilen Energieträgern hin zu erneuerbaren Energieträgern. In diesem Wandel wurde die bereits in der Raumfahrt etablierte Photovoltaik aufgegriffen und auch für herkömmliche, terrestrische Anwendungen interessant. Ab diesem Jahrzehnt begann eine zunehmende Nutzung und die Entwicklung verlief in zwei Richtungen. Einerseits wurden gewerbliche Großanlagen mit mehreren Megawatt (MW) Leistung installiert, die konventionelle, kalorische Kraftwerke eins zu eins ersetzen können. Andererseits wurden dezentrale, private Kleinanlagen entwickelt, die nur den Energiebedarf der örtlichen Verbraucher abdecken.

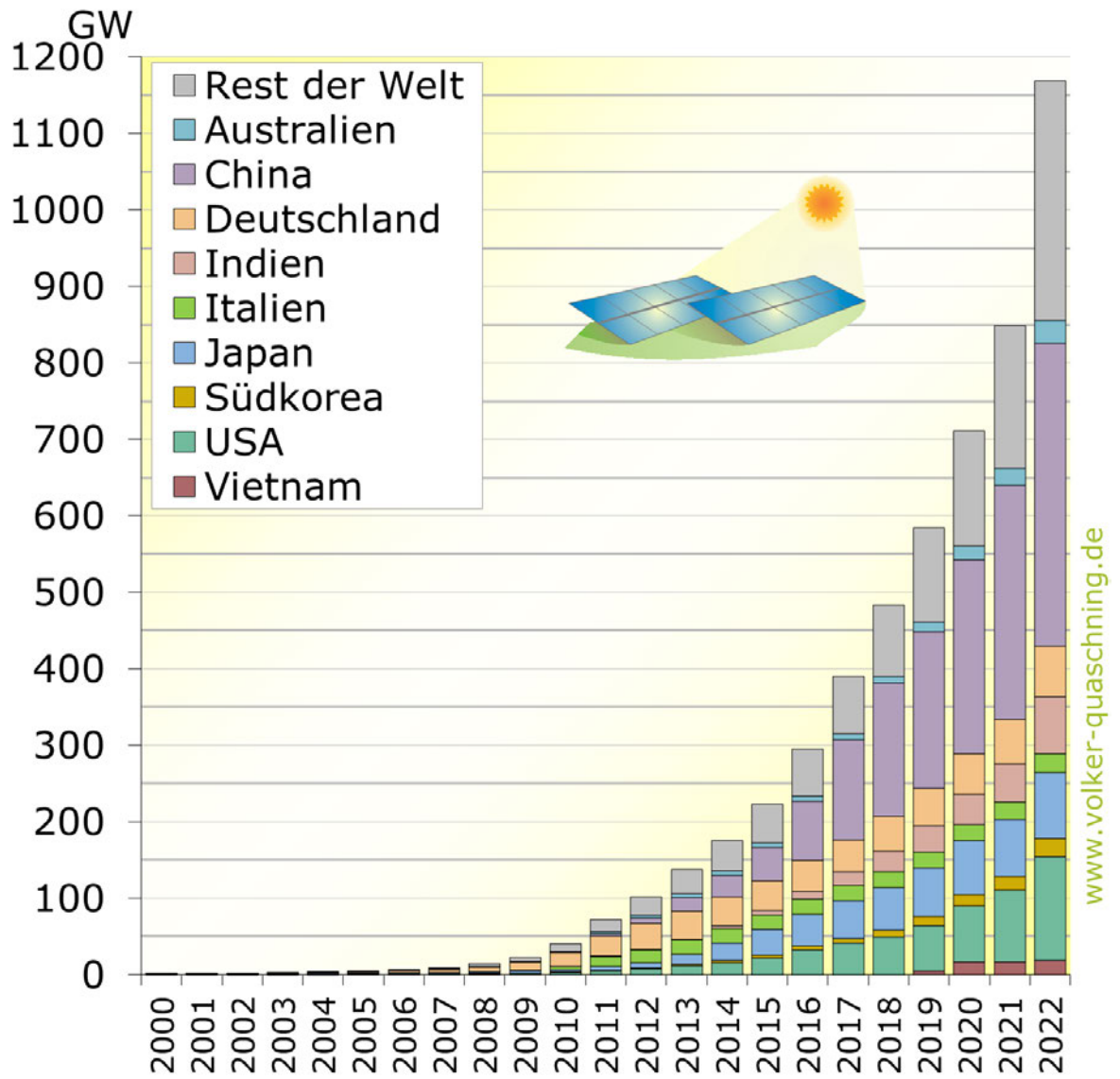


Abbildung 2: Weltweit installierte Photovoltaikleistung

(Quaschnig, 2023)

Weltweit ist, wie in der oberen Grafik dargestellt, ein Anstieg der installierten Photovoltaikanlagen verzeichnet. Die Leistung wird hier in Gigawatt (GW) für den Zeitraum von 2000 bis 2022 angezeigt. In dieser Darstellung sind lediglich die Länder aufgeführt, die im Jahr 2021 mehr als 21 GW installiert hatten.

2.1.2 Funktion und Wirkungsweise von photovoltaischen Zellen

Photovoltaische Zellen, auch als Solarzellen bekannt, vollziehen die direkte Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie ohne Zwischenschritte. Das aktive Element der Solarzelle ist grundsätzlich eine herkömmliche Halbleiterdiode, bei der die Grenzschicht zwischen den P- und N-Schichten vom Licht bestrahlt wird.

Die Halbleiterdiode besteht typischerweise aus Silizium, obwohl auch andere Halbleitermaterialien wie Germanium oder Selen verwendet werden können. Selen war ursprünglich das grundlegende Halbleitermaterial für Solarzellen. Aufgrund seines geringen Wirkungsgrades von maximal 1 bis 2 % wurde es jedoch in den 1950er-Jahren durch Silizium als Halbleitermaterial ersetzt. Moderne Silizium-Solarzellen erreichen heute einen Wirkungsgrad von über 20 %.

Die Struktur der Solarzelle entspricht somit einer Halbleiterdiode mit zwei unterschiedlich dotierten Schichten. Das am häufigsten verwendete Material ist Silizium, das durch die Bildung eines dreidimensionalen Kristallgitters die Oktettregel einhält. Dieses Kristallgitter ist äußerst stabil und somit elektrisch nicht leitend aufgrund des Mangels an freien Valenzelektronen. Erst äußere Einflüsse wie die Bestrahlung mit Licht können Elektronen aus dem Gitter lösen, ein Effekt, der als Photo-Leitfähigkeit bekannt ist.

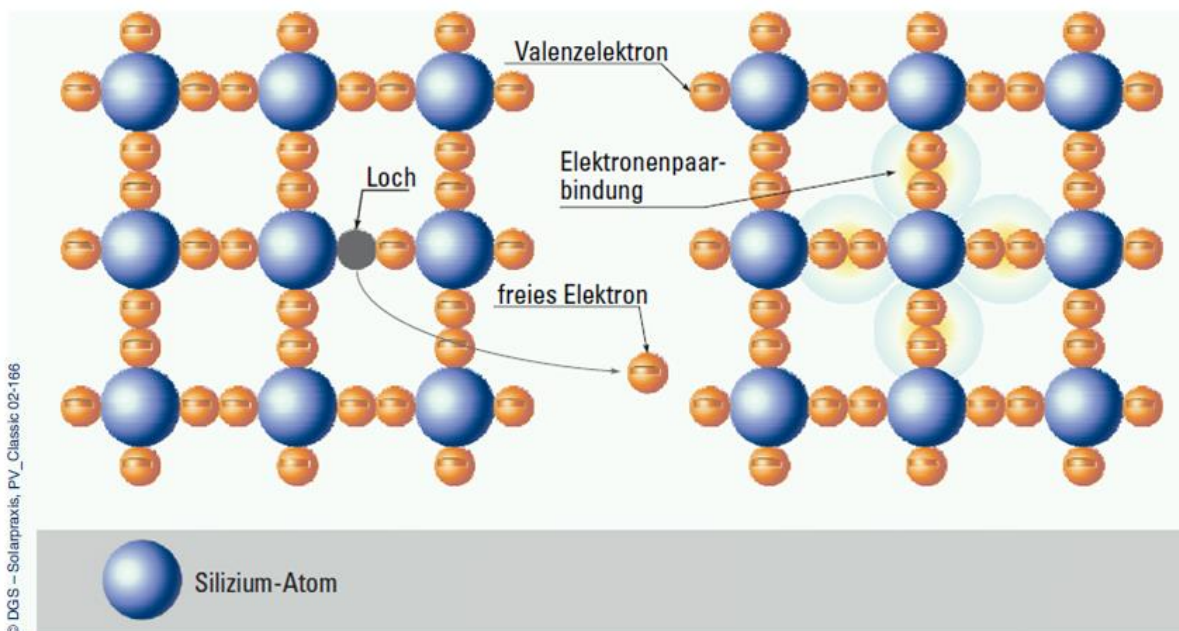


Abbildung 3: Kristallstruktur Silizium Eigenleitung

(men at work GmbH & Co. KG, 2024)

Durch Dotierung, d. h., die gezielte Verunreinigung mit anderen Stoffen, die eine unterschiedliche Anzahl von Valenzelektronen aufweisen, kann eine elektrische Leitfähigkeit ermöglicht werden. Im Falle der Solarzelle werden zwei Schichten mit entgegengesetzter Dotierung kombiniert. Die untere, dickere Schicht besteht aus positiv dotiertem Silizium, wobei zur Erreichung der positiven Dotierung Materialien mit drei Valenzelektronen wie Bor in das Silizium eingebracht werden. Die obere, dünnere Siliziumschicht wird negativ dotiert, indem Materialien mit fünf Valenzelektronen wie Phosphor verwendet werden.

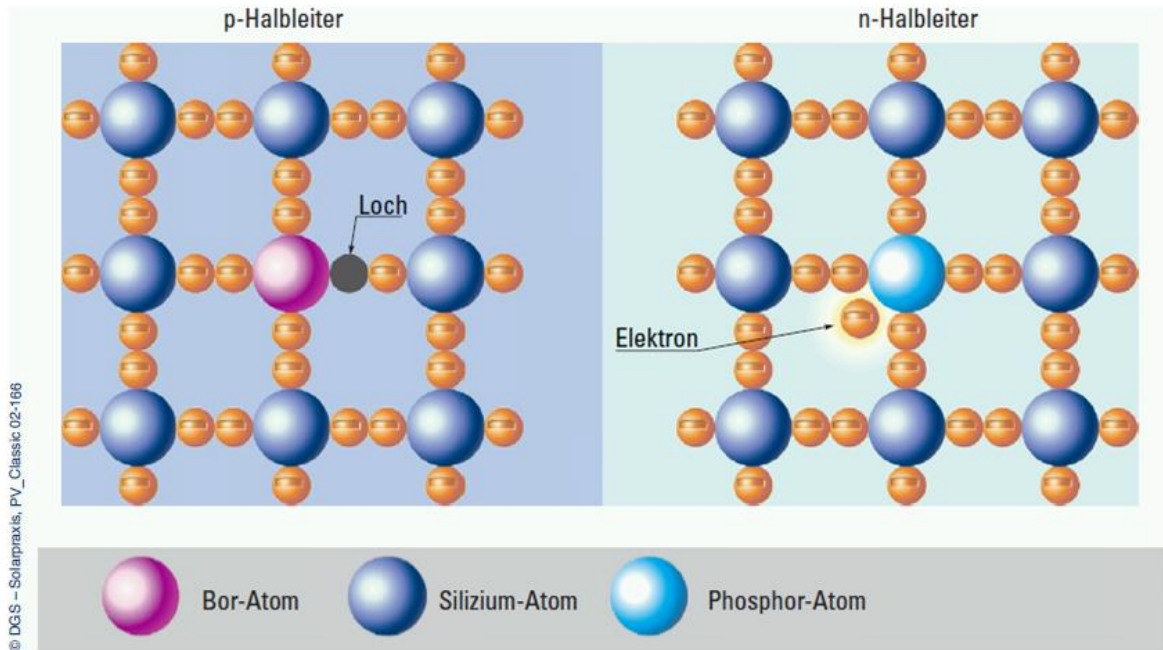


Abbildung 4: Störstellenleitung bei n- und p-dotiertem Silizium

(men at work GmbH & Co. KG, 2024)

Wenn diese beiden Schichten zusammengeführt werden, verschieben sich Elektronen von der N-Schicht zur P-Schicht, und eine, nach außen hin, neutrale Schicht bildet sich aus. Diese Schicht wird auch als Raumladungszone bezeichnet. Aufgrund der Elektronenbewegung von den Phosphor- zu den Bor-Atomen entsteht ein elektrisches Feld.

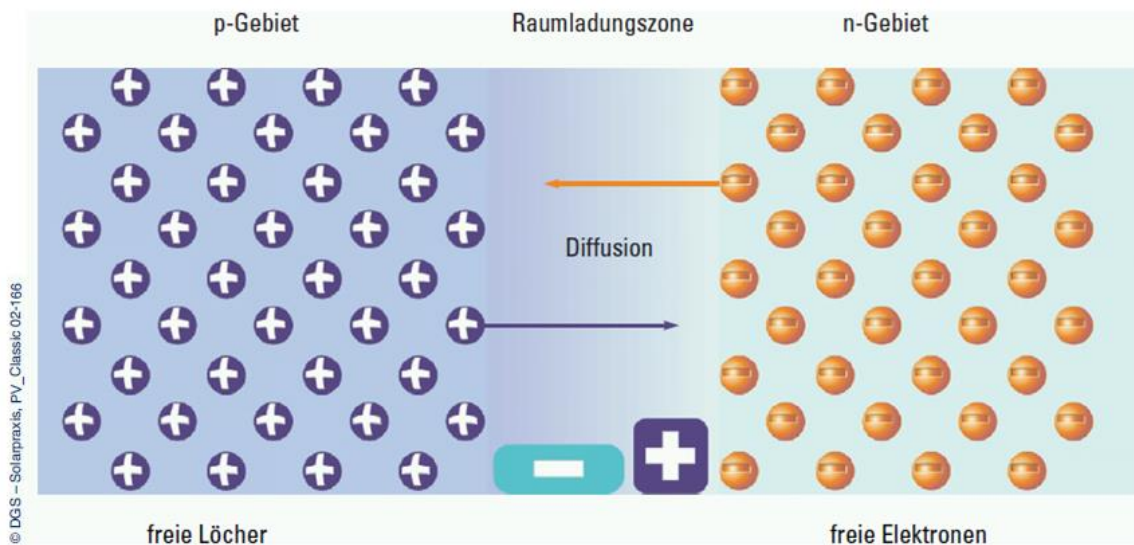


Abbildung 5: Ausbildung Raumladungszone

(men at work GmbH & Co. KG, 2024)

Wenn diese Raumladungszone nun mit Sonnenlicht bestrahlt wird, setzt sich der Motor der Solarzelle in Bewegung.

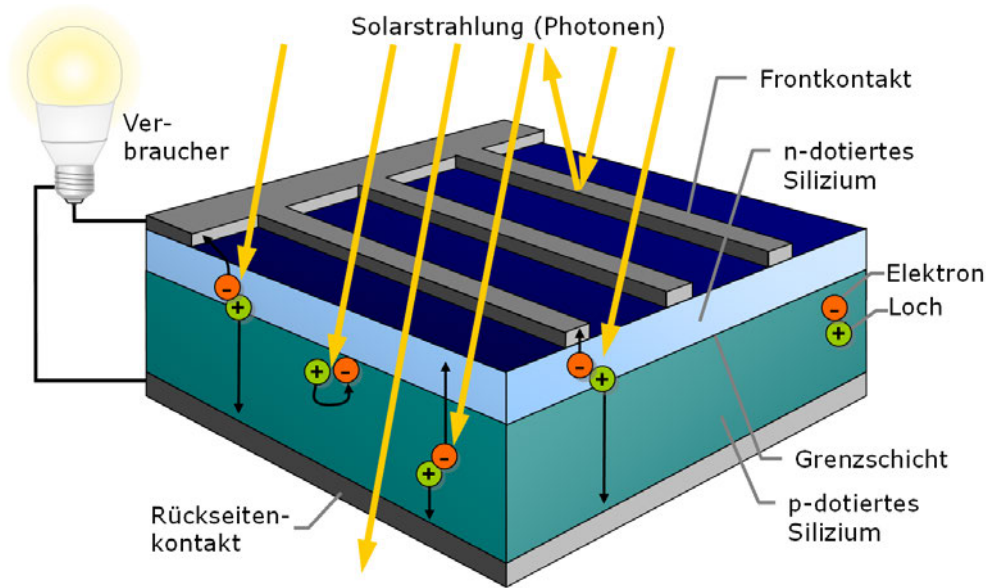


Abbildung 6: Aufbau und Vorgänge in einer Solarzelle

(Quaschnig, 2021)

Das Sonnenlicht dringt durch die dünne, aber stark dotierte N-Schicht ein, wodurch Elektronen von den Bor-Atomen freigesetzt werden. Diese Elektronen folgen dem elektrischen Feld der Raumladungszone in die N-Schicht und werden an der Oberseite durch metallische Finger-Frontkontakte abgegriffen. An der Rückseite, wo sich die P-Schicht befindet, werden die Elektronen über den vollflächig aufgetragenen Rückseitenkontakt rückgeführt, um den Stromkreislauf zum Verbraucher zu schließen.

Die einzelnen Solarzellen werden elektrisch miteinander verbunden, um die Gesamtleistung zu erhöhen. Zur Witterungsbeständigkeit werden sie an der Vorderseite mit einer Glasscheibe abgedeckt und zusätzlich mit einer Schutzschicht versehen. Bei Standardmodulen schützt eine Folie auf der Rückseite vor eindringendem Wasser und Schmutz. Seitlich wird das gesamte PV-Modul durch einen Rahmen aus Aluminium geschützt, der ein geringes Gewicht und hohe Steifigkeit aufweist.

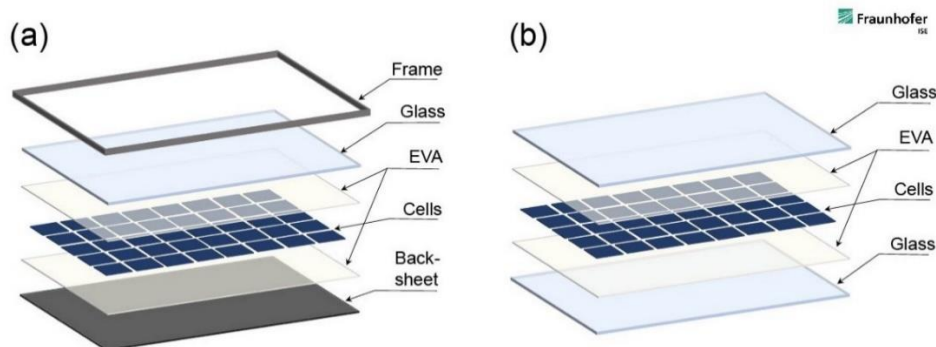


Abbildung 7: Vergleich der Aufbauten von Glas-Glas PV-Module (b) und PV-Modulen mit Rückseitenfolie (a)

(Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 2021)

Bei bifazialen Solarmodulen, die von beiden Seiten Licht absorbieren können und somit die Stromerzeugung auf beiden Seiten ermöglichen, ist an beiden Seiten eine Glasabdeckung angebracht.

2.1.3 Verschiedene Arten von Photovoltaikzellen und deren Anwendung

Photovoltaikzellen werden in verschiedene Arten unterteilt, von denen jede je nach Anforderungen Anwendung findet. Die ersten beiden Arten, die in großem Maßstab verwendet wurden und immer noch verwendet werden, sind die polykristallinen und monokristallinen Silizium-Solarzellen. Beide bestehen aus hochreinem Silizium, das durch den großtechnischen Prozess der Reduktion von Quarzsand (Siliziumdioxid, SiO₂) zu Silizium (Si) gewonnen wird.

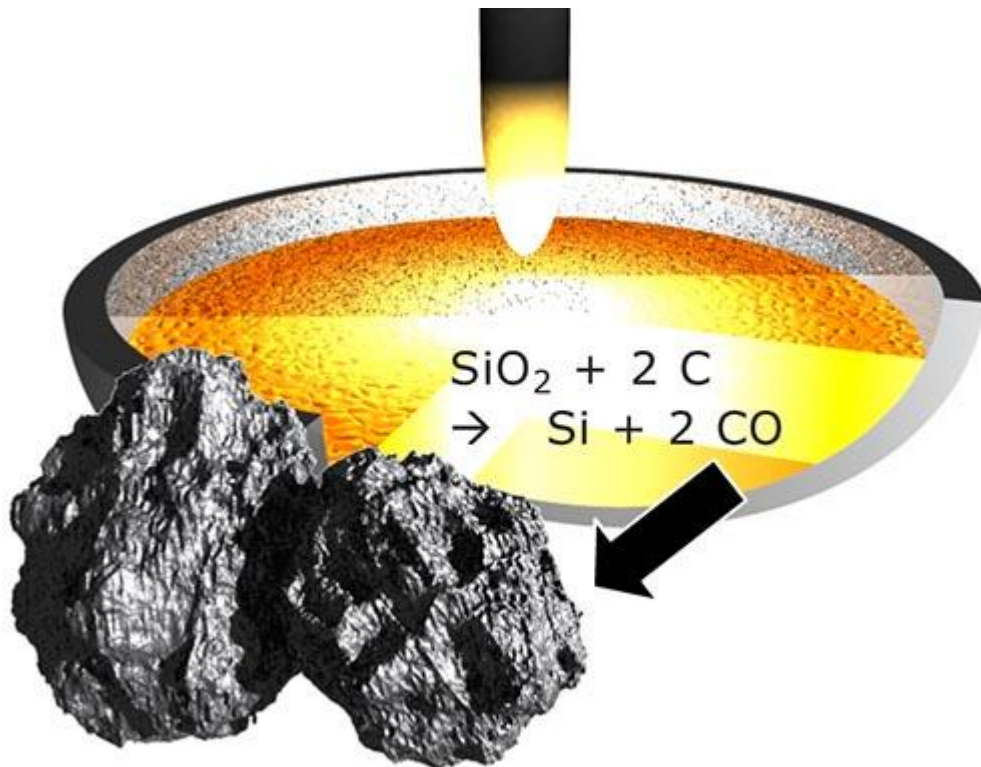


Abbildung 8: Reduktion von SiO₂ mit Kohlenstoff zu Rohsilizium im Lichtbogenofen

(MicroChemicals GmbH, 2021)

Im nächsten Verarbeitungsschritt werden das gewonnene Silizium zu sogenannten Ingots gegossen. Ab diesem Punkt unterscheiden sich die Produktionswege der polykristallinen und monokristallinen Solarzellen. Zur Herstellung der polykristallinen Solarzellen werden die Ingots anschließend mithilfe eines speziellen Diamant-Drahtsägwerkzeugs, ähnlich einem Eierschneider, in hauchdünne Wafer geschnitten. Um Zeit zu sparen, werden dabei mehrere parallel gespannte Sägedrähte eingesetzt. Die Dicke der so gewonnenen Wafer beträgt etwa 0,18 Millimeter (mm).

In einem weiteren Schritt werden auf der Vorder- und Rückseite durch das Einbringen von Fremdatomen die notwendigen Dotierungen erzeugt. Für die Erzeugung der N-Schicht werden Atome eines Fremdstoffs eingebracht, die ein Elektron mehr als Silizium in der äußeren Schicht besitzen. Diese Dotierung ermöglicht eine Elektronenleitung durch das Silizium.

Zudem wird die P-Dotierung mithilfe eines Stoffs erzeugt, der nur drei Außenelektronen, wie beispielsweise Bor, besitzt. Die P-Dotierung erstreckt sich fast über die gesamte Dicke der Solarzelle, während die N-Schicht sehr dünn ist. Dies ist erforderlich, um einen hohen Wirkungsgrad der Solarzelle zu erreichen, da das eingestrahlte Licht durch die obere N-Schicht bis zur Grenzschicht zwischen den beiden Dotierungen gelangen muss.

Nach der Dotierung werden die Solarzellen einer Endbehandlung unterzogen, die beispielsweise eine Leistungssteigerung durch Passivierung der Oberfläche erreicht. Die einzelnen Solarzellen werden dann zu einem Solarmodul zusammengefügt und elektrisch verbunden. Diese Art von Solarzellen findet Anwendung in kostengünstigen Solarmodulen und wurde bis vor wenigen Jahren aufgrund

ihres günstigen Preises in Standard-Photovoltaikanlagen eingesetzt. Ihr Nachteil gegenüber den monokristallinen Solarzellen ist ihr etwas geringerer Wirkungsgrad von etwa 15 %. Polykristalline Solarzellen sind durch ihre bläuliche Färbung, die deutlich sichtbaren Kristalle und die rechteckige Form erkennbar.

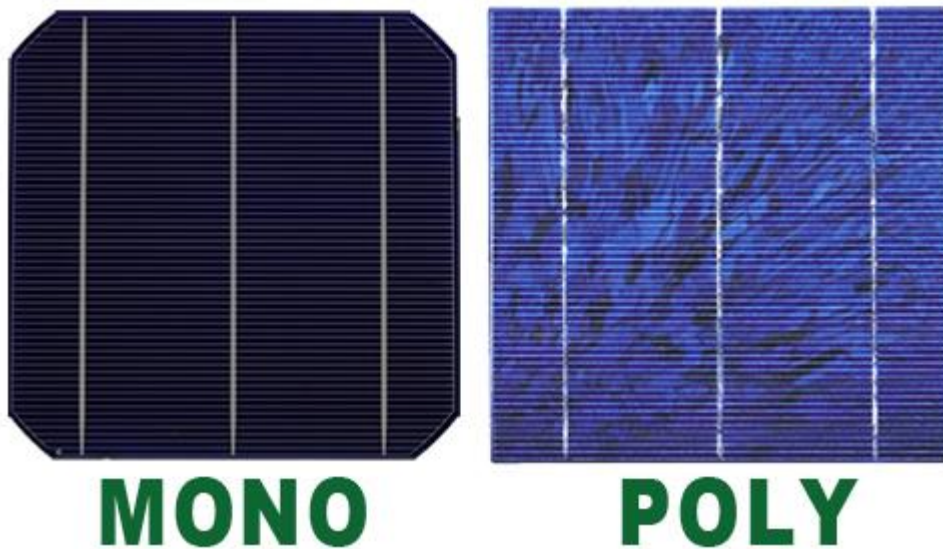


Abbildung 9: Unterschiedliche Erscheinungsformen von Mono- und Polykristallinen Solarzellen

(Brenner Energie GmbH, 2019)

Monokristalline Solarzellen sind aufgrund eines zusätzlichen Verarbeitungsschritts teurer in der Produktion. Sie werden nicht aus einem gegossenen Block hergestellt, sondern aus einem einzigen riesigen Einkristall oder Monokristall geschnitten. Der monokristalline Ingot wird in speziellen Anlagen produziert, in denen aus einer Siliziumschmelze der Ingot gezogen wird. Am Anfang steht ein Impfkristall, der in die sich drehende Schmelze getaucht wird, wodurch sich weitere Siliziumatome beim langsamen Herausziehen absetzen. Die weitere Verarbeitung entspricht derjenigen bei polykristallinen Solarzellen.

Heutzutage finden monokristalline Solarzellen Anwendung in Standard-Solarmodulen, da die Produktionsprozesse durch die großindustrielle Fertigung optimiert und die Herstellungskosten gesenkt wurden. Ihr Vorteil gegenüber den polykristallinen Solarzellen liegt in ihrem höheren Wirkungsgrad von über 20 %. Optisch sind monokristalline Solarzellen aufgrund ihrer einheitlichen dunklen Farbe ansprechender. Dadurch können vollständig schwarze Solarmodule, sogenannte „Fullblack-Module“, hergestellt werden. Obwohl diese Solarmodule optisch ansprechend sind, absorbieren sie wie schwarze Strahler alle Strahlung und erhitzen sich daher stärker als polykristalline Solarmodule. Dies wirkt sich negativ auf den Wirkungsgrad aus, da Silizium-Solarmodule bei höheren Temperaturen eine geringere Leistung haben.

Eine weitere Art von Solarzellen ist die Dünnschicht-Solarzelle, die, wie der Name schon sagt, wesentlich dünner sind als mono- oder polykristalline Solarzellen. Ihre Dicke beträgt nur etwa ein Hundertstel derjenigen von mono- oder polykristallinen Solarzellen, also etwa 1 Mikrometer (μm).

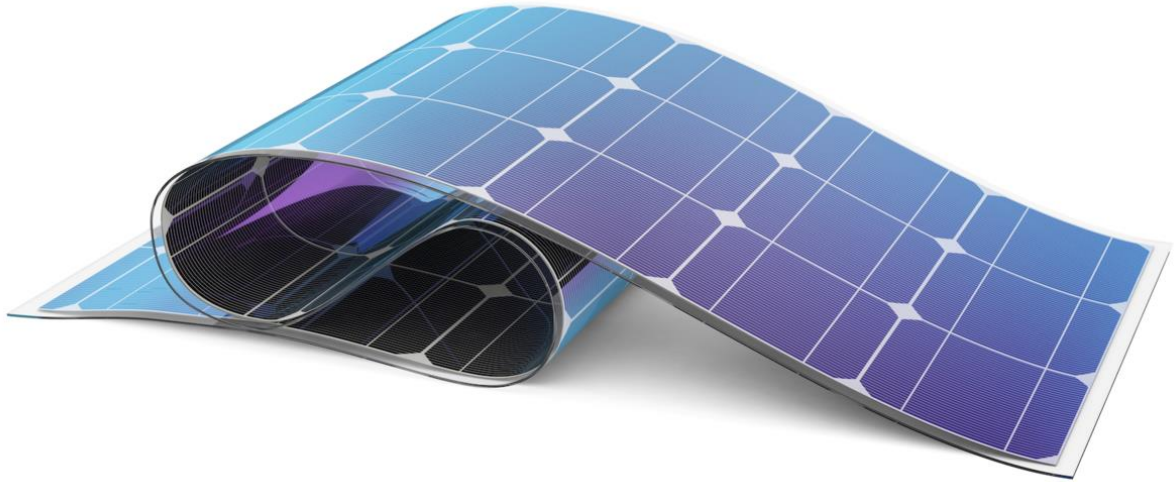


Abbildung 10: Dünnschichtmodul

(Photovoltaikforum GmbH, 2022)

Die Erzeugung dieser dünnen Schicht erfolgt durch die Bedampfung eines transparenten Trägermaterials wie Glas oder Kunststoff. Als Bedampfungsmaterialien werden hier amorphes Silizium (a-Si), Cadmiumtellurid (CdTe) oder Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid (CIGS) verwendet. Ein Vorteil dieser Art von Solarzelle liegt in ihrer geringen Dicke und dem geringen Gewicht, was die Herstellung von flexiblen Solarmodulen ermöglicht, wie im oberen Bild dargestellt. Dies ist besonders für mobile Anwendungen oder die Verkleidung gewölbter Oberflächen wie Autodächer oder Gebäudefassaden geeignet.

Die Nachteile dieser Dünnschicht-Solarzellen liegen in einem niedrigeren Wirkungsgrad, der in der Regel bei etwa 10 bis 14 % liegt. Bei Dünnschichtzellen auf CIGS-Basis kann jedoch auch ein Wirkungsgrad von 15 bis 20 % erreicht werden.

2.2 Eigenverbrauch und Speichertechnologien

Ein grundlegender Anreiz für die Installation einer Photovoltaikanlage besteht darin, die benötigte elektrische Energie im Haushalt selbst zu erzeugen. Allerdings ist eine autarke Energieversorgung aufgrund der Tatsache, dass die Sonne nachts nicht scheint, allein mit einer reinen Photovoltaikanlage nicht möglich.

2.2.1 Konzept und Vorteile des Eigenverbrauchs

Es gibt jedoch technische Lösungen, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Eine einfache Methode besteht darin, den Betrieb elektrischer Lasten in das Produktions-Zeitfenster der Photovoltaikanlage zu verlagern, also während der Tagesstunden. Diese Möglichkeit wird auch als „Load Shifting“ bezeichnet. Viele Geräte der Weißen Ware, wie Geschirrspüler oder Waschmaschinen, verfügen über Zeitschaltuhren, mit denen die Startzeiten vorprogrammiert werden können, was es einfach macht, ihre Betriebszeiten an die Tageszeiten anzupassen. Für andere elektrische Verbraucher sind zusätzliche Steuergeräte oder einfach ein „Smarter User“ erforderlich, um den Betrieb auf die Produktionszeiten der Photovoltaikanlagen abzustimmen.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung des Eigenverbrauchs besteht darin, den aktuellen elektrischen Energiespitzenwert mit der Spitzenleistung der Photovoltaikanlage abzugleichen oder die Lastspitzen zu begrenzen. Diese Methode wird als „Peak Shaving“ bezeichnet.

Die erzeugte elektrische Energie kann auch in andere Energieformen umgewandelt und für die Nachtstunden zwischengespeichert werden. Dies erfordert jedoch zusätzliche Geräte wie chemische Speicher in Form von Akkus.

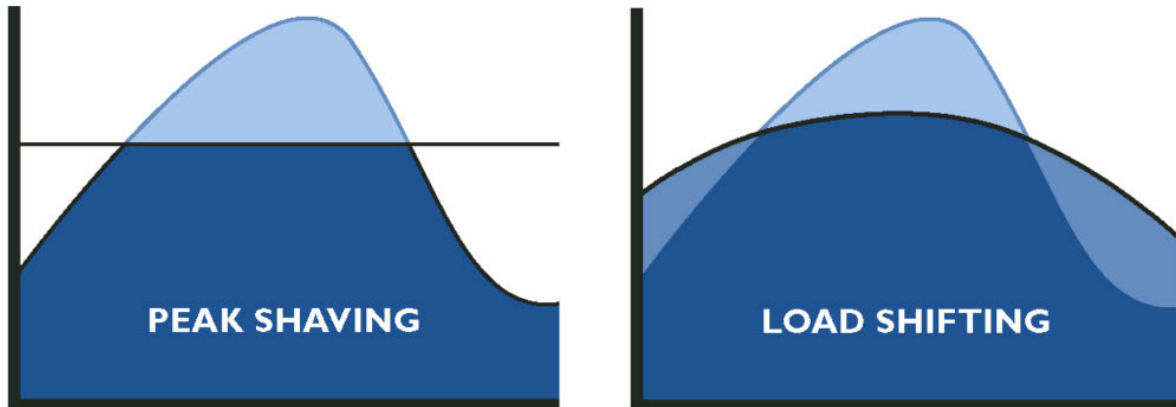


Abbildung 11: Unterschiede Peak-Shaving und Load-Shifting

(bChain, 2022)

Der direkte Eigenverbrauch der erzeugten elektrischen Energie, ohne die Verwendung eines Zwischenspeichers, stellt die kostengünstigste Option dar und sollte stets angestrebt werden. Dies ist besonders wichtig, um die Größe und Kosten von elektrischen Zwischenspeichern so gering wie möglich zu halten. Im Allgemeinen sollte der Zwischenspeicher in den Stunden ohne Sonnenlicht nur für nicht verschiebbare Lasten genutzt werden.

2.3 Funktion und Arten von Energiespeichern

Die Preise für Energiespeicher für Photovoltaikanlagen sind gesunken und haben daher auch wirtschaftlich an Attraktivität gewonnen. Durch den Einsatz solcher Speicher kann die selbst erzeugte elektrische Energie der Photovoltaikanlage zwischengespeichert werden. Dies ermöglicht eine zeitlich unabhängige Nutzung der Energie vom eigenen Dach und eine Steigerung des Autarkiegrades.

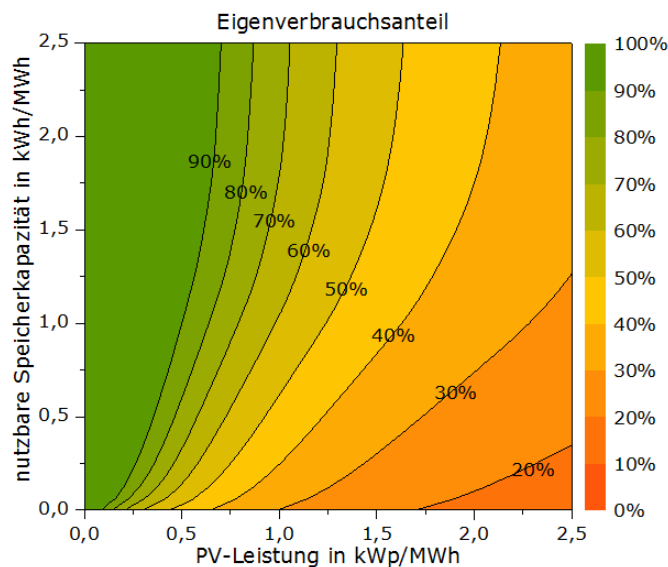


Abbildung 12: Eigenverbrauchsanteil bei unterschiedlichen PV-Leistungen und PV-Speicherkapazitäten

(Quaschnig, 2013)

In Abbildung 12 ist dargestellt, wie der Eigenverbrauchsanteil durch die Verwendung eines Speichers erhöht werden kann. Die PV-Leistung wird hier als Verhältnis von installierter Leistung in Kilowatt-Peak (kWp) zum jährlichen Energiebedarf in Megawattstunden (MWh) angegeben, und die nutzbare Speicherkapazität wird ebenfalls als Verhältnis in Kilowattstunden (kWh) zum Jahresenergiebedarf in MWh dargestellt.

Laut dem Online-Newsletter 5-2022 der E-Control kann bei einem Dreipersonen-Haushalt von einem Jahresverbrauch von 4200 kWh ausgegangen werden (Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft, 2024).

Mit dem gerundeten Wert von 4000 Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) und einer installierten PV-Leistung von 2 kWp ergibt sich ein Verhältnis von 0,5. Ohne Speicher zeigt dieses Diagramm, dass ein Eigenverbrauchsanteil von nahezu 50 % erreichbar ist. Wenn man jedoch einen PV-Speicher mit einer Kapazität von 6 kWh hinzufügt, ergibt sich bei einem angenommenen Jahresverbrauch von 4 MWh/a ein Verhältnis von 1,5, und die Eigenverbrauchsquote kann auf über 90 % gesteigert werden.

Eine hohe Eigenverbrauchsquote ist ein wichtiger Faktor für die Amortisationsrechnung, da die Kosteneinsparung durch die geringen Gestehungskosten der elektrischen Energie von der Photovoltaikanlage steigt. Dennoch dürfen die Anschaffungskosten nicht unterschätzt werden, daher sollte der Speicher nicht überdimensioniert sein, um sicherzustellen, dass die Anlage auch eine finanzielle Amortisation erlebt.

Ein Speicher ist nicht nur zur Steigerung der Eigenverbrauchsquote sinnvoll, sondern auch an exponierten Standorten, wo die Netzanschlussleistung begrenzt ist. In solchen Fällen können Speicher dazu dienen, kurzfristige Lastspitzen abzudecken.

Ein weiterer Vorteil eines Speichers besteht darin, dass er es ermöglicht, Strom zu Zeiten mit günstigen Energiekosten aus dem Netz zu beziehen und diesen dann zu nutzen, wenn die Energie teurer ist, anstatt sie aus dem Netz zu beziehen. Dies kann besonders bei stündlichen Stromtarifen von Vorteil sein.

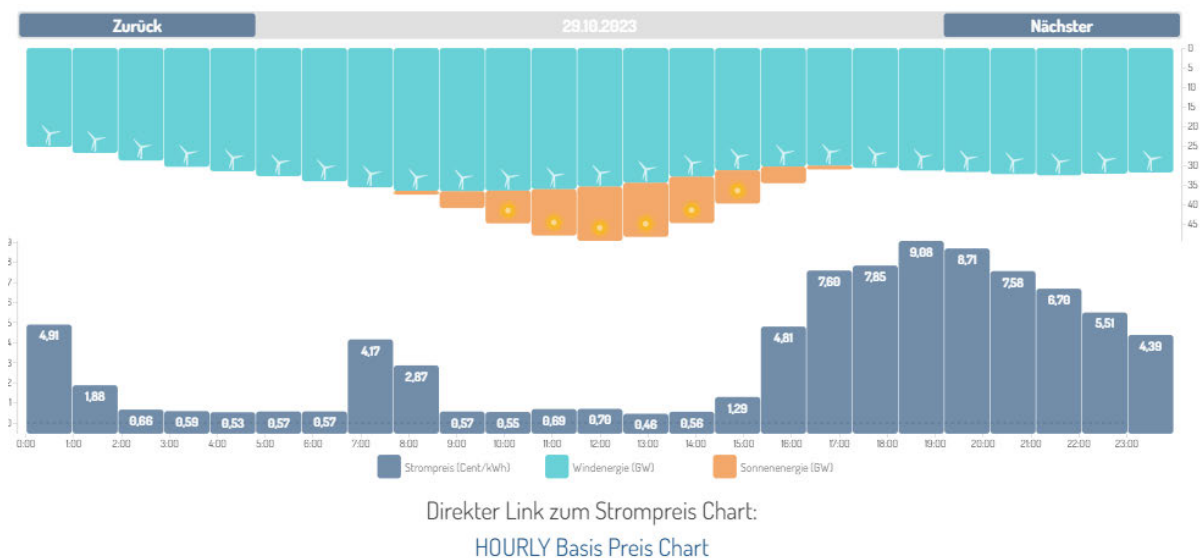


Abbildung 13: Screenshot mit Strompreis Chart des Tarifes „HOURLY“ von aWATTar (aWATTar GmbH, 2024)

Die Speicher stellen somit eine sinnvolle Ergänzung zur Photovoltaikanlage dar und sollten definitiv mitinstalliert werden, um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Eine sorgfältige Auswahl der Art des Speichers ist erforderlich.

Eine der bewährtesten Speichertypen sind die Bleisäure-Akkus. Dies sind im Wesentlichen die klassischen Auto-Starter-Akkus, die in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verwendet werden. Sie finden auch Anwendung als Traktions-Akkus in Flurförderfahrzeugen oder als stationäre Speicher für

Notstromanlagen. Ihre Vorteile liegen in der bewährten Technik, hoher Betriebssicherheit und niedrigen Investitionskosten. Die Nachteile sind die geringe Energiedichte, die nur zwischen 25 und 40 Wattstunden pro Kilogramm (Wh/kg) liegt, und der niedrige Wirkungsgrad von 74 bis 89 %.

Akkus auf Nickelbasis sind in den Varianten Nickel-Cadmium (Ni-Cd) und Nickel-Metallhydrid (Ni-MH) erhältlich. Ni-Cd-Akkus sind die ältere Variante und weisen eine etwas geringere Energiedichte auf, sind jedoch ansonsten technisch ähnlich wie Ni-MH-Akkus. Ein Vorteil dieser Akkutypen ist ihre hohe Zyklenfestigkeit von bis zu 2000 Lade-Entlade-Zyklen. Ein Nachteil ist der sogenannte Memory-Effekt, der auftritt, wenn ein nicht vollständig entladener Akku geladen wird, was zu einer verringerten Kapazität führt. Dieser Effekt kann durch mehrere vollständige Lade-Entlade-Zyklen behoben werden.

Die heute weit verbreitete Akkutechnologie basiert auf Lithium. Diese Technologie ist seit den 1970er-Jahren bekannt und wurde erstmals kommerziell von Sony in den 1990er-Jahren für die Stromversorgung einer Videokamera eingesetzt. Im Jahr 2019 wurde John Bannister Goodenough zusammen mit Michael Stanley Whittingham und Akira Yoshino für seine wissenschaftlichen Arbeiten zur Entwicklung von Lithium-Ionen-Akkus mit dem Nobelpreis in Chemie ausgezeichnet. Der große Vorteil dieser Akkus liegt in ihrer hohen gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte. Sie wurden zunächst in mobilen Consumer-Elektronikgeräten wie Laptops, Mobiltelefonen und Kameras eingesetzt, in denen Akkus mit Kapazitäten von einigen Hundert Milliamperestunden (mAh) verwendet wurden. Mit weiteren Materialentwicklungen wurden Lithium-Akkus mit höheren Kapazitäten entwickelt.

Diese Technologie fand auch Anwendung in der Elektromobilität, sei es in Pedelecs, E-Bikes, Hybridfahrzeugen oder batteriebetriebenen Elektroautos (Battery Electric Vehicles, BEV). Durch diese Entwicklungen und die Industrialisierung der Lithium-Akku-Produktion konnten die Herstellungskosten gesenkt werden, was den Einsatz als PV-Speicher wirtschaftlich interessant gemacht hat.

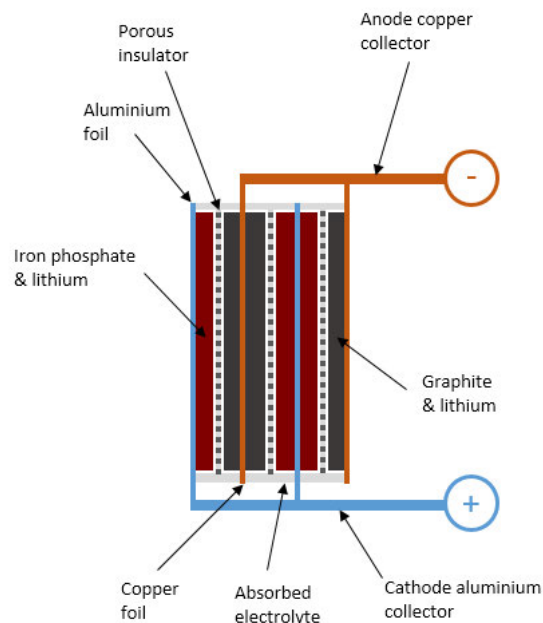


Abbildung 14: Innerer Aufbau einer LiFePo₄-Batteriezelle im teilgeladenen Zustand

(Nordkyn Design Ltd, 2021)

In stationären Anwendungen, wie bei PV-Speichern, ist der Lithium-Eisenphosphat (LiFePo₄) Akku derzeit aufgrund seiner technischen Vorzüge der am häufigsten eingesetzte Akkutyp. Seine Stärken liegen in seiner Robustheit und seiner außerordentlich hohen Zyklenfestigkeit, jedoch geht dies mit dem Nachteil eines höheren Gewichts einher.

negative Elektrode		LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₂ Spinell	LiNi _{0,8} CO _{0,15} Al _{0,05} O ₂	LiNi _{0,33} Mn _{0,33} Co _{0,33} O ₂	LiNiO ₂	LiFePO ₄	V ₂ O ₅	Li ₂ S ₈
Abkürzung		(LOO)	(LMO)	(NCA)	(NMC, MNC)	(LNO)	(LFP)		
Zellspannung gegen Graphit	V	3,7	3,8 - 4	3,8 - 4 (3,7)	3,7	3,2 - 4,2	3,3 - 3,5	3 (LiAl)	2,1
Potential vs, Li/Li*:	V	3,0 - 4,4 (3,9)	3,0-4,5	-	-	3,8	-	1,9 - 3,4	2,23
Kapazität je Elektrode	Ah kg ⁻¹	274	296	-	-	192	168	442	(S) 1675
- theoretisch	Ah L ⁻¹	706	634	-	-	919	-	495	-
- praktisch	Ah kg ⁻¹	≈ 140	≈ 120	≈ 190	≈ 160	≈ 170	130	-	1300
Spezifische Energie je Bauteil	Wh kg ⁻¹	90 - 180	160	140	< 180	hoch	80 - 120	< 125	≈ 150
Energiedichte	Wh L ⁻¹	220 - 350	270	-	-	-	-	-	< 400
Spezifische Leistung	W kg ⁻¹	gering: 760	hoch: 1800	hoch	mäßig	mäßig	hoch	-	-
Zyklusstabilität		1000	> 1000	gut	mäßig	mäßig	> 2400	> 100	-
Sicherheit		mäßig	gut	mäßig	mäßig	mäßig	sicher	-	-
Preis		hoch	gering	hoch	hoch	mäßig	mäßig	-	-
Material- lieferanten (Stand 2011)		Nichia, Umicore Korea, u.a.	JGC, Nippon Denko, Nichia, Shenz- hen Yuan Yuan, BYD	Sumi- tomo, Nihon Kagaku Sangyo, Toda Kogyo, Ecopro	Umicore Korea, Nichia, Sony, 3M, Pa- nasonic	-	ALEES, TA- TUNG, BYD, A123, For- mosa, Johnson Matthey, Sony	-	-
Hersteller (nach Produktions- menge 2011)		Sanyo, SDI, LG Chem, BAK, Pa- nasonic, Sony, Lishen, Maxell, ATL, BYD	LG Chem, Sanyo, Sony, Lishen, BYS, SDI, NEC, Maxell	Pana- sonic, Sony, SDI, Sanyo, SAFT	SDI, Sanyo, LGC, Sony, Lishen, Pana- sonic, Kokam, NEC	Saft, John- son Con- trol, Pana- sonic, Ameri- can Li- thium, Sams- ung SDI	BYD, A123, Lishen, Sony, SDI, LGC u.a.	-	-

Tabelle 1: Kathodenmaterialien (+) für Lithiumionen-Akku

(Kurzweil & Dietlmeier, 2018)

Technologie (heute)	Technik										Kosten		
	Energiedichte			Wirkungsgrad (%)	Selbstentladung	Lebensdauer		CAPEX	OPEXfix				
	Gravimetrisch	Volumetrisch	Zyklisch			Kalendarisch							
	Wh/kg	kWh/m ³	%	%/Tag	Zyklen	a	€/kWh	€/kW	€/kWh	€/kW			
Elektrische Energiespeicher													
Kondensatoren (DSK)	0,1 - 10	10	90 - 95	0,004 - 0,013	1 Mio.	10	5150	125	-	-	125	k.A.	
Spulen (SMES)	1	10	92	10 - 12	> 1 Mio.	30	13570	300	-	-	300	k.A.	
Elektrochemische Energiespeicher													
Niedertemperatur-Batterien													
Blei-Säure-Batterien	25 - 40	25 - 65	74 - 89	0,17	203 - 1315	10	90 - 355	200	-	-	200	0,16 - 0,76	
Nickel-Batterien	55 - 75	65 - 105	71	k.A.	350	k.A.	385	385	-	-	385	k.A.	
Lithium-Batterien	110 - 190	190 - 375	90 - 97	0,008 - 0,041	2000	15	1100	1100	-	-	1100	k.A.	
Hochtemperatur-Batterien													
Natrium-Batterien	100 - 165	155 - 255	72 - 81	k.A.	400	17	265	285	-	-	285	0,07 - 0,76	
Batterien mit externem Speicher													
Redox-Flow Batterien	15 - 50	20 - 60	71 - 83	0	1900	15	645	1075	-	-	1075	k.A.	

Tabelle 2: Bestimmung der Anwendungsfelder durch Speicherkapazität

(Sternner & Stadler, 2014)

2.3.1 Trends und Innovationen in der Energiespeicherung

Die Elektrifizierung findet in allen Bereichen Anwendung, wodurch Neu- und Weiterentwicklungen in der Akkutechnologie erforderlich sind. Zu diesem Zweck wurde die groß angelegte gesamteuropäische Forschungsinitiative BATTERY 2030+ ins Leben gerufen.

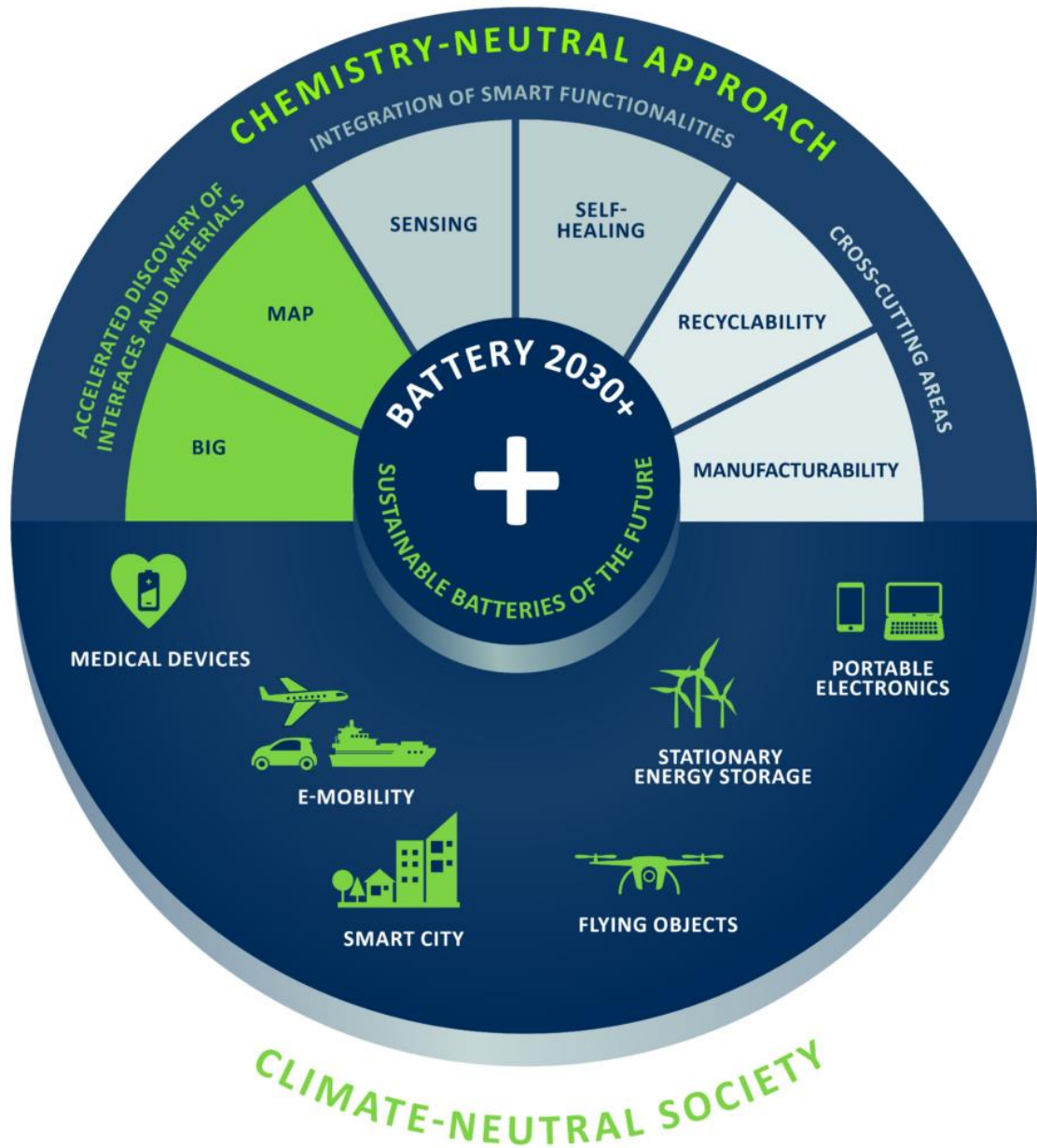


Abbildung 15: Themengebiete der Forschungsinitiative BATTERY 2030+

(BATTERY 2030+, 2024)

Diese Initiative stellt eine langfristige Roadmap zur Entwicklung nachhaltiger zukünftiger Batterietechnologien für eine klimaneutrale Gesellschaft dar. Sie gliedert sich in drei Hauptbereiche:

- Beschleunigte Entwicklung neuer Batteriematerialien.
- Integration von intelligenten Funktionen wie Sensorik und Selbstheilung.
- Entwicklung oder Verbesserung von Herstellungs- und Recyclingmethoden im Hinblick auf Klimaneutralität.

2.4 KNX-Gebäudeautomatisierung

Steuerungs- und Regelungsaufgaben in Gebäuden sind seit jeher erforderlich. Dies führte im letzten Jahrhundert zur Bildung verschiedener Standards und Verbände wie dem BatiBUS Club International (BCI), der European Installation Bus Association (EIBA) oder der European Home Systems Association (EHSA). Im Mai 1999 wurden diese drei eigenständigen Verbände zur neuen Vereinigung KNX Association cvba (KNX) fusioniert.



Abbildung 16: KNX-Logo

(KNX Association cvba, 2024)

2.4.1 Definition und Prinzipien der KNX-Technologie

Die KNX Association cvba hat ihren Sitz in Belgien und ist als gewinnorientiertes Unternehmen Eigentümer des weltweiten Standards für Heim- und Gebäudesystemtechnik KNX. Hardware- und Softwarelösungen, die nach dem KNX-Standard zertifiziert sind, können herstellerübergreifend miteinander vernetzt werden und decken sämtliche Bereiche der Heim- und Gebäudetechnik ab. Dies reicht von der Sensorik, die bei einfachen Busschaltern beginnt und über Bewegungsmelder bis hin zu Touchscreens reicht, bis zur Aktorik, die alle möglichen Geräte und Verbraucher schaltet und steuert. Es gibt auch eine Vielzahl von Softwarelösungen und Systemschnittstellen zu anderen Systemen wie dem Lichtsteuersystem DALI-Bus.

Der Vorteil des KNX-Systems liegt in seinem offenen Standard, der herstellerunabhängig ist. KNX-Geräte können daher von verschiedenen Herstellern in einer KNX-Installation kombiniert werden. Die Auswahl kann je nach Design der Bedienelemente, die für Endbenutzer zugänglich und wichtig sind, oder der Funktion der einzelnen Geräte, die sich je nach Hersteller geringfügig unterscheiden können, getroffen werden. KNX ist als internationaler Standard (ISO/IEC 14543-3), europäischer Standard (CENELEC EN 50090 und CEN EN 13321-1) sowie chinesischer Standard (GB/Z 20965) anerkannt. Produkte verschiedener Hersteller können kombiniert werden, wobei das KNX-Logo Interoperabilität und Vernetzbarkeit garantiert.

Derzeit sind weltweit 495 Hersteller aus 45 Ländern mit 8000 KNX-zertifizierten Produkten auf dem Markt vertreten. Es gibt 16 KNX-Testlabore weltweit, 21 assoziierte Partner, über 90.000 KNX-Partner in 190 Ländern, 156 KNX-Wissenschaftliche Partner in 36 Ländern und 495 KNX-Trainingszentren in 72 Ländern, sowie 21 KNX-Userclubs / Professionals in 19 Ländern und vieles mehr. KNX ist also weit verbreitet, sei es in der Zertifizierung, Schulung oder Anwendung.

2.4.2 Anwendungsbereiche und Vorteile der KNX-Technologie

KNX ist aus dem Zusammenschluss der drei Einzelverbände BCI, EIBA und EHS hervorgegangen und hat deren individuelle Anwendungsbereiche übernommen. Dadurch sind die Einsatzmöglichkeiten von KNX äußerst vielfältig, und es ermöglicht grundsätzlich die Umsetzung sämtlicher Steuerungs- und Regelungsaufgaben in der Gebäudeautomatisierung.



Abbildung 17: Anwendungsgebiete KNX

(Lömker, 2024)

Ein wesentlicher Vorteil besteht darin, dass all diese Aufgaben der Gebäudeautomatisierung mit einem einzigen System realisiert werden können. Dies ermöglicht die Vernetzung und Verknüpfung von ansonsten eigenständigen Steuerungen und Regelungen. Ein Beispiel hierfür ist der Wärmeschutz eines Raumes, bei dem die Temperatur durch einen Einzelraumregelungsthermostat erfasst wird und anschließend eine automatische Beschattung durch Jalousien erfolgt. Mit dieser Funktion kann die Raumtemperatur, insbesondere in Übergangszeiten, in einem angenehmen Temperaturbereich gehalten werden, ohne dass die Klimaanlage eingreifen muss. Die Produktvielfalt und -verfügbarkeit sind nicht von einem einzigen Hersteller abhängig, sondern es herrscht gesunder Wettbewerb zwischen verschiedenen Anbietern. Dies hat positive Auswirkungen auf die Anzahl der verfügbaren Geräte und deren Verfügbarkeit. Die zahlreichen Testlabore und der KNX-Gerätezertifizierungsstandard gewährleisten eine gute Interoperabilität zwischen den Geräten und Softwarelösungen.

2.4.3 Aufbau und Komponenten eines KNX-Systems

Der Feldbus KNX ist dezentral aufgebaut und gliedert sich in mehrere hierarchisch aufeinander aufbauenden Untergliederungen. Die Dezentralität ist einer der wichtigsten Vorteile von KNX, da bei einem Ausfall eines einzelnen Geräts die übrigen Geräte weiterhin funktionieren.

KNX kann auf vier verschiedenen Medien vernetzt werden, und mithilfe von Gateways können diese vier unterschiedlichen Kommunikationsmedien in einer Installation gemischt werden. Das klassische Medium ist Twisted Pair (TP1), bei dem die Vernetzung über die grüne KNX-Leitung erfolgt, die zwei verdrehte 0,8 mm starke, geschirmte Aderpaare enthält. Diese Leitung kann gemeinsam mit 230V-Leitungen in einem gemeinsamen Rohr verlegt werden. Die zweite Möglichkeit ist Powerline (PL), bei der das Nutzsignal auf die vorhandene 230V-Versorgungsleitung aufmoduliert wird. Diese Variante wird heute aufgrund fehlender Geräte kaum noch eingesetzt.

Die dritte Möglichkeit ist die Vernetzung über KNX IP, wobei strukturierte Netzwerkverkabelung verwendet wird. Dies ist in modernen Gebäuden weit verbreitet, jedoch nicht für die Vernetzung einzelner KNX-Geräte, sondern eher für den Backbone-Bereich und Anbindungen nach außen, wie Fernwartungen. Das letzte Medium ist KNX-RF, bei dem die Vernetzung mittels Funktechnologie realisiert wird und Powerline abgelöst hat. Dies wird häufig in Renovierungsprojekten und Installationen ohne Verkabelung eingesetzt.

Die klassische Verkabelung über TP1 ist in vier Ebenen unterteilt. In der untersten Ebene, auch Segment genannt, konnten bis Ende 2018 insgesamt 64 KNX-Geräte (TP1-64) verbunden werden, und seit 2019 können bis zu 256 KNX-Geräte (TP1-256) in einem Segment zusammengefasst werden. In der Ebene darüber spricht man von einer Linie, in der bis Ende 2018 nur 250 Geräte in einer Linie verbunden werden konnten, da sechs Koppler verwendet wurden. Seit 2019 besteht eine Linie aus einem Segment mit 256 Geräten, ohne die Notwendigkeit von Kopplern.

In der dritten Ebene werden die Linien miteinander vernetzt, und dies wird als Bereich bezeichnet. Die Kapazität eines Bereichs liegt bei der Verwendung von TP1-256-Geräten bei 4066 KNX-Geräten. Die letzte und oberste Ebene ist das Netzwerk, das bei Verwendung der neuen TP1-256-Geräte bis zu 65026 Geräte in einer Installation zusammenfassen kann.

3 Bedarfsermittlung und Standortanalyse

3.1 Bestimmung des elektrischen Energiebedarfs

In dieser Arbeit wird beispielhaft ein Wohnhaus in Österreich mit drei Generationen herangezogen. Das Wohnhaus ist in zwei separate Wohnbereiche unterteilt. Der erste, kleinere Wohnbereich befindet sich im östlichen Erdgeschoss und wird von einer Person der ersten Generation bewohnt. Die größere Wohneinheit erstreckt sich über den westlichen Teil des Erdgeschosses und das Obergeschoss des Wohnhauses. Diese wird von drei Personen der zweiten und dritten Generation genutzt und besteht aus zwei Wohneinheiten. Es ist zu beachten, dass das Bad und das WC in einfacher Ausstattung vorhanden sind. Der Standort des Wohnhauses liegt im südlichen Grazer Becken im Bundesland Steiermark.

Der Energiebedarf von Gebäuden hängt stark von der Nutzung und der elektrischen Ausstattung ab. Daher ist eine pauschale Abschätzung des Energiebedarfs anhand von Faktoren wie der Wohnfläche oder der Anzahl der Personen nicht sinnvoll.

3.1.1 Berechnung des elektrischen Energiebedarfs des 3-Generationen-Wohnhauses

Für eine grobe Abschätzung hat der deutsche Verein „Bund der Energieverbraucher“ eine Formel entwickelt, die lediglich die Wohnfläche in Quadratmetern (m²), die Anzahl der Personen und die Anzahl der Geräte berücksichtigt. Um einen realistischen Vergleich durchzuführen, wird diese Formel im Vergleich zur letzten Jahresstromabrechnung für das ausgewählte Wohnhaus verwendet.

Die Jahresverbrauchsformel des deutschen Vereins „Bund der Energieverbraucher e.V.“ lautet wie folgt: „Jährlicher Stromverbrauch = Wohnfläche (qm) x 9 kWh + Personenzahl x 200 kWh (bei elektrischer Warmwasserbereitung, anstelle von 200: 550 kWh) + Anzahl der Geräte x 200 kWh (Waschmaschine, Trockner, Kühlschrank, Gefriertruhe, Geschirrspüler, Elektroherd, Mikrowelle, elektrisches Heizgerät, Fernseher, Computer)“ (Peters, 2004).

Der erste Schritt besteht darin, die Wohnfläche mithilfe des Bestandsplans zu ermitteln. Das ausgewählte Wohnhaus besteht aus einem Keller, dem Erdgeschoss und dem Obergeschoss. Der Keller wird nicht als Wohnfläche genutzt und wird daher in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.



Abbildung 18: Grundrissplan 3-Generationen-Wohnhaus, südliches Grazer-Becken

Quelle: Eigene Darstellung

Raum	Fläche	EH
Essküche EG	30,60	m ²
Vorraum EG West	13,88	m ²
Stiege EG/OG	3,19	m ²
Wohnzimmer EG West	24,59	m ²
Schlafzimmer EG Ost	14,20	m ²
Wohnzimmer EG Ost	12,77	m ²
Vorraum EG Ost	11,68	m ²
Bad EG	7,60	m ²
Speis	5,94	m ²
EG	124,45	m²
Schlafzimmer OG Nord	21,42	m ²
Bad OG	6,49	m ²
WC OG	2,65	m ²
Galerie	17,99	m ²
Essküche OG	15,52	m ²
Schlafzimmer OG Süd	19,94	m ²
OG	84,01	m²
Gesamt	208,46	m²

Tabelle 3: Wohnflächen-Aufstellung 3-Generationen-Wohnhaus

Quelle: Eigene Darstellung

Im nächsten Schritt werden die elektrischen Geräte, die im Wohnhaus genutzt werden, aufgelistet:

Gerät	Menge	EH
Waschmaschine	2	Stück
Kühlschrank	3	Stück
Gefriertruhe	1	Stück
Geschirrspüler	2	Stück
Elektroherd	2	Stück
Backofen	1	Stück
Mikrowelle	3	Stück
Fernseher	3	Stück
Computer	2	Stück
SAT-Receiver	2	Stück
KNX-Homeserver	1	Stück
KNX-Geräte	1	Pauschale
Router	1	Stück
Radio	2	Stück
Gesamt	26	Stück

Tabelle 4: Geräte-Aufstellung 3-Generationen-Wohnhaus

Quelle: Eigene Darstellung

Die ganzen Einzelwerte in die Formel eingesetzt ergeben:

Formel:
Jährlicher Stromverbrauch = Wohnfläche (qm) x 9 kWh + Personenzahl x 200 kWh (wenn Warmwasser elektrisch, statt 200: 550 kWh) + Gerätezahl x 200 kWh (Waschmaschine, Trockner, Kühlschrank, Gefriertruhe, Geschirrspüler, Elektroherd, Mikrowelle, elektrisches Heizgerät, Fernseher, Computer)

Beschreibung	Menge	EH		Menge	EH	Beschreibung	Auswahl	Einzelwert	EH
Wohnfläche:	208,46	m ²	x	9	kWh			1876,14	kWh
Personenzahl:	4	Personen	x	200	kWh	Warmwasser elektrisch:	Nein	800,00	kWh
Gerätezahl:	26	St	x	200	kWh			5200,00	kWh
Jahresverbrauch								7876,14	kWh

Tabelle 5: Jahresverbrauchsberechnung 3-Generationen-Wohnhaus (Peters, 2004)

Die letzte Jahresstromabrechnung des Wohnhauses weist einen Gesamtverbrauch von 7866 kWh aus, was dem errechneten Wert sehr nahekommt und somit die Eignung der Formel bestätigt.

Abrechnungsdatum: 31.03.2022 Kundennummer: Rechnungsnummer:

Zähler-Nr.	Zählpunkt	Netzebene	Lastprofil	Vereinbartes Ausmaß der Netznutzung	Lieferant
		7	Haushalt	11,00 kW	

Ablesedaten

Zähler-Nr.	Zeitraum	Skala	Zählerstand alt	Zählerstand neu	Ablesart	Konstante	Verbrauch
	30.03.2021 - 30.03.2022	ET	146.305,00	154.171,00	N	1	7.866,00 kWh

N-Verbrauchsermittlung durch Netzbetreiber

Energiekosten

Bezeichnung	Zeitraum	Monate	Menge	Preis	Betrag EUR	UStL
AT008570086720000000000000000002215						
Universaltarif H Energie bis 15000 kWh	30.03.21-30.03.22		7.866,00 kWh	6,5000 Cent/kWh	511,29	20%
Grundpreis	30.03.21-30.03.22		12,03 (Monatlie)	4,8000 EUR/Monat	58,34	20%
Finanzierungsbeitrag gem.§10 Öko	30.03.21-31.12.21		5,656,29 kWh	0,0149 Cent/kWh	0,84	20%
Finanzierungsbeitrag gem.§10 Öko	01.01.22-30.03.22		2,209,71 kWh	0,0187 Cent/kWh	0,41	20%
Summe Energiekosten:					567,88	EUR

Netzdienstleistungen

Bezeichnung	Zeitraum	Monate	Menge	Preis	Betrag EUR	UStL
Netznutzungsentgelt	30.03.21-31.12.21		5,656,29 kWh	5,1300 Cent/kWh	290,17	20%
Netznutzungsentgelt	01.01.22-30.03.22		2,209,71 kWh	5,6600 Cent/kWh	125,07	20%
Grundpreis Netznutzung	30.03.21-31.12.21		9,06 (Monatlie)	3,0000 EUR/Monat	27,18	20%
Grundpreis Netznutzung	01.01.22-30.03.22		2,97 (Monatlie)	3,0000 EUR/Monat	8,91	20%
Netznutzungsentgelt	30.03.21-31.12.21		5,656,29 kWh	0,2790 Cent/kWh	15,78	20%
Netznutzungsentgelt	01.01.22-30.03.22		2,209,71 kWh	0,3690 Cent/kWh	8,15	20%
Entgelt für Messleistungen	30.03.21-30.03.22		12,03 (Monatlie)	2,4000 EUR/Monat	28,87	20%
Summe Netzdienstleistungen:					504,13	EUR

Steuern und Abgaben

Bezeichnung	Zeitraum	Monate	Menge	Preis	Betrag EUR	UStL
Energieabgabe	30.03.21-30.03.22		7.866,00 kWh	1,5000 Cent/kWh	117,99	20%
Ökostromförderbeitrag Leistung	30.03.21-31.07.21		4,06 (Monatlie)	0,8960 EUR/Monat	3,64	20%
Ökostromförderbeitrag Netznutzung	30.03.21-31.07.21		2,413,16 kWh	1,2140 Cent/kWh	29,30	20%
Ökostromförderbeitrag Netzverlust	30.03.21-31.07.21		2,413,16 kWh	0,0840 Cent/kWh	2,03	20%
EAG Förderbeitrag Leistung	01.08.21-31.12.21		5,00 (Monatlie)	0,8960 EUR/Monat	4,48	20%
EAG Förderbeitrag Netznutzung	01.08.21-31.12.21		3,243,13 kWh	1,2140 Cent/kWh	39,37	20%
EAG Förderbeitrag Netzverlust	01.08.21-31.12.21		3,243,13 kWh	0,0840 Cent/kWh	2,72	20%
Ökostrompauschale	30.03.21-31.07.21		4,06 (Monatlie)	2,9975 EUR/Monat	12,17	20%
EAG Pauschale	01.08.21-31.12.21		5,00 (Monatlie)	2,9975 EUR/Monat	14,99	20%
Biomasseförderungsgesetz Leistung	30.03.21-31.12.21		9,06 (Monatlie)	0,0368 EUR/Monat	0,33	20%
Biomasseförderungsgesetz Netznutzung	30.03.21-31.12.21		5,656,29 kWh	0,0621 Cent/kWh	3,51	20%
Biomasseförderungsgesetz Netzverlust	30.03.21-31.12.21		5,656,29 kWh	0,0041 Cent/kWh	0,23	20%
Summe Steuern und Abgaben:					230,76	EUR

Aufgrund von Rundungsdifferenzen kann die Gesamtmenge von der Summe der Einzelpositionen geringfügig abweichen.

Rechnungsbetrag Netto	1.302,77	EUR
Umsatzsteuer 20,00%	260,55	EUR
Rechnungsbetrag Brutto	1.563,32	EUR
Geleistete Zahlungen	1.584,00	EUR
Guthaben	20,68	EUR

Abbildung 19: Jahresstromabrechnung;

Quelle: Eigene Darstellung

3.1.2 Analyse des Verbrauchsprofils und der Lastspitzen

Aufgrund fehlender Opt-in Smartmeter-Auswahl beim VNB kann für den ausgewählten 3-Generationen-Haushalt kein tatsächliches Verbrauchsprofil zur Analyse herangezogen werden. Daher wird in diesem Fall auf die standardisierten Lastprofile zurückgegriffen, die von der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus (BTU) und dem Verband der Elektrizitätswirtschaft (VDEW) entwickelt wurden (Schellong, 2016).

Da das Verbrauchsverhalten je nach Nutzung der elektrischen Anlage variiert, wurden die sogenannten Standardlastprofile entsprechend der Nutzung gruppiert. In unserem Fall verwenden wir das Standardlastprofil für den Privatverbrauch, den Profiltyp H0.

Profiltyp	Verbrauchergruppe
H0	Haushalt (Privatverbrauch)
G0	Gewerbe allgemein (Mittelwert der gesamten Gewerbegruppe)
G1	Gewerbe werktags 08:00-18:00 Uhr (Büros, Werkstätten, Verwaltung)
G2	Gewerbe mit überwiegendem Verbrauch in den Abendstunden
G3	Gewerbe durchlaufend (Kühlhäuser, Pumpen, Belüftung)
G4	Gewerbe: Läden aller Art, Friseur
G5	Gewerbe: Bäckerei mit Backstube
G6	Gewerbe mit Wochenendbetrieb (Gaststätten, Ausflugslokale, Sporteinrichtungen)
L0	Landwirtschaftsbetriebe allgemein (Mittelwert der Gesamtgruppe)
L1	Landwirtschaftsbetriebe mit Milchwirtschaft/Nebenerwerbs-Tierzucht
L2	Übrige Landwirtschaftsbetriebe

Tabelle 6: Auflistung der Standardlastprofile

(Schellong, 2016)

Jedes dieser Standardlastprofile ist in Winter-, Sommer- und Übergangszeiten unterteilt, wobei viertelstündlich die Momentanleistungen aufgeführt sind. In der folgenden Tabelle sind einige Zeitbereiche beispielhaft dargestellt, die sowohl die Schwachlastzeiten in den Nachtstunden als auch die Hochlastzeiten mittags und abends zeigen.

Last- auf- tei- lung [kW]	Winter (01.11.-20.03.)			Sommer (15.05.-14.09.)			Übergangszeit (21.03.-14.05. und 15.09.-31.10.)		
	Samst.	Sonnt.	Werk.	Samst.	Sonnt.	Werk.	Samst.	Sonnt.	Werk.
Uhr- zeit									
0:15	0,0708	0,0875	0,0676	0,0898	0,1001	0,0863	0,0802	0,0934	0,0778
0:30	0,0682	0,0811	0,0608	0,0849	0,0925	0,0769	0,0751	0,0868	0,0696
0:45	0,0659	0,0750	0,0549	0,0807	0,0859	0,0688	0,0707	0,0812	0,0624
1:00	0,0633	0,0691	0,0499	0,0766	0,0799	0,0624	0,0666	0,0757	0,0566
1:15	0,0595	0,0634	0,0462	0,0717	0,0741	0,0580	0,0623	0,0701	0,0525
1:30	0,0550	0,0582	0,0436	0,0666	0,0687	0,0553	0,0580	0,0645	0,0497
1:45	0,0505	0,0536	0,0419	0,0616	0,0639	0,0536	0,0541	0,0593	0,0479
2:00	0,0466	0,0499	0,0408	0,0574	0,0599	0,0524	0,0508	0,0549	0,0466
2:15	0,0439	0,0473	0,0401	0,0545	0,0570	0,0513	0,0484	0,0517	0,0455
2:30	0,0423	0,0455	0,0396	0,0526	0,0550	0,0503	0,0468	0,0494	0,0445
2:45	0,0414	0,0442	0,0394	0,0514	0,0535	0,0492	0,0457	0,0478	0,0438
3:00	0,0408	0,0433	0,0391	0,0508	0,0524	0,0483	0,0449	0,0466	0,0433
...
11:15	0,1515	0,1933	0,1161	0,1671	0,1983	0,1386	0,1692	0,1970	0,1306
11:30	0,1535	0,2006	0,1170	0,1694	0,2037	0,1401	0,1708	0,2030	0,1315
11:45	0,1560	0,2066	0,1187	0,1724	0,2087	0,1426	0,1725	0,2085	0,1336
12:00	0,1590	0,2106	0,1215	0,1756	0,2122	0,1465	0,1748	0,2122	0,1373
12:15	0,1624	0,2118	0,1254	0,1790	0,2137	0,1515	0,1777	0,2135	0,1426
12:30	0,1658	0,2102	0,1296	0,1819	0,2128	0,1567	0,1808	0,2118	0,1482
12:45	0,1684	0,2059	0,1330	0,1837	0,2090	0,1607	0,1831	0,2070	0,1528
13:00	0,1698	0,1989	0,1348	0,1839	0,2023	0,1623	0,1839	0,1989	0,1548
13:15	0,1694	0,1896	0,1342	0,1821	0,1924	0,1605	0,1827	0,1876	0,1532
13:30	0,1676	0,1787	0,1317	0,1787	0,1809	0,1561	0,1798	0,1746	0,1489
13:45	0,1648	0,1673	0,1280	0,1741	0,1692	0,1502	0,1758	0,1617	0,1432
...
18:15	0,2052	0,1468	0,1524	0,1588	0,1183	0,1332	0,1737	0,1260	0,1324
18:30	0,2091	0,1535	0,1622	0,1640	0,1234	0,1389	0,1804	0,1337	0,1406
18:45	0,2111	0,1597	0,1712	0,1692	0,1292	0,1451	0,1867	0,1415	0,1491
19:00	0,2122	0,1656	0,1789	0,1740	0,1357	0,1515	0,1923	0,1490	0,1573
19:15	0,2132	0,1715	0,1847	0,1778	0,1428	0,1579	0,1965	0,1555	0,1649
19:30	0,2130	0,1764	0,1882	0,1805	0,1498	0,1638	0,1990	0,1606	0,1711
19:45	0,2104	0,1791	0,1889	0,1818	0,1557	0,1683	0,1994	0,1636	0,1752
20:00	0,2039	0,1781	0,1864	0,1814	0,1598	0,1706	0,1973	0,1640	0,1765

Tabelle 7: Ausschnitt aus dem Standardlastprofil H0

(Schellong, 2016)

Im folgenden Graphen ist eine übersichtliche Struktur dargestellt.

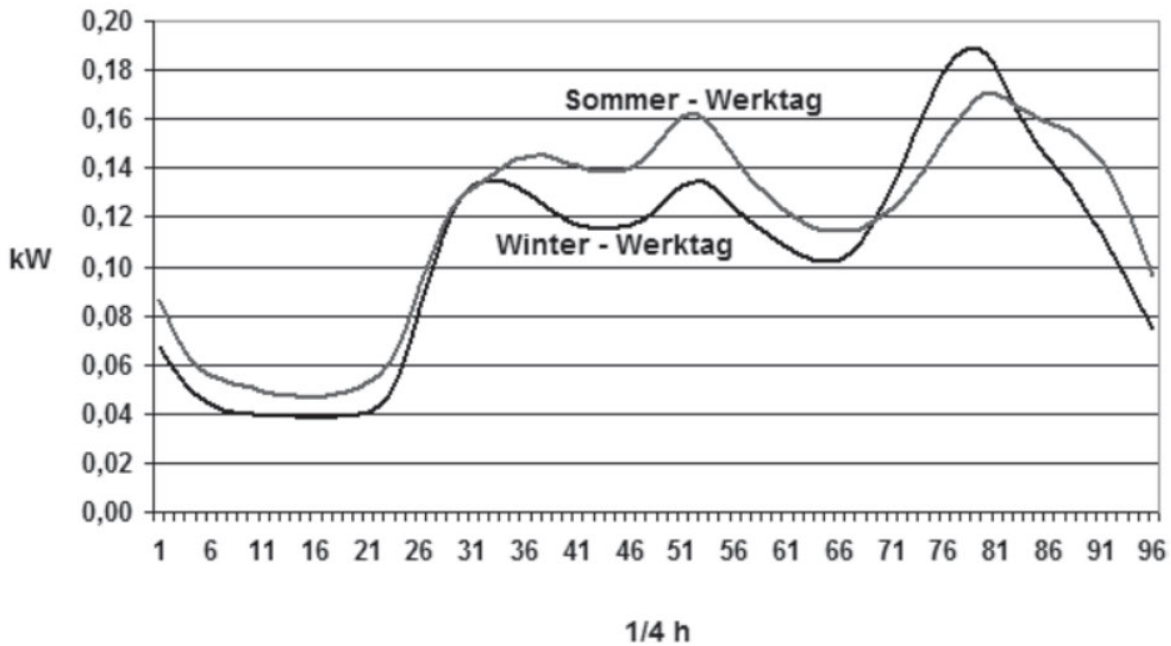


Abbildung 20: Grafik zum H0-Lastprofil für Sommer und Winter

(Schellong, 2016)

Wenn wir die Winter-Werktags-Kurve betrachten, erkennen wir deutlich den Leistungsabfall in den Nachtstunden auf etwa 40 Watt. Die Lastkurve steigt dann schnell an, erreicht in den Vormittags- und Nachmittagsstunden einen Höhepunkt und steigt abends auf bis zu 190 Watt an.

Laut Tabelle 7 auf der vorherigen Seite sind die höchsten Viertelstundenlastwerte sonntags mittags mit einem gerundeten Wert von bis zu 211 Watt zu erwarten. Dabei ist zu beachten, dass es zu kurzfristigen Lastspitzen im Minutenbereich kommen kann. Dies tritt insbesondere bei der Verwendung von Waschmaschinen oder Geschirrspülern auf, wenn das Waschwasser im ersten Programm elektrisch aufgeheizt wird. Im Aufheizbetrieb kann eine Leistung von bis zu 3000 Watt benötigt werden.

Für die geplante Photovoltaikanlage bedeutet dies, dass selbst bei einer kleinen Anlagenleistung von nur 3 kWp, unter optimalen Bedingungen, solche Lastspitzen abgedeckt werden können.

Der Betrieb eines einzelnen Großgeräts ist nicht das Hauptthema für die Eigenverbrauchsabdeckung mit der Photovoltaikanlage. Jedoch kann der gemeinsame Betrieb mehrerer Großgeräte die Eigenverbrauchsquote senken. In solchen Fällen ist es wichtig, durch Load-Shifting einzugreifen und die Lasten, die flexibel verschoben werden können, in die Schwachlastzeiten zu verlagern, in denen noch Leistung von der Photovoltaikanlage erwartet wird. Die meisten dieser Großgeräte verfügen bereits über Zeitschaltuhren, um ihren Betrieb in solche Zeitfenster zu verschieben.

3.1.3 Zukünftige Energiebedarfsprognosen

Die zuvor ermittelten Verbräuche und Lastprofile berücksichtigen derzeit ausschließlich das Wohnhaus mit der standardmäßigen elektrischen Ausstattung. Es sei darauf hingewiesen, dass bisher keine Lademöglichkeit in Form einer Elektroladestation für zwei batterieelektrische Fahrzeuge (BEVs) oder die Gesamtleistung, die für solche Ladestationen erforderlich ist, berücksichtigt wurde.

Des Weiteren ist die Möglichkeit einer Umstellung der derzeit installierten Gastherme auf eine Wärmepumpe zur Beheizung des Wohnhauses und zur Warmwasserbereitung in Betracht gezogen worden. Diese beiden zusätzlichen elektrischen Großverbraucher gehen mit einem erheblichen elektrischen Gesamtleistungsbedarf einher und erfordern eine intelligente Steuerung des Energieverbrauchs, insbesondere im Hinblick auf die Eigenverbrauchsquote.

Im ersten Schritt erfolgt die Betrachtung des Jahresenergiebedarfs und der aktuellen Momentanleistungen der Elektroladestationen für die BEVs. Zur Ermittlung des Jahresenergiebedarfs der BEVs dient als Grundlage die bisherige jährliche Fahrleistung der jeweiligen Fahrzeuge. Das Hauptfahrzeug legt durchschnittlich 15840 km/a zurück, während das Zweitfahrzeug eine Jahresleistung von 2290 km/a aufweist. Insgesamt ergibt sich somit eine jährliche Fahrleistung von 18130 km/a.

Für die Berechnung des Energiebedarfs des Haupt-BEV wird der Volkswagen ID.7 Pro als Referenzfahrzeug herangezogen, unter Berücksichtigung der tatsächlichen Verbrauchsdaten, wie sie auf der Website www.ev-database.org verfügbar sind.

The screenshot displays the Volkswagen ID.7 Pro with the following technical data:

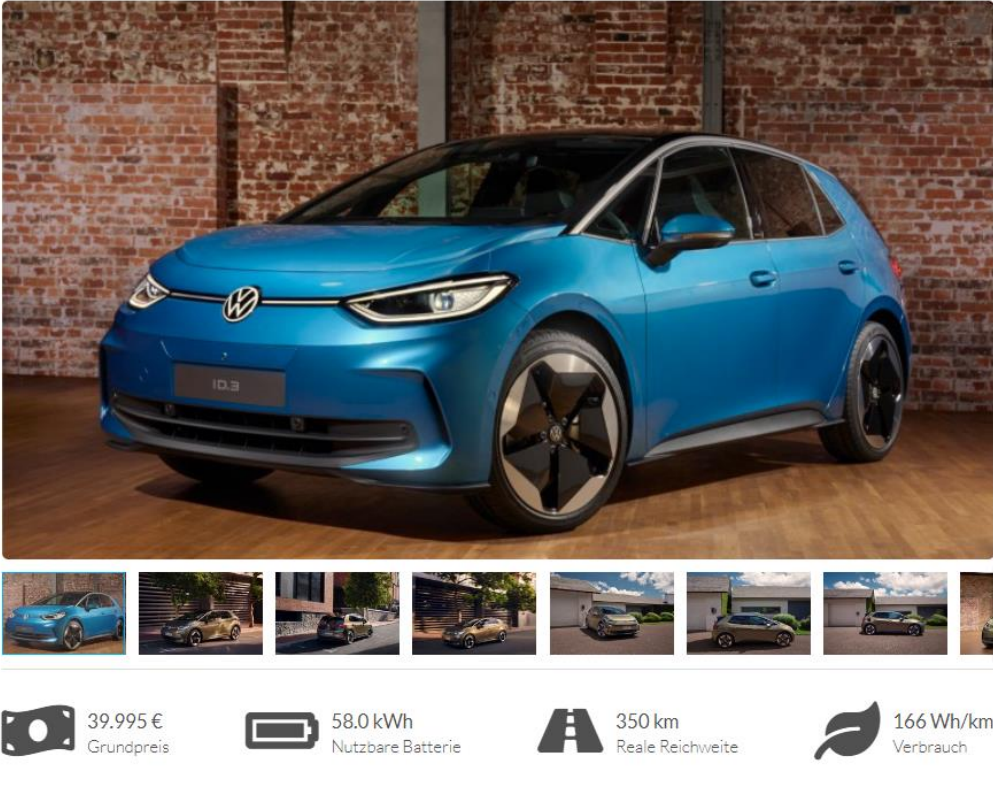
Icon	Value	Unit / Description
Price tag	56.995 €	Grundpreis
Battery icon	77.0 kWh	Nutzbare Batterie
Speedometer icon	475 km*	Reale Reichweite
Leaf icon	162 Wh/km*	Verbrauch

Abbildung 21: Screenshot mit technischen Daten des VW ID.7 Pro

(EV Database (9-Five-9 Ventures BV), 2024)

As Zweitauto wird das kleinste BEV von Volkswagen, der ID.3 Pro, zur Berechnung ausgewählt.

Volkswagen ID.3 Pro
Bestellbar seit März 2023



The screenshot displays the Volkswagen ID.3 Pro in a blue color. Below the main image is a row of smaller images showing the car in different colors and settings. At the bottom, four technical specifications are listed with icons:

- 39.995 € Grundpreis** (Basic price)
- 58.0 kWh Nutzbare Batterie** (Usable battery)
- 350 km Reale Reichweite** (Real range)
- 166 Wh/km Verbrauch** (Consumption)

Abbildung 22: Screenshot mit technischen Daten des VW ID.3 Pro

(EV Database (9-Five-9 Ventures BV), 2024)

Mit diesen Verbrauchswerten und den entsprechenden durchschnittlichen Kilometerleistungen jedes Fahrzeugs lässt sich ein prognostizierter durchschnittlicher Jahresenergiebedarf für die Elektromobilität von etwa 2.946 Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a) ermitteln.

BEV	Verbrauch	EH	Jahreskilometerleistung	EH	Jahresenergiebedarf	EH
Volkswagen ID.7 Pro	162	Wh/km	15840	km/a	2566,08	kWh/a
Volkswagen ID.3 Pro	166	Wh/km	2290	km/a	380,14	kWh/a
Gesamt Jahresenergiebedarf Elektromobilität					2946,22	kWh/a

Legende: Wattstunden pro Kilometer (Wh/km), Kilometer pro Jahr (km/a), Kilowattstunden pro Jahr (kWh/a)

Tabelle 8: Jahresverbrauchsaufstellung Elektroautos

Quelle: Eigene Darstellung

Abschließend ist noch die Einschätzung des zusätzlichen elektrischen Jahresenergiebedarfs für die Wärmepumpe erforderlich. Das Wohnhaus weist eine Heizlast von 20 Kilowatt (kW) auf, und für diese Berechnung verwenden wir die Luft-Wasser-Wärmepumpe des Typs AERO ALM 10-24 von iDM-Energiesysteme.

Produktdatenblatt

nach EU-Verordnung Nr. 811/2013

(Rev.1, gültig ab 29.11.2021)



1. Raumheizungs-Wärmepumpe

Name des Lieferanten				iDM Energiesysteme	
Modellkennung des Lieferanten				AERO ALM 10-24	
Wärmequelle				Umgebungsluft	
Parameter	Symbol	Einheit	Klimazone	35 °C	55 °C
Klasse für Raumheizungs-Energieeffizienz	-	-	kalt	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺
			mittel	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺⁺
			warm	A ⁺⁺⁺	A ⁺⁺⁺
Raumheizungs-Energieeffizienz	η_s	%	kalt	191	141
			mittel	225	165
			warm	286	207
Seasonal Coefficient of Performance	SCOP	-	kalt	4,86	3,60
			mittel	5,69	4,21
			warm	7,22	5,25
Wärmenennleistung	P_{rated}	kW	kalt	21	20
			mittel	21	19
			warm	24	23
jährlicher Endenergieverbrauch	Q_{HE}	kWh	kalt	10.394	13.683
			mittel	7.514	9.489
			warm	4.442	5.852
Schallleistungspegel	L_{WA}	dB(A)	Innenraum	-	-
			im Freien	56	56
Besondere Vorkehrungen, die bei der Montage, der Installation oder Wartung des Gerätes getroffen werden müssen:				siehe Montageanleitung	

2. Raumheizungs-Wärmepumpe und Temperaturregler

Name des Lieferanten		iDM Energiesysteme
Modellkennung des Lieferanten		NAVIGATOR 2.0
Klasse des Temperaturreglers		VI
Beitrag des Temperaturreglers zur jahreszeit-bedingten Raumheizungs-Energieeffizienz [%]		4
Raumheizungs-Energieeffizienz [%]		172
Klasse für Raumheizungs-Energieeffizienz		A ⁺⁺⁺

IDM-Energiesysteme GmbH
 A-9971 Matrei i.O., Seblas 16 – 18, Telefon +43 (0)4875 6172-0
 Firmenbuch.Nr. 44919h, LG Innsbruck, Firmensitz: 9971 Matrei i.O., UID-Nr.: ATU 433 604 02

Abbildung 23: Produktdatenblatt Luft-Wasser Wärmepumpe iDM AERO ALM 10-24

(iDM Energiesysteme GmbH, 2021)

Gemäß den Angaben im Datenblatt erreicht diese Wärmepumpe einen Seasonal Coefficient of Performance (SCOP) Wert von 5,69 bei einer Vorlauftemperatur von 35 Grad Celsius (°C) und in einer mittleren Klimazone.

Der aktuelle jährliche Gasverbrauch beträgt 44.000 Kilowattstunden (kWh). Um den aktuellen Heizenergiebedarf zu reduzieren, werden Maßnahmen zur Wärmedämmung am Wohngebäude durchgeführt, einschließlich eines Wärmedämm-Verbund-Systems (WDVS) und der Dämmung der Kellerdecke. Diese Dämmmaßnahmen führen zu einer Einsparung von 50 % bei der Heizenergie.

Beschreibung	Wert	EH
Aktueller Jahresgasverbrauch	44000	kWh
Einsparung durch WDVS und Kellerdeckendämmung	50	%
Heizenergiebedarf nach Anbringung WDVS	22000	kWh
SCOP-Wert der Wärmepumpe	5,69	
elektrischer Energiebedarf für die Heizung	3866	kWh

Tabelle 9: Jahresenergiebedarf Wärmepumpe

Quelle: Eigene Darstellung

Nach der Umstellung auf die Luft-Wasser-Wärmepumpe wird für die Heizung zusätzlicher elektrischer Energiebedarf von etwa 3.866 kWh pro Jahr benötigt.

Insgesamt wird somit für die zukünftigen elektrischen Verbraucher, nämlich die Elektromobilität mit etwa 2.946 kWh und die Heizung mit rund 3.866 kWh, ein prognostizierter Jahresenergiebedarf von 6.812 kWh erwartet.

Zusammengefasst ergibt sich mit dem bereits bestehenden elektrischen Jahresenergieverbrauch von 7866 kWh eine Gesamtsumme von 14678 kWh, also rund 14,68 MWh, die zukünftig abgedeckt werden sollten.

3.2 Standortbedingungen und ihre Auswirkungen

Der Standort und die Ausrichtung einer Photovoltaikanlage haben einen erheblichen Einfluss auf ihre jährliche Ernteertragsleistung. Eine optimale Anordnung bezüglich Azimut und Elevation sowie ein Standort, der minimale oder keine Verschattung aufweist, sind essenziell, um die elektrische Energieausbeute einer Photovoltaikanlage zu maximieren.

3.2.1 Einfluss der geografischen Lage und Dachausrichtung

Die Stärke der Sonneneinstrahlung ist variabel und hängt vom Einfallswinkel ab, der sich je nach geografischer Position und Höhe über dem Meeresspiegel auf der Erdoberfläche unterscheidet. Der höchste jährliche Sonneneinstrahlungswert wird global betrachtet in Regionen erreicht, die durch ihre höhere Lage, eine hohe Anzahl von Sonnentagen und geringe Abweichungen vom normalen Einfallswinkel der Sonne gekennzeichnet sind.

Land	Momentanwert	Gesamtwert	Möglicher Ertrag
Kenia	277,9 W/m ²	2434 kWh/m ² *a	2080 kWh/kWp
Brasilien	228,1 W/m ²	1998 kWh/m ² *a	1708 kWh/kWp
Indien	222,7 W/m ²	1951 kWh/m ² *a	1668 kWh/kWp
USA	200,1 W/m ²	1753 kWh/m ² *a	1498 kWh/kWp
Türkei	192,7 W/m ²	1688 kWh/m ² *a	1443 kWh/kWp
Spanien	188,2 W/m ²	1649 kWh/m ² *a	1409 kWh/kWp
China	173,9 W/m ²	1523 kWh/m ² *a	1302 kWh/kWp
Italien	158,9 W/m ²	1392 kWh/m ² *a	1190 kWh/kWp
Frankreich	139,5 W/m ²	1222 kWh/m ² *a	1044 kWh/kWp
Österreich	131,0 W/m ²	1148 kWh/m ² *a	981 kWh/kWp
Schweiz	129,8 W/m ²	1137 kWh/m ² *a	972 kWh/kWp
Deutschland	113,6 W/m ²	995 kWh/m ² *a	850 kWh/kWp
Großbritannien	101,1 W/m ²	886 kWh/m ² *a	757 kWh/kWp

Tabelle 10: Weltweiter Ländervergleich mit den unterschiedlichen Globalstrahlungen

(Echtsolar, 2022)

In der obenstehenden Tabelle werden verschiedene Länder anhand ihrer horizontalen Globalstrahlung im Landesmittel verglichen. Hierbei wird deutlich, dass Länder in Äquatornähe und mit nahezu senkrechter Einstrahlung tendenziell höhere Werte aufweisen. Beispielsweise erzielt eine Photovoltaikanlage in Kenia im Vergleich zu einer in Österreich installierten Anlage mehr als das Doppelte an möglicher jährlicher Ertragsleistung. Dennoch ist es auch in Österreich wirtschaftlich sinnvoll und rentabel, solche Anlagen zu installieren.

Neben der geografischen Lage beeinflusst auch die Neigung der Anlage den Einstrahlungswert erheblich. Mithilfe einer Einstrahlungskarte kann der nutzbare Prozentsatz der örtlichen Globalstrahlung ermittelt werden.

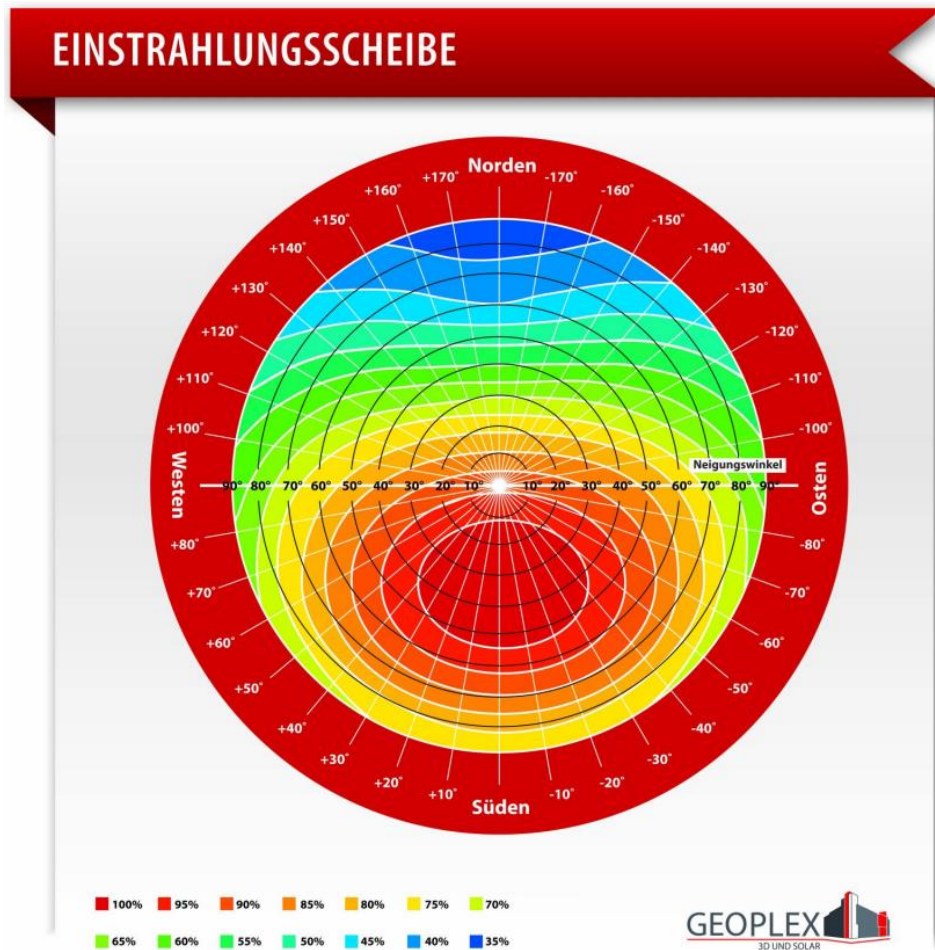


Abbildung 24: Einstrahlungsscheibe

(GEOPLEX GIS GmbH, 2023)

Im nächsten Schritt wird für das ausgewählte Wohnhaus mithilfe der folgenden Karte „Durchschnittliche Globalstrahlung auf ebener Fläche im Jahr“ mit Werten zwischen 1000 und 1200 Kilowattstunden kWh/m² der genaue Wert ermittelt.

Um präzisere Berechnungen durchzuführen, sind die Daten des Gebäudes erforderlich. Die Photovoltaikanlage soll nicht auf dem Wohnhaus installiert werden, da die Dachfläche dort bereits stark belegt ist mit Dachflächenfenstern, einer Antennenanlage und zwei Kaminen. Stattdessen ist die Installation auf einem westlich gelegenen Nebengebäude vorgesehen, dessen Dachfläche frei von störenden Auf- und Einbauten ist, was eine einfachere Installation ermöglicht und Schattenwurf vermeidet.

3.2.2 Bewertung der klimatischen Umgebungsbedingungen

Der Energieertrag eines PV-Moduls hängt von den klimatischen und Umgebungsbedingungen am Installationsort ab. Es ist nicht ausreichend, sich allein auf die Werte aus dem Datenblatt eines PV-Moduls zu verlassen, die unter Standard-Testbedingungen (STC) gemäß IEC 60904-3:2016 mit einer Einstrahlung von 1000 W/m², einem Solarstrahlungsspektrum von Air Mass 1.5 und einer Modulzelltemperatur von 25 °C ermittelt wurden, um Aussagen über den Energieertrag an einem spezifischen Standort zu treffen. Die Umweltbedingungen spielen hier eine entscheidende Rolle.

Die International Energy Agency (IEA) beschäftigt sich in ihrem Bericht IEA-PVPS T13-20:2020 in der Arbeitsgruppe „Photovoltaic Power Systems Taskforce 13“ (IEA-PVPS T13) intensiv mit den unterschiedlichen Auswirkungen von Klimaeinflüssen auf Photovoltaikanlagen. Dazu wurden weltweit verschiedene Standorte in verschiedenen Klimazonen ausgewählt, um Photovoltaikanlagen unter realen Bedingungen zu messen und die Auswirkungen der Umweltbedingungen zu untersuchen.

Country	Azimuth (degrees) (mean)	Tilt (degrees) (mean)	Capacity (kWp) (median)	Specific yield (kWh/kWp) (mean)
Australia	8.58	16.1	5.00	-
Austria	-0.34	31.1	5.15	1040
Belgium	-1.69	35.6	5.20	922
Denmark	0.48	30.0	6.00	786
France	-0.28	28.7	2.96	1101
Italy	-15.9	19.8	5.88	1142
Japan	-1.20	23.8	4.92	1222
Netherlands	0.77	32.5	3.30	855
UK	-1.07	31.8	2.94	897
USA North	0.42	25.2	5.81	1005
USA South	933	19.9	526	1426

Tabelle 11: Mittelwerte einzelner Länder aus dem Bericht IEA-PVPS T13-20:2020

(Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies für Various Operating Conditions, 2020)

Die verschiedenen Standorte in diesem Bericht wurden verschiedenen Klimaprofilen zugeordnet, und für jedes Klimaprofil wurde der Climate Specific Energy Rating (CSER) Wert auf Basis empirisch ermittelter Messwerte berechnet. Der CSER ist ein standardisiertes Maß für die energetische Bewertung von PV-Modulen, das in der IEC-61853-Serie definiert ist. In dieser Studie wurden nicht nur die verschiedenen Klimaprofile verglichen, sondern auch die unterschiedlichen Solarzellentechnologien untereinander.

Die Ergebnisse dieser Studie lassen Folgendes erkennen:

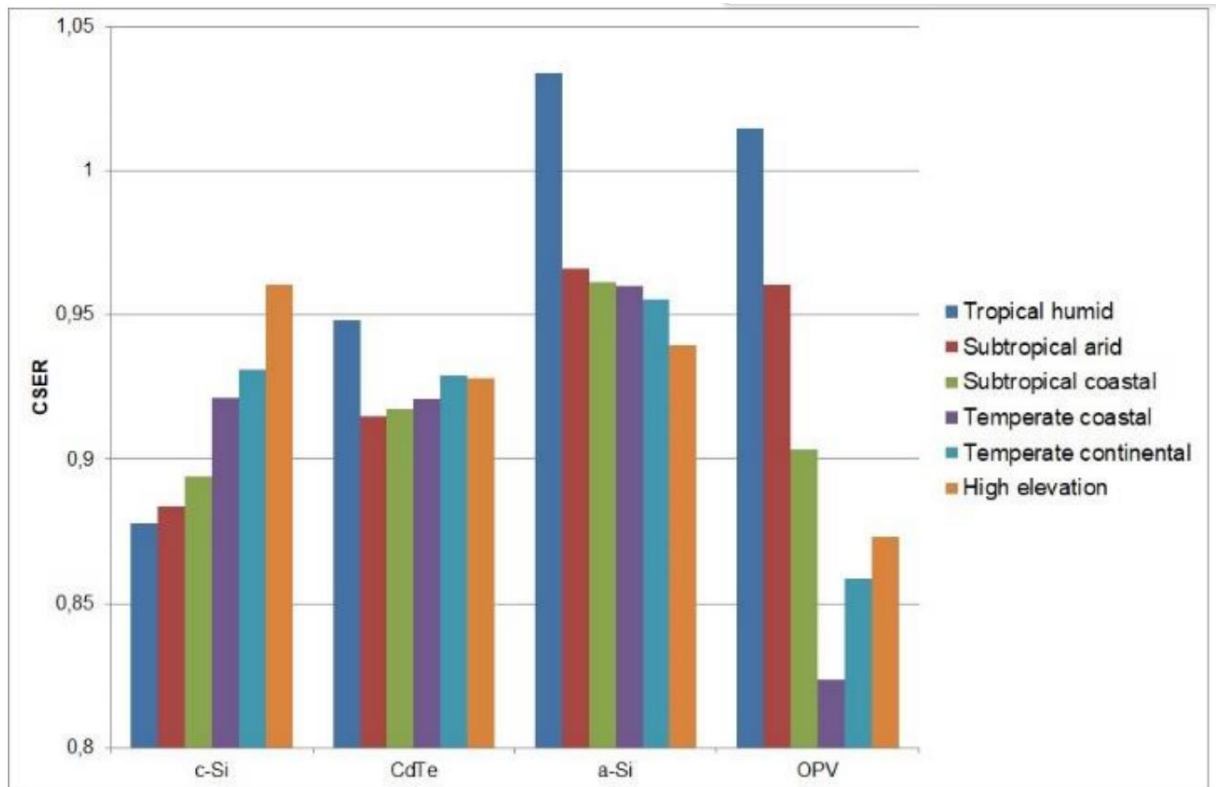


Abbildung 26: Grafik mit den unterschiedlichen CSER-Werten für vier verschiedene PV-Technologien in den sechs Referenz Klimata nach IEC 61853-4

(Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies für Various Operating Conditions, 2020)

Es zeigt sich, dass es in fast allen Klimazonen Leistungseinbußen aufgrund des Klimas gibt, außer im tropisch feuchten Klima, und dies trifft nur für den Einsatz von a-Si- bzw. OPV-Solarzellentechnologien zu.

3.2.3 Schattenanalyse und deren Auswirkungen

Nicht nur die geografische Lage und die Umgebungsbedingungen des Standorts beeinflussen den Energieertrag der Photovoltaikanlage, sondern auch die Beschattung, die gelegentlich Teile oder die gesamte Anlage abdeckt. Infolgedessen kann je nach Verdrahtung der PV-Module und der verwendeten Modultechnik eine mehr oder weniger starke Reduktion der erzeugten Energiemenge auftreten. Insbesondere bei klassischen Strang-Wechselrichter-Photovoltaikanlagen wird bei der Beschattung eines einzelnen Modules die gesamte Strangleistung prozentual auf die schwächere Leistung dieses Moduls begrenzt. Mit anderen Worten, wenn die Leistung eines Moduls aufgrund von Beschattung um 50 % reduziert wird, wird die gesamte Strangleistung ebenfalls auf 50 % reduziert.

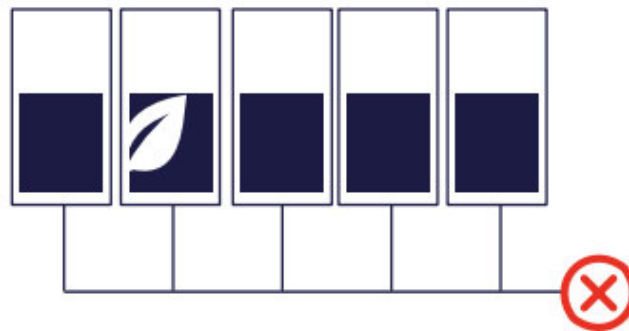


Abbildung 27: Reduzierte Leistung des gesamten Strangs aufgrund eines beschatteten Modules

(SolarEdge Technologies Ltd., 2022)

Daher lautet die Devise, jegliche Beschattung der Anlage zu vermeiden. Dies steht jedoch oft im Konflikt damit, dass in Fällen von Schattenwirkung durch Bäume diese gefällt werden sollten, was sogar Gegenstand von Gerichtsverfahren sein kann. In einem Artikel von Jörg-Michael Günther mit dem Titel „Photovoltaikanlagen und der Schatten geschützter Bäume – Klima- und Naturschutz im Konflikt“ aus dem Jahr 2013 wird verdeutlicht, dass hierbei Klima- und Naturschutzinteressen aufeinandertreffen (Günther, 2013). Es ist jedoch nicht immer notwendig, den Verursacher bei geringfügiger und vorübergehender Beschattung sofort zu fällen. Ein Gegenmittel kann auch in Form von sogenannten Leistungsoptimierern eingesetzt werden, die hinter jedem PV-Modul angebracht werden und nur das betroffene Modul auf die maximale Leistung herunterregeln.

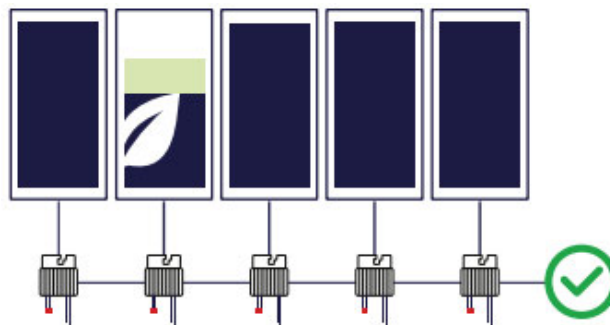


Abbildung 28: Leistungsreduktion beschränkt nur auf betroffenes Modul

(SolarEdge Technologies Ltd., 2022)

4 Planung der Photovoltaikanlage und des Speichersystems

4.1 Planungssoftware und erste Anlagendaten

Wie bereits in den vorherigen Abschnitten und Kapiteln dargelegt wurde, sind bei der Planung einer Photovoltaikanlage zahlreiche unterschiedliche Faktoren zu berücksichtigen. In dieser wissenschaftlichen Arbeit wird die Softwarelösung des israelischen Wechselrichterherstellers SolarEdge für die Planung und Dimensionierung einer solchen Anlage verwendet. Die Entscheidung für diese Softwarelösung wurde aufgrund ihrer guten Kompatibilität mit den hauseigenen Leistungsoptimierern des Herstellers getroffen. Zudem ist die Software kostenfrei zugänglich.

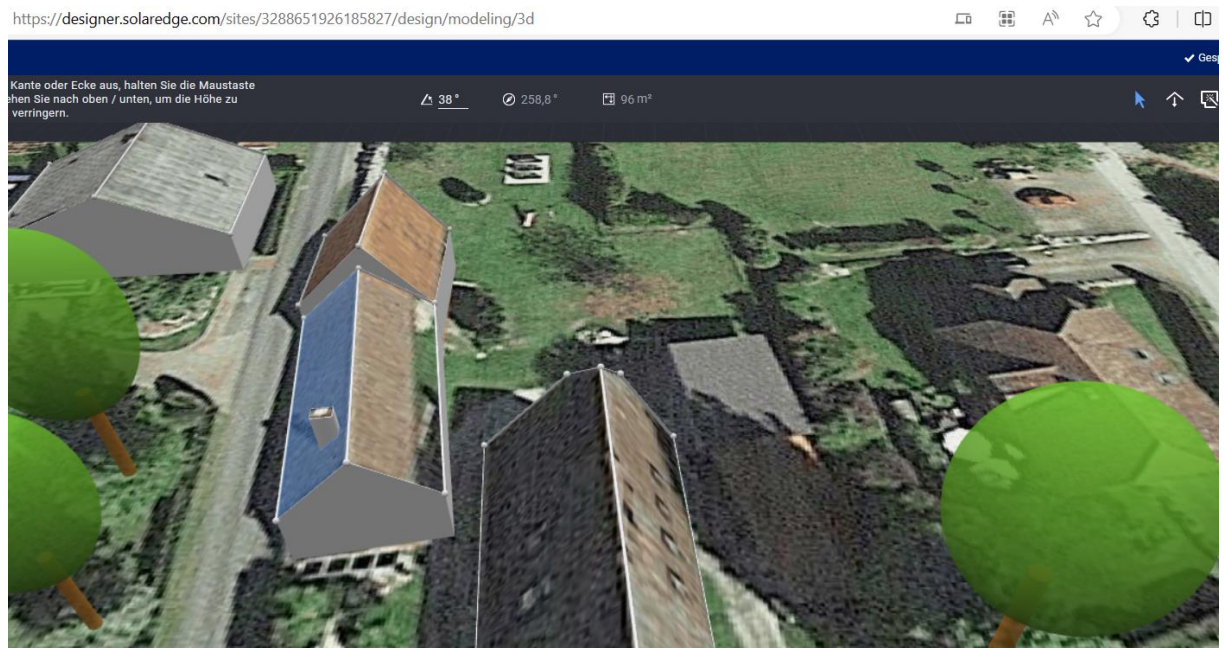


Abbildung 29: Screenshot Gebäudeerstellung im SolarEdge Designer

Quelle: Eigene Darstellung mit SolarEdge Designer erstellt

Die Photovoltaikanlage für das ausgewählte Wohnhaus mit drei Generationen, soll am Nebengebäude installiert werden und im ersten Schritt wird mithilfe von Satellitenbildern aus Google Maps das Dach erstellt. Dabei werden sowohl das Hauptgebäude als auch alle Objekte, die Schatten auf das Gebäude werfen könnten, im Satellitenbild nachgezeichnet und entsprechend in 3D extrudiert. Zusätzlich wird der Kamin auf der westlichen Dachseite im 3D-Modell des Gebäudes platziert.

4.1.1 Auswahl und Dimensionierung der PV-Module

Im nächsten Schritt erfolgen die Auswahl und die Dimensionierung der PV-Module. Da es sich um eine standard-dachparallel-montierte Photovoltaikanlage handelt, werden monokristalline PV-Module mit Half-Cut-Technologie ausgewählt, da sie gute Verfügbarkeit und ein gutes Preis-Leistungsverhältnis bieten. Die Platzierung der Module erfolgt auf beiden Dachflächen (Ost- und Westseite) mit Ausnahme der Kaminaussparung. Aufgrund der Anlagengröße von über 18,63 kWp wird eine Blitzschutzanlage gemäß den Empfehlungen des Verbands der Sachversicherer (VdS) aus dem Jahr 2010 installiert. Diese Blitzschutzanlage wird in der Blitzschutzklasse III errichtet und erfordert gemäß Tabelle 2 der ÖVE/ÖNORM EN 62305-2 aus dem Jahr 2008-01-01 Fangleitungen im Abstand

von 15 m x 15 m. Daher müssen auch Fangleitungen entlang der Längsseite angebracht werden, wodurch in diesem Bereich keine PV-Module montiert werden können. Aufgrund der notwendigen Trennabstände zwischen der Photovoltaikanlage und den Fangleitungen müssen auch an den Dachrändern Abstände eingehalten werden. Infolgedessen können insgesamt nur 46 PV-Module platziert werden, wobei 22 auf der Westseite und 24 auf der Ostseite angeordnet sind.

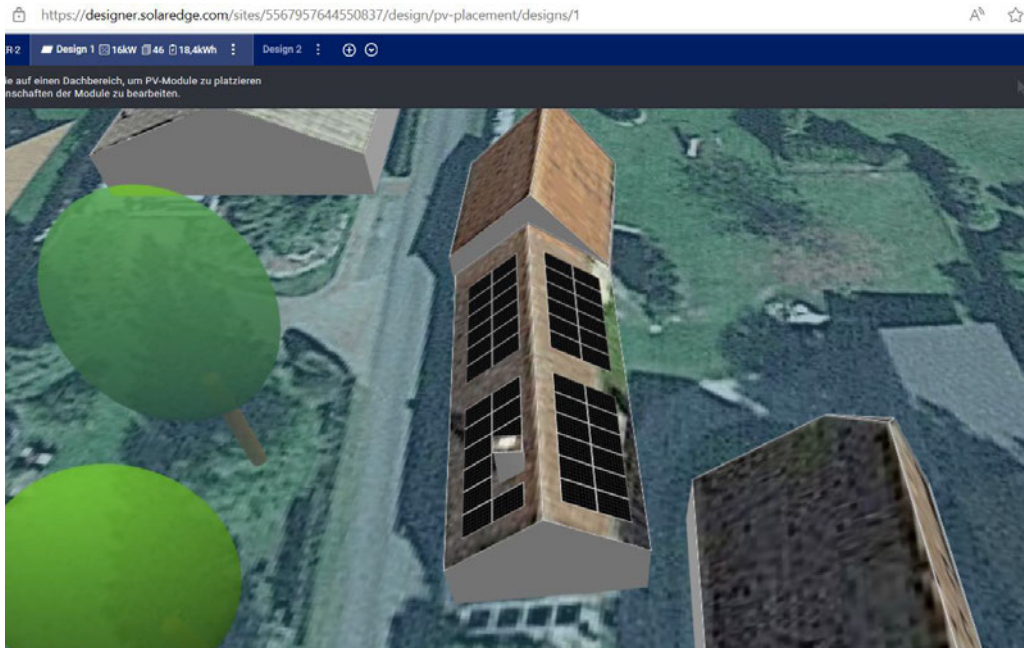


Abbildung 30: Screenshot Modulplatzierung im SolarEdge Designer

Quelle: Eigene Darstellung mit SolarEdge Designer erstellt

4.1.2 Auswahl und Dimensionierung des Energiespeichers

Um eine optimale Integration des Speichers in das PV-System zu ermöglichen, greifen wir auf ein Speichersystem des Wechselrichter-Herstellers zurück. Wie schon am Anfang der Arbeit angeführt, soll aufgrund des Ziels, einen hohen Autarkiegrad zu erreichen und die Fähigkeit zur schwarzstartfähigen Notstromversorgung sicherzustellen, ein Speicher geplant werden. Dies gewährleistet, dass im Falle eines längeren Stromausfalls der eventuell leere Speicher mithilfe der Energie der Photovoltaikanlage geladen werden kann.

Da in diesem Fall zwei Wechselrichter für die Photovoltaikanlage installiert werden, wird an jedem Wechselrichter ein Energiespeicher mit einer Kapazität von 9,2 kWh angeschlossen. Gemäß den Berechnungen des Programms „SolarEdge Designer“ wird somit bei Anwendung des Standardlastprofils H0 und voller Last, einschließlich des Betriebs von zwei Elektroautos und einer Wärmepumpe, eine prognostizierte Ersatzstromzeit von 9 Stunden erreicht, allein durch die Nutzung von zwei vollgeladenen Speichern.

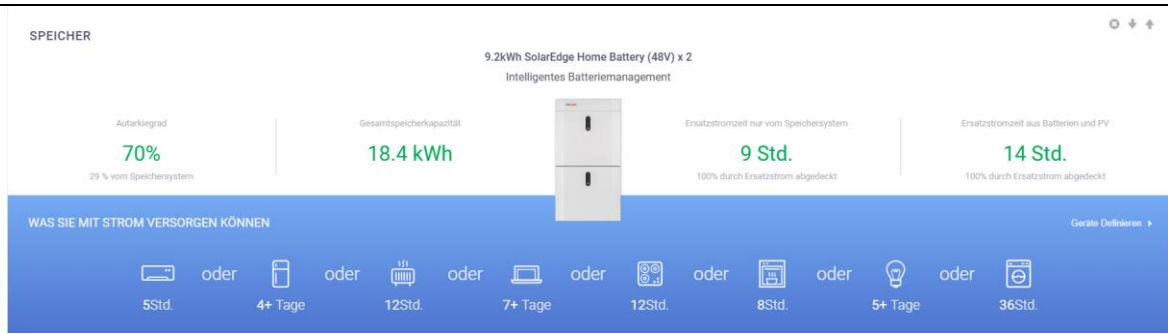


Abbildung 31: Screenshot Prognose Speicher im SolarEdge Designer

Quelle: Eigene Darstellung mit SolarEdge Designer erstellt

4.1.3 Auswahl des Wechselrichters und sonstiger Komponenten

Das zentrale Element der Photovoltaikanlage sind die beiden Wechselrichter. Diese erhalten die Leitungen von den PV-Modulen auf dem West- und Ost-Dach. Da die Wechselrichter in einem netzparallel geführten Photovoltaiksystem eingebaut sind, müssen sie bestimmten Standards entsprechen und für den Betrieb in Österreich zugelassen sein. Eine Liste der in Österreich zugelassenen Wechselrichter ist auf der Webseite von Österreichs Energie verfügbar.

Diese Tabelle kann gefiltert werden

Hersteller ¹ Type ^v Zulässig ^v Nennwirkleistung (max.) bei cosPhi = 1[kW] ^v Nennscheinleistung (max.) [kVA] ^v Phasenzahl ¹ Art Betriebsmittel ¹

Stand 20.12.2023

Hersteller	Type	Zulässig	Datum befristet bis	Nennwirkleistung (Maximalleistung) bei cosPhi = 1 [kW]	Nennscheinleistung (Maximalleistung) [kVA]	Phase...	Art Betriebsmittel	OVE R25 Prüfberic...
SolarEdge	SE5K-RWB48	Ja	5	5	5	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE5K-RWS	Ja	5	5	5	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE7K-RWB48	Ja	7	7	7	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE7K-RWS	Ja	7	7	7	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE8K-RWB48	Ja	8	8	8	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE8K-RWS	Ja	8	8	8	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE10K-RWB48	Ja	10	10	10	3	Hybrid-Wechselrichter	OK
SolarEdge	SE10K-RWS	Ja	10	10	10	3	Hybrid-Wechselrichter	OK

Abbildung 32: In Österreich zugelassene Wechselrichter gefiltert nach Hersteller SolarEdge, 3-phasier Anschluss und Type Hybrid-Wechselrichter

(Verein "Österreichs E-Wirtschaft", 2023)

Wie bereits erwähnt, wird jeder Wechselrichter mit einem Speicher ausgestattet, um den Autarkiegrad zu erhöhen und die Energieversorgung bei möglichen Netzstörungen sicherzustellen. Dies sind sogenannte Hybrid-Wechselrichter, die sowohl DC-Eingänge für die PV-Module als auch separate DC-Eingänge für den Anschluss von Speichern neben dem obligatorischen Wechselspannungs-Netzanschluss besitzen.

Für die Notstromversorgung des Netzes ist eine zusätzliche Umschaltbox erforderlich, die im Falle eines Netzfehlers die hausinterne Elektroanlage sicher vom Netz trennt und den beiden Wechselrichtern die Erlaubnis zur Einrichtung eines Inselnetzes erteilt. Dieses Gerät, das zwischen dem

Netz-Zähler und der Haus-Elektroanlage geschaltet ist, enthält auch einen Subzähler. Im Netzparallelbetrieb der Photovoltaikanlage trägt dieser Subzähler zur Optimierung der Lastflüsse bei. Die genauen Vorgaben für das Einspeisen ins Netz, das Laden der Akkus oder das Ein- und Ausschalten von Verbrauchern werden in den Wechselrichtern, die als Steuerzentrale dienen, festgelegt.

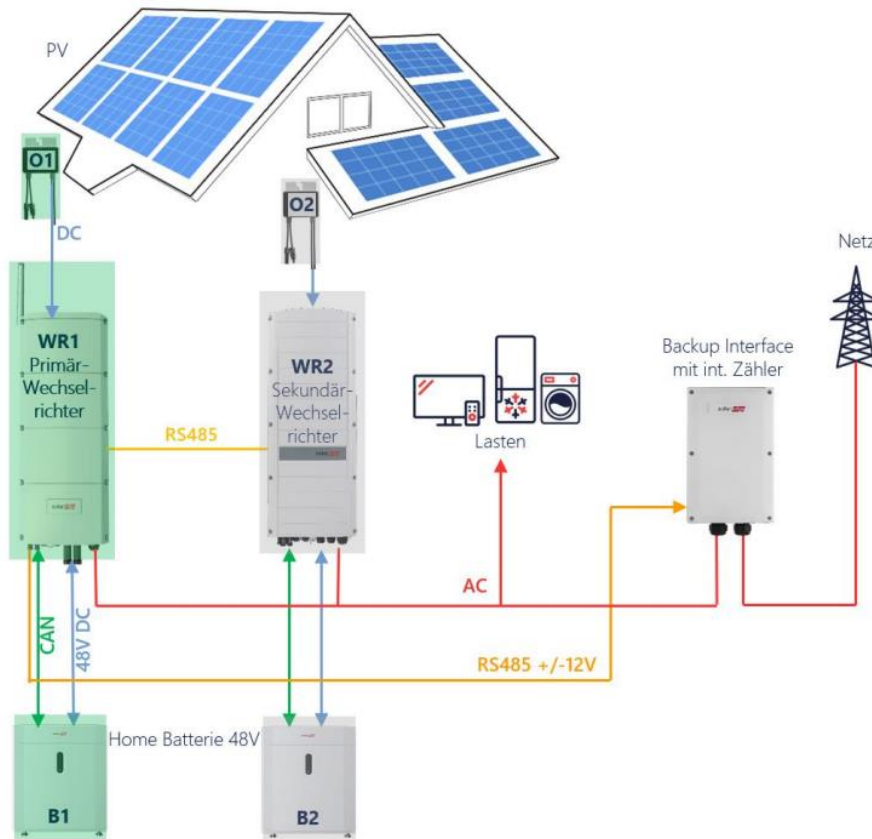


Abbildung 33: Geplante Konfiguration mit 2x Hybrid-Wechselrichter mit je 1x Speicher und Backup Interface

(BayWa r.e. AG, 2023)

4.1.4 Kriterien und Überlegungen bei der Komponentenauswahl

Wie bereits zu Beginn des Abschnitts 4 erwähnt wurde, erfolgte die Auswahl von SolarEdge aufgrund seiner hochwertigen Softwarelösung und des umfassenden Produktportfolios. Insbesondere die effiziente Systemlösung der Leistungsoptimierer ermöglicht in dieser Photovoltaikanlage eine optimale Energieernte. Bei diesem System wird hinter jedem PV-Modul ein Leistungsoptimierer installiert. Dies ermöglicht die Ermittlung der höchsten Leistung auf Modulebene mithilfe eines Maximum Power Point Trackers (MPPT) und damit die kontinuierliche Betreibung des Moduls in seinem Leistungsmaximum. Im Vergleich zur herkömmlichen Installation von Photovoltaikanlagen mit Strang-Wechselrichtern, bei der nur ein MPPT auf Strangebene arbeitet, führt diese Bauweise, insbesondere bei Abschattung von einzelnen Modulen, zu einer deutlich höheren Leistung.

Leistungsoptimierer ermöglichen auch das Monitoring jedes Moduls hinsichtlich verschiedener Modul-Zustandsparameter wie elektrische Leistung und Temperatur. Die neueste Generation der Leistungsoptimierer verfügt über Temperatursensoren in den Steckverbindungen und kann Temperaturerhöhungen aufgrund von Kontaktproblemen, die im Laufe der Zeit auftreten können, erkennen.

Ein weiterer erheblicher Vorteil dieses Systems besteht darin, dass die Gleichspannungsverkabelung vom Leistungsoptimierer zum Wechselrichter nur im störungsfreien Betrieb und bei aktivem Wechselrichter unter Spannung steht. Wenn im System ein Fehler auftritt oder der Wechselrichter außer Betrieb ist, beträgt die Spannung an der PV-Leitung nur 1 V. Im Gegensatz dazu bleibt bei

einer Standard-Photovoltaikanlage mit Strang-Wechselrichter die volle DC-Spannung an der PV-Leitung auch bei deaktiviertem Wechselrichter erhalten, was je nach Auslegung bis zu 1000 V betragen kann.

Dies stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar, insbesondere wenn Nichtfachleute mit beschädigten DC-Leitungen in Kontakt kommen oder die Feuerwehr bei einem Hausbrand in die Nähe der Photovoltaikanlage gerät. Abhängig von der Anlagengröße und den örtlichen Vorschriften ist eine externe Abschalteneinheit erforderlich, die die DC-Leitungen so nah wie möglich an der Photovoltaikanlage abschaltet.

Die Gesamtanlage erzielt, laut der folgenden Screenshot aus dem SolarEdge Designer, einen prognostizierte Jahresenergiebetrag von rund 15,4 MWh. Somit ist eine Deckung des, laut dem Punkt 3.1.3, errechneten Jahresenergiebedarf von ca. 14,68 MWh, mit dieser geplanten Anlage möglich.

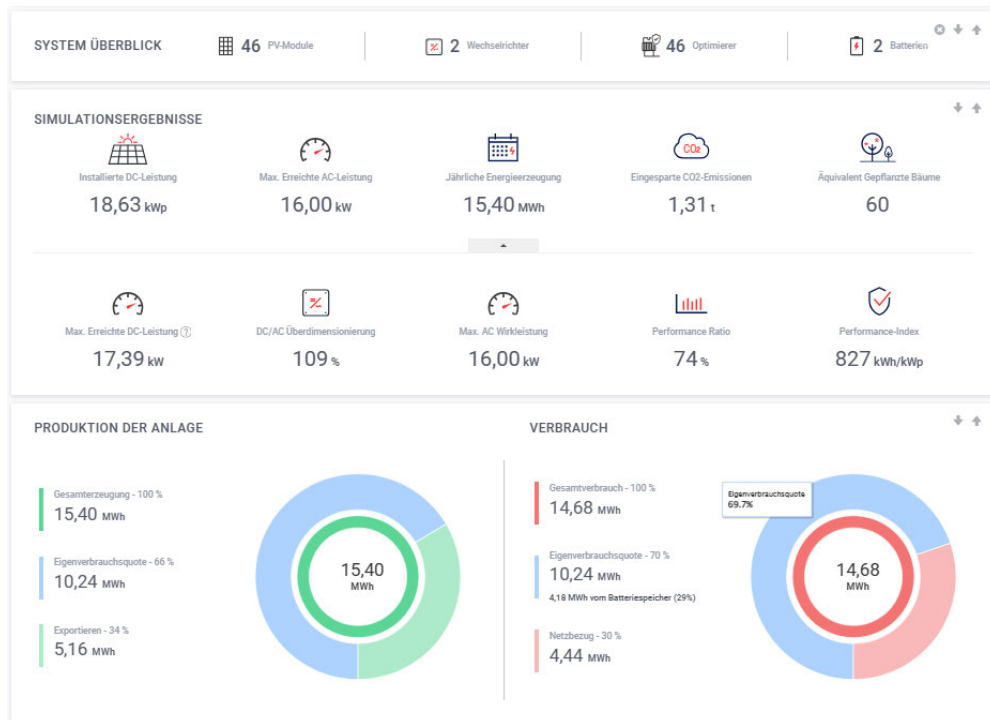


Abbildung 34: Screenshot Systemüberblick im SolarEdge Designer

Quelle: Eigene Darstellung mit SolarEdge Designer erstellt

Die folgende Abbildung zeige die prognostizierbaren Energiewerte der geplanten PV-Installation:

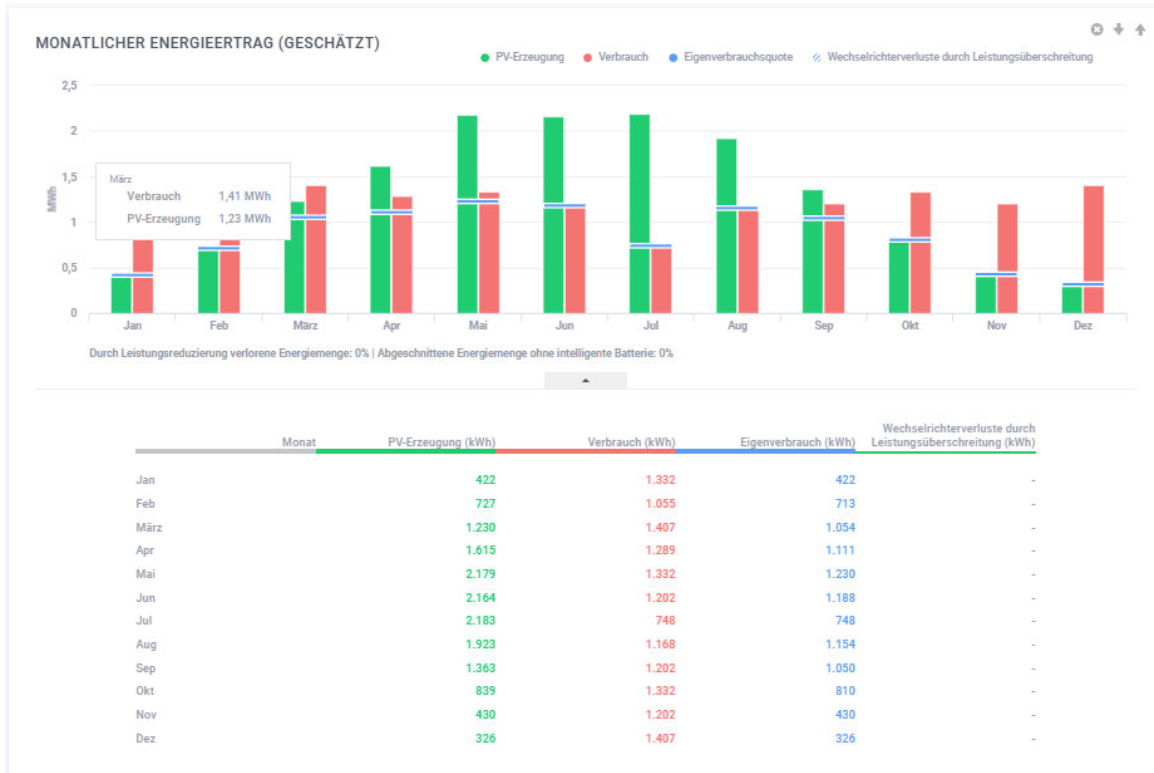


Abbildung 35: Screenshot Energieerträge im SolarEdge Designer

Quelle: Eigene Darstellung mit SolarEdge Designer erstellt

Es ist weiterhin, wie bereits im Abschnitt 4.1.1 erwähnt wurde, aufgrund der Größe der Anlage geplant, eine Blitzschutzanlage zu installieren. Diese Blitzschutzanlage besteht aus zwei Hauptkomponenten. Zum einen gehört dazu der äußere Blitzschutz, der Fang- und Ableitungen auf dem Dach sowie die Erdungsanlage umfasst, die in diesem Fall durch Tiefenerder realisiert wird. Die Aufgabe des äußeren Blitzschutzes besteht darin, einen vorgegebenen Weg, um das zu schützende Objekt herum für den Blitzstrom festzulegen, der diesen Blitzstrom sicher ableiten kann.

Zum anderen gehört der innere Blitzschutz dazu, der die elektrische Anlage und die elektrischen Geräte vor den unvermeidbaren Überspannungen schützen soll, die bei einem Blitzschlag auftreten können. Dies wird durch die Installation von Blitzstrom- und Überspannungsableitern in der elektrischen Anlage erreicht. Dadurch werden Potentialunterschiede vermieden, die zu gefährlichen Überschlüssen und hohen Blitzströmen führen könnten.

Das Gebäude, das durch den inneren Blitzschutz geschützt wird, wird in drei äußere Lightning Protection Zones (LPZ) und drei innere LPZs unterteilt. Die äußeren LPZs (LPZ 0, LPZ 0A und LPZ 0B) bieten Schutz sowohl vor den mechanischen als auch den elektrischen Auswirkungen eines Blitzschlags sowie vor den hohen Blitzströmen. Im Gegensatz dazu schützen die inneren LPZs (LPZ 1, LPZ 2 und LPZ 3), die in den entsprechenden LPZ installierten elektrischen Geräte, nur vor den auftretenden Überspannungen.

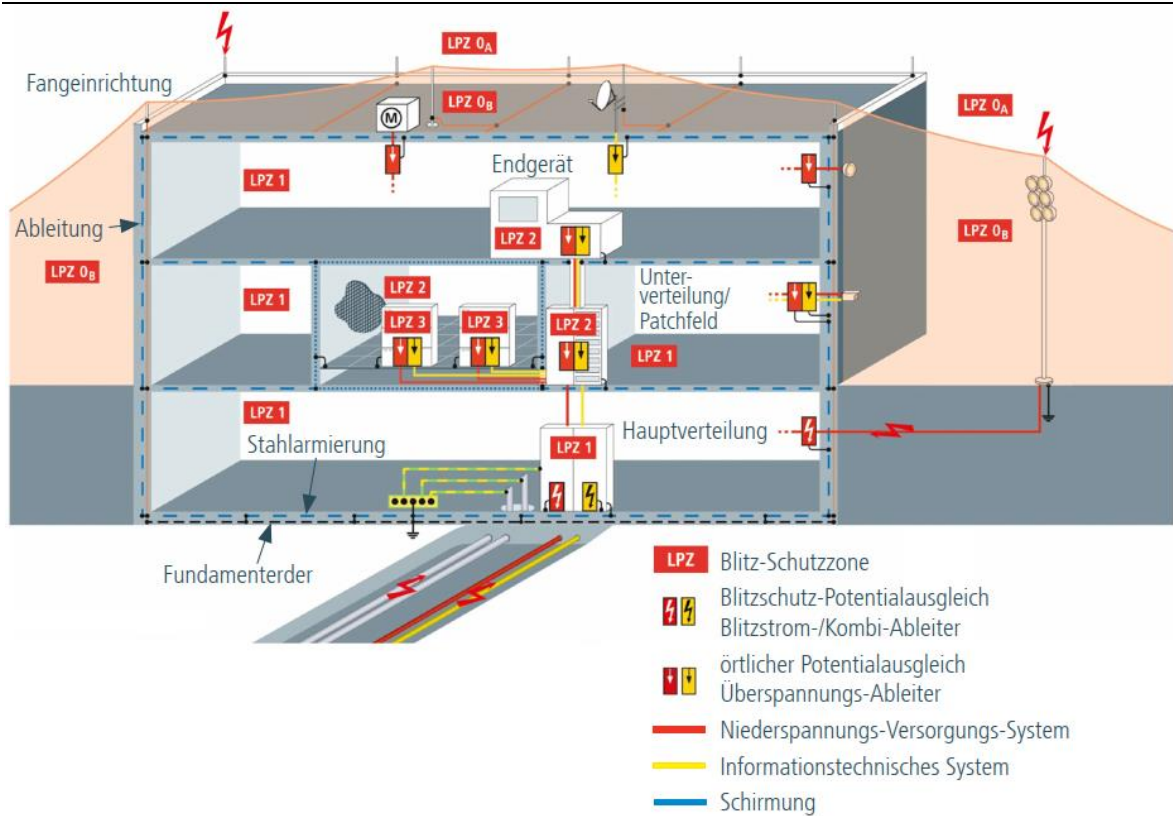


Abbildung 36: Blitz-Schutzzonen

(DEHN AUSTRIA GmbH, 2011)

4.2 Installation und Inbetriebnahme der Anlage

Da die Photovoltaikanlage Teil der elektrischen Anlage ist, ist ihre Installation ausschließlich qualifiziertem Fachpersonal gestattet. Die Integration der Photovoltaikanlage erfolgt immer in der Hauptverteilung in unmittelbarer Nähe des Zählpunkts des Energieversorgungsunternehmens (EVU). Dies ist aufgrund der Tatsache begründet, dass solche Anlagen in der Regel Leistungen im Bereich der Gesamtanlagenleistung der elektrischen Installation erbringen. Das Hauptmotiv für den Erwerb einer Photovoltaikanlage im privaten Wohnhausbereich ist grundsätzlich die Deckung des eigenen Energiebedarfs.

Es existieren mittlerweile auch kleine Photovoltaikanlagen, die als Typ A oder Kleinsterzeugungsanlagen bekannt sind. In Österreich sind diese, gemäß den Vorgaben des TOR Erzeuger Typ A Version 1.2, mit einer maximalen Leistung von 0,8 kW vergleichsweise einfach zu installieren. Diese Installationsmethode, die das Einstecken in eine herkömmliche Schuko-Steckdose ermöglicht, vermittelt dem elektrotechnisch unerfahrenen Anwender eine rasche, unkomplizierte und sichere Installation. Dies trifft jedoch nur unter bestimmten Bedingungen zu und setzt voraus, dass die elektrische Anlage, an die diese Kleinsterzeugungsanlage angeschlossen wird, gut gewartet ist und den aktuellen Standards entspricht. Bei älteren Anlagen mit zahlreichen Mängeln kann dies jedoch ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen.

Zu diesem Thema wurde eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE im Auftrag der E-Control veröffentlicht, die sich mit „STECKERFERTIGEN, NETZGEKOPPELTEN KLEINST-PHOTOVOLTAIKANLAGEN“ befasst. Diese Studie behandelt sämtliche Aspekte des Themas, und im Abschnitt 7.4 des Schlusskapitels werden Empfehlungen für potenzielle Käufer abgegeben. Es wird betont, dass potenzielle Käufer vor der Investitionsentscheidung nicht nur die technischen Installations- und Betriebsmöglichkeiten der Anlage, sondern auch ihre persönlichen Erwartungen in Bezug auf die Verwendung der erzeugten Solarenergie klären sollten. Die elektrische Sicherheit der eigenen Hausinstallation sollte in diesem Zusammenhang kritisch bewertet werden, insbesondere bei älteren Gebäuden, deren Elektroinstallation möglicherweise nicht mehr den aktuellen Normen und Sicherheitsanforderungen entspricht.

Zurückkommend auf unsere geplante Photovoltaikanlage, die mit einer DC-Leistung von 18,63 kWp und einer prognostizierten Jahresenergieernte von 15,4 MWh installiert wird, ist zu beachten, dass nur qualifiziertes Fachpersonal für die Installation infrage kommt. Ebenso ist es erforderlich, vor der Installation beim örtlichen Netzbetreiber anzufragen, ob am Standort überhaupt die Möglichkeit zur Einspeisung von Photovoltaikstrom besteht. Dies muss gemäß § 17a des EIWOG 2010 unter Angabe der folgenden Daten beim Netzbetreiber beantragt werden:

1. Name und Anschrift des Netzbenutzers und Anschrift der anzuschließenden Anlage;
2. bei neu zu errichtenden Anlagen: Lageplan;
3. gewünschter Beginn der Einspeisung;
4. Höchstleistung der Anlage in kW, die den tatsächlichen Kapazitätsbedürfnissen des Netzbenutzers entspricht;
5. Anzahl und Lage der Zählerplätze;
6. Anlagen- und Betriebsart (z. B. Photovoltaikanlage, Kleinwasserkraftwerk, Voll- oder Überschusseinspeisung);
7. prognostizierte Jahresmenge in kWh;
8. bei gemeinschaftlichen Erzeugungsanlagen die in § 16a genannten Informationen (Klima- und Energiefonds, 2023).

Nach Rückmeldung seitens des Verteilnetzbetreibers (VNB) auf diese Anmeldung ergibt sich die Klarheit, ob die gesamte PV-Leistung in das vorgelagerte Verteilnetz eingespeist werden darf oder ob die Einspeisung auf eine begrenzte Leistung beschränkt ist. Dies ist stark abhängig vom Netzausbau und dem konkreten Standort. Es kann sogar vorkommen, dass ein vollständiges Einspeiseverbot, also eine sogenannte Nulleinspeisung, zurückgemeldet wird. In einem solchen Szenario bleibt lediglich die Option für direkten Eigenverbrauch oder Zwischenspeicherung im PV-Speicher.

4.2.1 Installationsprozess der Photovoltaikanlage und des Speichers

Die Installation und die Inbetriebnahme einer Photovoltaikanlage sind prinzipiell von jedem konzessionierten Elektrotechnikunternehmen durchführbar, sofern es in der Datenbank der Wirtschaftskammer Österreich gelistet ist (Wirtschaftskammer Österreich, 2024). Allerdings ist zu beachten, dass die Installation einer PV-Anlage bereits bei der Auswahl der Werkzeuge und speziell bei der Kenntnis der zu installierenden PV-Komponenten besondere Fachkenntnisse erfordert. Deswegen wird empfohlen, dass die Mitarbeiter, die für die Installation verantwortlich sind, zusätzliche Schulungen im Bereich Photovoltaik und Produktschulungen absolvieren.

Der Installationsprozess beginnt zunächst mit der Montage der Unterkonstruktion für die PV-Module. Vor dieser Phase werden Dachschutzblenden und Dachfanggerüste installiert, sowie Anschlagrichtungen am Dach zur Absturzsicherung angebracht. Die erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen werden gemäß den Vorgaben der Allgemeinen Unfallversicherungsanstalt (AUVA) in deren Dokument „Arbeiten auf Dächern“ umgesetzt (Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), 2020). In diesem Zusammenhang kann es sinnvoll sein, die Unterstützung von Fachfirmen aus der Dachdeckerbranche in Anspruch zu nehmen, um die Dachdichtheit und Sturmfestigkeit zu gewährleisten.

Die Konstruktion der Unterkonstruktion erfolgt gemäß den örtlichen Wind- und Schneelasten, wofür spezielle Programme wie beispielsweise SL-Rack-Solar-Pro-Tool verwendet werden. Diese Programme ermöglichen die Erstellung eines vollständigen Massenauszugs, eines CAD-Plans zur Installation sowie einer statischen Berechnung.

Anschließend werden die PV-Module auf der Unterkonstruktion montiert, nachdem sie zuvor mit den entsprechenden Leistungsoptimierern auf der Rückseite bestückt wurden. Die Verkabelung erfolgt gemäß der Planung im SolarEdge-Designer, um eine spätere örtliche Zuordnung in der Monitoring-Software zu ermöglichen. Dabei wird eine Leitung verwendet, die den Anforderungen der Norm EN 50618 entspricht und speziell für die widrigen Wetterbedingungen auf dem Dach ausgelegt ist. Im vorliegenden Fall beträgt der Querschnitt dieser Leitung 6 mm², da dies dem maximalen Querschnitt der MC-4 Stecker und Buchsen entspricht, die an den Leistungsoptimierern montiert sind.

Bei der Verlegung der Leitungen ist es wichtig, den erforderlichen Trennungsabstand in der Dachmitte, wo die mittlere Blitzschutzableitung verläuft, einzuhalten. Dies kann am besten durch die Verlegung der Solarleitungen im Dachinnenraum realisiert werden. Für die Dachdurchführungen sollten originale Kabeldurchführungen verwendet werden, um sowohl eine Beschädigung der Kabel an dieser Durchführung zu vermeiden als auch das Risiko einer Undichtigkeit des Daches auszuschließen.

Zusätzlich sind die Festlegungen aus der OVE-Richtlinie R 11-1 zu berücksichtigen, insbesondere unter Kapitel 5.1.1, wo die Kabelführung und Verlegungsmöglichkeiten hinsichtlich Brandgefahr behandelt werden. Für die geplante Photovoltaikanlage wird die in Kapitel 5.1.3 empfohlene geschirmte Verlegung in einem elektrisch leitfähigen durchverbundenen Metallrohr gewählt, da dies die einfachste Umsetzung darstellt. Dieses Metallrohr sollte an beiden Enden geerdet werden.

In Anbetracht der Installation einer Blitzschutzanlage für die Photovoltaikanlage wird gemäß der OVE Richtlinie R 6-2-2 ein innerer Blitzschutz auf der DC- und AC-Seite gefordert. Dies wird mittels eines Kombinationsableiters vom Typ 1 + Typ 2 realisiert, der sich in einem Generatoranschlusskasten befindet, welcher sich in der Nähe des Dacheintritts der PV-Leitungen auf der DC-Seite befindet. Im ausgewählten SolarEdge Wechselrichter sind sowohl auf der AC- als auch auf der DC-Seite Ableiter des Typs 2 vorhanden. Daher ist lediglich ein weiterer Kombinationsableiter vom Typ 1 + Typ 2 in der Unterverteilung des Nebengebäudes erforderlich, in dem die Photovoltaikanlage installiert wird. Die Kommunikationsleitungen werden ebenfalls mit Überspannungsableitern ausgestattet. Im Falle des SolarEdge Wechselrichters handelt es sich um die RS485-Anbindung, die zum Backup-Interface führt, wo die Insel-schaltung bei Netzausfall durchgeführt wird, sowie um die Verbindung zum zweiten Wechselrichter und zum KNX-Gateway. Darüber hinaus ist eine LAN-Anbindung integriert.

Die Montage der beiden Wechselrichter und der beiden Energiespeicher, die jeweils eine Kapazität von 9,2 kWh aufweisen, erfolgt in einem beheizten Innenraum, um die Lebensdauer der Geräte zu erhöhen und einem temperaturbedingten Derating vorzubeugen. Die Wechselrichter werden an

einer stabilen Wand angebracht, unter Einhaltung ausreichender Abstände zu anderen Geräten, Wänden, dem Boden und der Decke.

Die Energiespeicher selbst werden bodenstehend montiert und mit Kippsicherungen an der Wand befestigt. Auch hier sind die vorgeschriebenen Abstände zu anderen Geräten und Wänden gemäß der Montageanleitung einzuhalten. Aufgrund ihres kombinierten Energiegehalts von insgesamt 18,4 kWh ist die zusätzlich technische Ausstattung des Raumes für den Speicher nicht besonders groß. Gemäß Kapitel 3.9.12 b.) der OIB-Richtlinie 2 ist im Montageraum des Speichers lediglich ein nicht vernetzter Rauchwarnmelder zu installieren (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023). Bei Energiespeichern mit einem Energiegehalt von mehr als 20 kWh gelten erhöhte Brandschutzanforderungen, darunter die Verwendung von Wänden und Decken mit REI 90- bzw. EI 90-Klassifizierung. Eine vollständige Liste der Anforderungen ist im Abschnitt 3.9 der OIB-Richtlinie 2 verfügbar (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023).

Schließlich ist die Installation des Backup-Interface erforderlich, das im SolarEdge-System bei Netzausfall die elektrische Anlage vom Netz trennt und den Wechselrichtern ermöglicht, ein Inselnetz zu erstellen. Diese Box wird bereits im Abschnitt 4.1.3 zwischen dem Zähler des Energieversorgungsunternehmens (EVU) und der Hauptverteilung installiert.

Um die Kommunikation zwischen den Wechselrichtern, dem Backup-Interface und dem KNX-Gateway zu ermöglichen, ist zusätzlich eine RS485-Leitung zwischen den Geräten erforderlich. Für die Vernetzung empfiehlt sich die Verwendung eines Standard-RS485-Kabels mit zwei verdrehten Aderpaaren und einem Schirm, wobei die Verkabelung in einer Daisy-Chain-Konfiguration durchgeführt wird. Um Reflexionen in den Kabeln zu verhindern, werden an den letzten Geräten Abschlusswiderstände mit Widerstandswerten entsprechend dem Wellenwiderstand des Kabels hinzugefügt.

Damit sind die Montage- und Verkabelungsplanungen abgeschlossen.

Der Vorteil dieses Prüfbefundes liegt darin, dass er alle relevanten Anlagendaten kompakt zusammenfasst und sämtliche erforderlichen Schritte der Inbetriebnahme abdeckt. Dies beginnt bei den Grunddaten der elektrischen Anlage und erstreckt sich bis zu den Messungen an der DC-Seite der Anlage sowie Informationen zur Integration der Photovoltaikanlage in die bestehende Elektroanlage. Darüber hinaus gewährleistet die Verwendung dieses Prüfprotokolls, dass die Systemdokumentationen und Prüfungen gemäß der OVE EN 62446 Serie durchgeführt werden.

Für die Messungen auf der DC-Seite sind spezialisierte Messgeräte erforderlich, mit denen die DC-Werte wie Spannung, Strom und Leistung erfasst werden können. Des Weiteren ist auch die Isolationswiderstandsmessung auf der DC-Seite von Bedeutung. Ein weiteres Messgerät wird benötigt, um die Werte des PV-Moduls zu ermitteln, darunter die Einstrahlung, Temperatur, Neigung und Ausrichtung.

Auf der Wechselspannungsseite (AC) sind, wie bei jeder Erweiterung einer Anlage, Überprüfungen mit einem Installationstester erforderlich. Dies dient dazu sicherzustellen, dass sämtliche Schutzmaßnahmen ordnungsgemäß funktionieren und die elektrische Anlage sich in einem zuverlässigen und benutzersicheren Zustand befindet.

Abschließend ist es notwendig, dem Anlagenbetreiber die Photovoltaikanlagendokumentation zu übergeben, die sämtliche Prüfprotokolle, Pläne und andere relevante Unterlagen enthält. Zudem sollte dem Betreiber die ordnungsgemäße Handhabung der Photovoltaikanlage erläutert werden.

4.2.3 Wartung und regelmäßige Überprüfung der Anlage

In der Elektro- und Informationstechnik erfordert jede elektrische Anlage, einschließlich einer Photovoltaikanlage, regelmäßige Wartung. Einige Aufgaben, wie die periodische visuelle Überprüfung auf Schäden und Verschmutzungen, können vom Anlagenbetreiber selbst, der in der Regel kein Fachmann auf diesem Gebiet ist, durchgeführt und teilweise behoben werden. Die wiederkehrende elektrotechnische Prüfung hingegen erfordert das Fachwissen geschulter Experten. In diesem Fall, einer Photovoltaikanlage auf einem privaten Wohnhaus, sind gesetzlich keine festgelegten Intervalle für wiederkehrende Prüfungen vorgeschrieben.

Die regelmäßige wiederkehrende Prüfung ist jedoch entscheidend dafür, dass die Anlage in ihrer optimalen Leistungsfähigkeit betrieben wird und elektrische Energie produziert. Es liegt also im Eigeninteresse des Anlagenbetreibers, diese Prüfung in regelmäßigen Abständen durchführen zu lassen.

5 Integration der Photovoltaikanlage und des Speichers in die KNX-Gebäudeautomatisierung

5.1 Grundlagen der Integration in KNX-Systeme

Das KNX stellt seit Langem den etablierten Standard in der Gebäudetechnik dar, insbesondere in gewerblichen Immobilien. Dies gilt auch für das ausgewählte Wohnhaus, das von drei Generationen bewohnt wird. Die Entscheidung für KNX basiert auf seiner sektorübergreifenden Integrationsfähigkeit der verschiedenen Gebäudesysteme. Diese Integration erstreckt sich auf die Steuerung der Beleuchtung, Beschattung, Heizung und Klimatisierung.

Ein weiterer Vorzug des KNX-Systems besteht in seiner herstellerübergreifenden Standardisierung, die die Verfügbarkeit und Vielfalt von KNX-Geräten gewährleistet.

5.2 Übersicht über die Möglichkeiten der Integration

Derzeit sind in dem Wohnhaus Beleuchtungs-, Heizungs- und Beschattungssteuerung in das KNX-System integriert. Die ursprüngliche Installation erfolgte aus dem Grund, dass diese Einzelanwendungen gemeinsam in einer einheitlichen Visualisierung dargestellt werden können. Des Weiteren wurden Funktionen wie der automatische Hitzeschutz durch die Beschattung eingeführt, der durch den Raumtemperatursensor ausgelöst wird, oder die Fensterkontakte, die nicht nur die Raumheizung automatisch in den Frostschutzmodus versetzen, sondern auch die Rollladenfunktion sperren, wenn das Fenster geöffnet ist.

In der aktuellen Konfiguration, in der eine Photovoltaikanlage in das elektrische System integriert wird, bietet das KNX-System die Möglichkeit, diese Energiequelle optimal einzubeziehen. In Bezug auf das Energiemanagement eröffnen sich hier vielfältige Möglichkeiten, wie im folgenden Bild dargestellt.



Abbildung 38: Sektorenkopplung mit KNX

(Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG, 2021)

5.2.1 Voraussetzungen und technische Aspekte der Integration

In diesem 3-Generationen-Wohnhaus ist das zentrale Steuergerät „Homeserver“ von Gira für die Logik, Verknüpfungen und zentralen Funktionen verantwortlich. Derzeit wird das Gerät zur Abdeckung der in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen Funktionen eingesetzt, jedoch noch ohne die Photovoltaikanlage.

5.2.2 Planung und Ausführung der Integration

Die Photovoltaikanlage wird am bestehenden KNX-System über die Ethernet-KNX-Schnittstelle des Drittanbieters Elausys angebunden.



Abbildung 39: KNX-SolarEdge Gateway von Elausys

(ELAUSYS SPRL, 2024)

Da auf dieser Schnittstelle nur Schwachstromleitungen laufen, ist geplant, diese in einem eigenen Kleinverteiler zu installieren, um eine klare Trennung von den 230 V Leitungen sicherzustellen. Auf der einen Seite führt die KNX-Kommunikationsleitung zur rot-schwarzen KNX-Klemme, das gelb-weiße Aderpaar der KNX-Leitung wird für die 12 – 30 VDC-Versorgung verwendet, und an der RJ45-Ethernet-Buchse wird die Leitung zum SolarEdge Wechselrichter angeschlossen. Die Hardwareintegration ist somit vollständig geplant.

5.3 Konfiguration und Programmierung des KNX-Systems

5.3.1 Anpassung des KNX-Systems an die Photovoltaikanlage und den Speicher

Der nächste Schritt betrifft die Planung der softwaretechnischen Integration. Hierzu wird in der Programmiersoftware des KNX, der ETS6, die bereits bestehende Programmierung des Wohnhauses geöffnet, und die Schnittstelle aus dem Katalog ausgewählt und importiert. Anschließend werden die Grundeinstellungen des Geräts wie die physikalische Adresse, der Gerätename und die Beschreibung ausgefüllt. Als Nächstes erfolgen die Einstellungen im Reiter „Inverter Settings“ für das 3-phase System, die Anzahl der Stränge, der Wechselrichter und des Speichers. Ebenfalls werden die Einstellungen für einen vorhandenen Zähler getroffen.

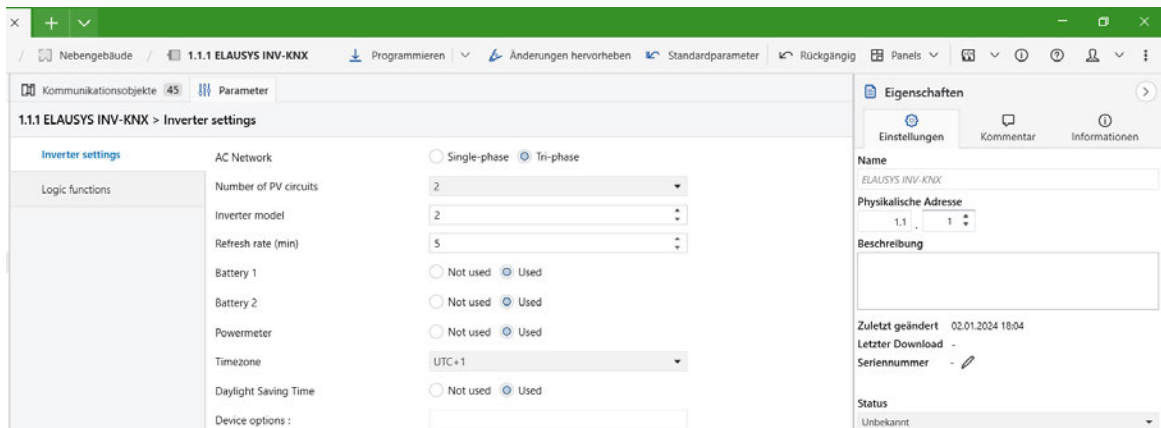


Abbildung 40: Screenshot ETS6 KNX-SolarEdge Gateway Grundkonfiguration

Quelle: Eigene Darstellung, Screenshot aus ETS6

Der zweite Reiter „Logic functions“ bleibt ungenutzt, da die einzelnen Werte direkt, ohne vorherige Verarbeitung, über die Kommunikationsobjekte auf den KNX-Bus übertragen werden. Zur weiteren Verarbeitung, Visualisierung und Datenspeicherung wird die bereits in Abschnitt 5.1.2 erwähnte zentrale Steuereinheit, der Gira Homeserver, verwendet.

Nummer	Name	Länge	Objektfunktion
1	Module status	1 byte	Status code
2	Firmware version	14 bytes	Text String
3	AC Total Current	4 bytes	Actual value
4	AC Current phase A	4 bytes	Actual value
5	AC Current phase B	4 bytes	Actual value
6	AC Current phase C	4 bytes	Actual value
7	AC Total voltage	4 bytes	Actual value
8	AC Voltage Phase AB	4 bytes	Actual value
9	AC Voltage Phase BC	4 bytes	Actual value
10	AC Voltage Phase CA	4 bytes	Actual value
11	AC Voltage Phase A-Neutral	4 bytes	Actual value
12	AC Voltage Phase B-Neutral	4 bytes	Actual value
13	AC Voltage Phase C-Neutral	4 bytes	Actual value
14	DC Total Current	4 bytes	Actual value
15	DC Total voltage	4 bytes	Actual value
16	PV1 Voltage	4 bytes	Actual value
17	PV1 Current	4 bytes	Actual value
18	PV2 Voltage	4 bytes	Actual value
19	PV2 Current	4 bytes	Actual value
24	AC Power	4 bytes	Actual value
25	DC Power	4 bytes	Actual value
26	AC Frequency	4 bytes	Actual value
27	AC Apparent power	4 bytes	Actual value
28	AC Reactive power	4 bytes	Actual value
29	AC power factor	4 bytes	Actual value
30	AC Total Energy	4 bytes	Actual value
31	Inverter efficiency	2 bytes	Actual value
32	Inverter resistance	4 bytes	Actual value
33	Cabinet Temperature	2 bytes	Actual value
40	AC Daily Energy Yield	4 bytes	Actual value
41	Battery 1 - Running Status	2 bytes	Status code
42	Battery 1 - Charge/Discharge Power (>0: charging / <0:discharging)	4 bytes	Actual value
43	Battery 1 - State of Charge	1 byte	Actual value
44	Battery 1 - Current day charge capacity	4 bytes	Actual value
45	Battery 1 - Current day discharge capacity	4 bytes	Actual value
46	Battery 1 - Total charge capacity	4 bytes	Actual value
47	Battery 1 - Total discharge capacity	4 bytes	Actual value
48	Battery 2 - Running Status	2 bytes	Status code
49	Battery 2 - Charge/Discharge Power (>0: charging / <0:discharging)	4 bytes	Actual value
50	Battery 2 - State of Charge	1 byte	Actual value
51	Battery 2 - Current day charge capacity	4 bytes	Actual value
52	Battery 2 - Current day discharge capacity	4 bytes	Actual value
53	Battery 2 - Total charge capacity	4 bytes	Actual value
54	Battery 2 - Total discharge capacity	4 bytes	Actual value
55	Powermeter - Active Power (>0: producing to grid / <0:consuming from grid)	4 bytes	Actual value

Abbildung 41: Screenshot ETS6 Kommunikationsobjekte KNX-SolarEdge Gateway

Quelle: Eigene Darstellung, Screenshot aus ETS6

5.3.2 Programmierung von Automatisierungsregeln und -szenarien

Die Rohdaten werden gemäß den Informationen aus dem vorherigen Abschnitt auf den KNX-Bus übertragen und vom Homeserver erfasst. Im Homeserver werden mithilfe dieser Daten und zusätzlicher Eingaben Logiken und Visualisierungsseiten erstellt. Diese können über IT-Endgeräte wie Smartphones, Tablets oder ähnliche Geräte bedient und angezeigt werden.

Entsprechend dem Pareto-Prinzip werden die Haushaltsgeräte im Wohnhaus nach Leistungsbedarf geordnet und daraufhin geprüft, ob eine externe Steuerung möglich ist oder ob eine Schnittstelle zur intelligenten Steuerung vorhanden oder nachgerüstet werden kann. Dies betrifft zunächst die Haushaltsgeräte der Kategorie „Weiße Ware“, also die größeren Geräte wie Waschmaschinen oder Backöfen, die den höchsten Leistungsbedarf haben. In diesem Fall handelt es sich um die Waschmaschine und den Geschirrspüler, wobei die Waschmaschine mit einem Wireless Local Area Network (WLAN) Modul ausgestattet ist. Über diese Vernetzungsmöglichkeit und das Hersteller Application Programming Interface (API) „Miele 3rd Party API“ kann das Gerät gesteuert werden. Der Zugriff erfolgt cloudbasiert über eine Representational State Transfer (REST) API, daher ist eine

Internetverbindung erforderlich. Im Homeserver wird ein entsprechender Logikbaustein verwendet, um die Verbindung zwischen KNX und dem Miele-Gerät herzustellen.

knx-user-forum.de - HS/FS ID: 14360 Miele			
0	E1 Debug	A1 Error	0
0	E2 Client ID	A2 Error Text	0
0	E3 Client Secret	A3 Device Info	0
0	E4 Username	A4 Ident Info	0
0	E5 Password	A5 State Info	0
0	E6 Language	A6 Available Actions	0
0	E7 Device	A7 Available Programs	0
0	E8 Get All Devices	A8 Power	0
0	E9 Get Device	A9 Light	0
0	E10 Get Ident	A10 Color	0
0	E11 Get State		
0	E12 Get Actions		
0	E13 Get Programs		
0	E14 Set JSON Actions		
0	E15 Set JSON Programs		
0	E16 Set Power		
0	E17 Set Light		
0	E18 Set Color		
0	E19 Set Modes		
0	E20 Set DeviceName		
0	E21 Set ProcessAction		
0	E22 Set VentilationStep		
0	E23 Set ProgramId		

Abbildung 42: Übersicht Kommunikationsobjekte Homeserver-Logikbaustein Miele

(knx-user-forum e.V., 2024)

In diesem Fall, in dem die Waschmaschine gesteuert werden soll, erfolgt der Start des Waschprogramms über den Eingang E21. Der Startbefehl für diesen Eingang wird von einer vorherigen Logik generiert. Diese Logik vergleicht den aktuellen Leistungsbedarf des Wohnhauses mit dem erwarteten Leistungsbedarf für die Laufzeit des Waschmaschinenprogramms in Bezug auf die Leistung, die von der Photovoltaikanlage geliefert wird. Der Logikbaustein bietet auch mehrere Ausgänge, um den Status des Geräts anzuzeigen. Für das aktuelle Gerät, die Waschmaschine, können diese Informationen auf einer eigenen visuellen Geräteseite des Homeservers angezeigt werden. Diese Lösung ermöglicht durch Load-Shifting ein anschauliches Beispiel dafür, wie die Energie der Photovoltaikanlage direkt und ohne Umweg über den Speicher genutzt werden kann.

Leider sind andere Geräte der Weißen Ware derzeit nicht vernetzbar und daher nicht automatisierbar. Hier können nur die werkseitig eingebauten Standardfunktionen genutzt werden, wie die Startzeitvorwahl über die integrierte Zeitschaltuhr beim Geschirrspüler. Bei zukünftigen Geräteanschaffungen sollte daher darauf geachtet werden, dass diese Geräte in das System integriert werden können.

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit bietet der Rasenmäroboter. Der jährliche Energieverbrauch wird hier nicht durch die Momentanleistung, sondern durch die Betriebsdauer bestimmt. Der Rasenmäroboter wird das ganze Jahr über genutzt, außer in den Wintermonaten, was einer ungefähren Nutzungsdauer von etwa 240 Tagen mit jeweils etwa 10 Stunden Laufzeit entspricht. Bei einer

Leistungsaufnahme von 36 Watt entspricht dies einem jährlichen Energieverbrauch von etwa 86 kWh. Dieser Energiebedarf soll ebenfalls direkt von der Photovoltaikanlage gedeckt werden. Dazu wird ebenfalls ein Logikbaustein im Homeserver verwendet.

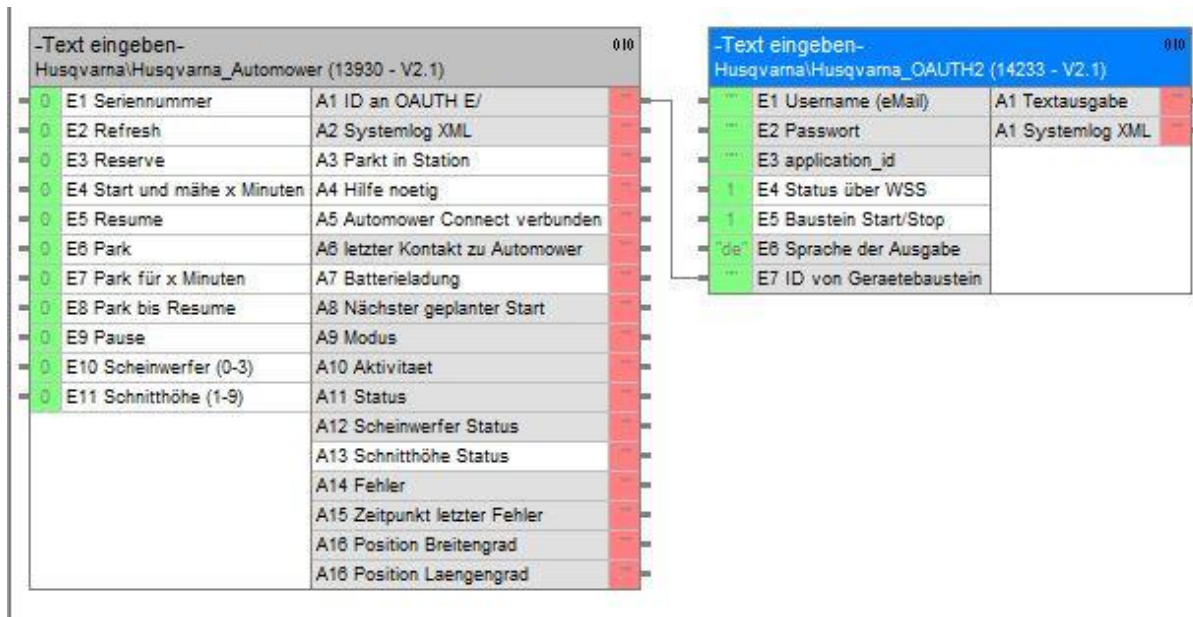


Abbildung 43: Übersicht Kommunikationsobjekte Homeserver-Logikbaustein Husqvarna Automower

(Smart Building Services GmbH, 2024)

Ähnlich wie im Fall des Miele-Logikbausteins wird auch beim Husqvarna-Logikbaustein, der den Rasenmäroboter steuert, der Start über den Eingang E4 ausgelöst, wobei die Laufzeit in Minuten angegeben wird. Da dieser Logikbaustein lediglich den Rasenmäher selbst betrifft und das Netzteil im Standby-Modus Energie verbraucht, wird in den Nachtstunden über einen vorherigen Aktor-Schaltkontakt die Steckdose des Netzteils abgeschaltet. Am Morgen, wenn ausreichend Leistung von der Photovoltaikanlage zur Verfügung steht, wird dieser Schaltkontakt wieder aktiviert. Nach einer kurzen Wartezeit von einigen Minuten wird über die vorgelagerte Logik der Mäher über den Eingang E4 in den Mäh-Modus versetzt. Am Ende des Tages, wenn die Leistung der Photovoltaikanlage allein nicht mehr ausreicht, um den Rasenmäroboter mit Energie zu versorgen, wird dieser über den Befehl auf E6 zum Parken und Laden zurückgeschickt. Nachdem der Ausgang A7 eine Rückmeldung gegeben hat, dass der Akku zu 100 % geladen ist, wird der Schaltkontakt des Steckdosen-Netzteils erneut abgeschaltet.

5.3.3 Kontinuierliche Optimierung und Anpassung des Systems

Diese beiden Ansätze stellen derzeit zwei Möglichkeiten zur Eigenverbrauchsoptimierung dar. Im weiteren Betrieb müssen die Funktionsweisen dieser Ansätze auf ihre Praxistauglichkeit und Handhabung hin überprüft und angepasst werden. Darüber hinaus werden in naher Zukunft große Verbraucher wie die Wärmepumpe für die Raumheizung und Warmwasserbereitung sowie die Ladestationen für die beiden zukünftigen Elektroautos hinzugefügt. Insbesondere bei der Wärmepumpe sind verschiedene Anpassungen erforderlich, um das Optimum in Bezug auf Energieeinsparung zu erreichen. Dies betrifft unter anderem die Betriebszeiten, die mit der PV-Erzeugung abgestimmt sein sollten, sowie die Nutzung von Pufferspeichern und die Festlegung der Warmwasserbereitungszeiten.

6 Optimierung des Eigenverbrauchs durch KNX-Gebäudeautomation

6.1 Energieverbrauchsprofile und Lastmanagement

Zur Optimierung des Eigenverbrauchs ist es notwendig das Lastprofil zu ermitteln und zu analysieren. Daraus können mit einem Lastmanagementsystem basierend auf verschiedenen Methoden, wie Load-Shifting und Peak-Shaving, eingegriffen werden, um den Eigenverbrauch optimieren zu können.

6.1.1 Erstellung und Analyse von Verbrauchsprofilen

Wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erläutert, ist gegenwärtig kein aktuelles Lastprofil über den bereits installierten Smartmeter abrufbar. Diese Funktionalität wird voraussichtlich zeitnah durch die Energieversorgungsunternehmen (EVU) aktiviert. Bis dahin werden die Messwerte des im Backup-Interface integrierten Zählers herangezogen, um ein optimales Lastmanagement zu ermöglichen. Nach der Aktivierung der Opt-In-Option am Smartmeter können dessen Zählwerte zur Validierung der Werte des Backup-Interface-Zählers verwendet werden. In den ersten Monaten des Betriebs der Photovoltaikanlage, in denen nur wenige Daten zur Verfügung stehen, wird, wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erwähnt, das Standard-Lastprofil H0 verwendet.

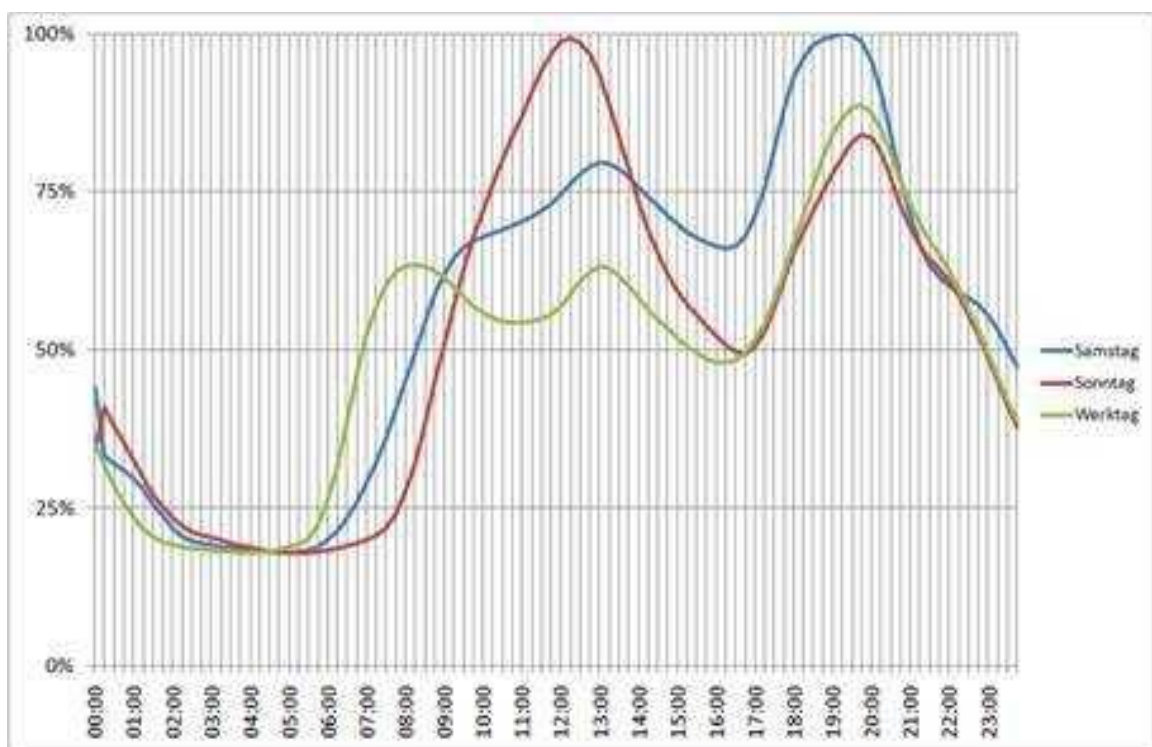


Abbildung 44: Lastprofil H0

(ECO ENERGY, 2024)

Wie aus der Grafik ersichtlich ist, sinkt in diesem Standard-Lastprofil die Lastkurve in den Nachtstunden stark ab, deutlich unter ein Viertel der Spitzenlasten, die am Mittag oder Abend an den beiden Wochenendtagen auftreten. In den Morgenstunden verzeichnen alle Wochentage einen gleichmäßigen Anstieg, wobei sich am Wochenende der Zeitpunkt des Anstiegs um 1 – 2 Stunden in Richtung Vormittag verschiebt. An Werktagen zeigt sich im weiteren Tagesverlauf am Vormittag ein leichter Abfall der Lastkurve, die dann zu Mittag auf einem ähnlichen Niveau wie am Morgen ansteigt. Am

Nachmittag gibt es eine kleine Delle, bevor die Lastkurve am Abend ihren Höhepunkt erreicht. An Samstagen ist kein Abfall am Vormittag zu erkennen; an diesem Wochentag steigt die Morgen-Lastkurve weiter an und erreicht zu Mittag ihren Tageshöhepunkt. Am Samstagnachmittag fällt die Last auf etwa 50 % ab, bevor sie am Abend wieder ansteigt. Am Sonntag ähnelt die Lastkurve bis zum Mittag der an Werktagen, weist jedoch keine so hohe Spitzenlast zu Mittag auf. Am Sonntagnachmittag gibt es wieder einen leichten Abfall, bevor die Lastkurve am Abend erneut ansteigt.

6.1.2 Strategien und Techniken für das Lastmanagement

Die zuvor erwähnten Lastspitzen am Morgen, zu Mittag und am Abend stellen eine Herausforderung für die Energieversorgung dar. Die Vermeidung dieser Peaks wird auch als Spitzenlastmanagement bezeichnet und hat ihren Ursprung in Elektroanlagen mit hoher Leistung. Dies rührt daher, dass in Anlagen mit höherem Jahresverbrauch $\frac{1}{4}$ h Lastgangzähler zur Erfassung der bezogenen elektrischen Leistung verwendet werden. Diese Zähler erfassen neben der Energie auch die Lastspitzen in $\frac{1}{4}$ h Auflösung. Im Privatbereich, wo der jährliche Energieverbrauch geringer ist, wird in der Regel nur ein Gesamtverbrauchszähler installiert.

Bis zum Aufkommen weit verbreiteter Eigenenerzeugungsanlagen wie Photovoltaikanlagen wurde das Thema Lastmanagement hauptsächlich vom Netzbetreiber (VNB) oder EVU behandelt. Mit der Transformation von Kunden von reinen Verbrauchern zu sogenannten Prosumenten, also Verbrauchern, die gleichzeitig Energie produzieren oder Produzenten, die auch als Verbraucher auftreten, hat sich auch aus wirtschaftlichen Interessen und im Zusammenhang mit dem verstärkten Fokus auf den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen das Thema Eigenverbrauch gesteigert. Damit hat das Thema Lastmanagement auch im privaten Bereich an Bedeutung gewonnen.

Die Hauptkomponenten des Lastmanagements, wie bereits in Abschnitt 2.2.1 erwähnt, sind das Peak-Shaving und das Load-Shifting.

6.1.3 Automatisiertes Load-Shifting und deren Auswirkungen

In dieser Diplomarbeit werden die beiden Möglichkeiten des Lastmanagements auf Grundlage des KNX-Busses realisiert. Das automatisierte Load-Shifting wird gemäß den in Abschnitt 5.2.2 dargelegten Methoden umgesetzt. Die Auswirkungen variieren je nachdem, an welchem Gerät oder Anlagenteil dies angewandt wird, können jedoch erheblich sein.

Bei der aktuellen Ausstattung der elektrischen Anlage sind die Einzellasten der zeitlich verschiebbaren Geräte auf maximal 3,7 kVA begrenzt, da es sich hierbei um 1-phasige Betriebsmittel handelt. Die Verbraucher, die zukünftig hinzugefügt werden sollen, wie die Wärmepumpe und die beiden Ladestationen für Elektroautos, werden die Einzelmomentanleistungen auf bis zu 11 kVA erhöhen. Das bedeutet, dass für diese zukünftigen Großverbraucher ein intelligentes Lastmanagement erforderlich ist, um das Load-Shifting dieser großen Lasten zu steuern und den Eigenverbrauch auf ein optimales Niveau zu bringen.

6.2 Optimierung des Eigenverbrauchs durch Automation

Durch die KNX-Gebäudeautomatisierung ist es möglich automatisierte Funktion zur Optimierung des Eigenverbrauchs zu implementieren. Durch die vielfältigen Schnittstellen zu anderen Gewerken, wie dem Heizungsbereich, ist eine bidirektionale Anbindung gegeben.

6.2.1 Rolle der Gebäudeautomation bei der Optimierung des Eigenverbrauchs

Hierbei ist ein System vonnöten, das die verschiedenen Komponenten, wie die Photovoltaikanlage, den Energiespeicher und die Verbraucher, miteinander vernetzt, um eine ausgewogene Regelung der Lastflüsse unter Berücksichtigung des Eigenverbrauchs zu gewährleisten.

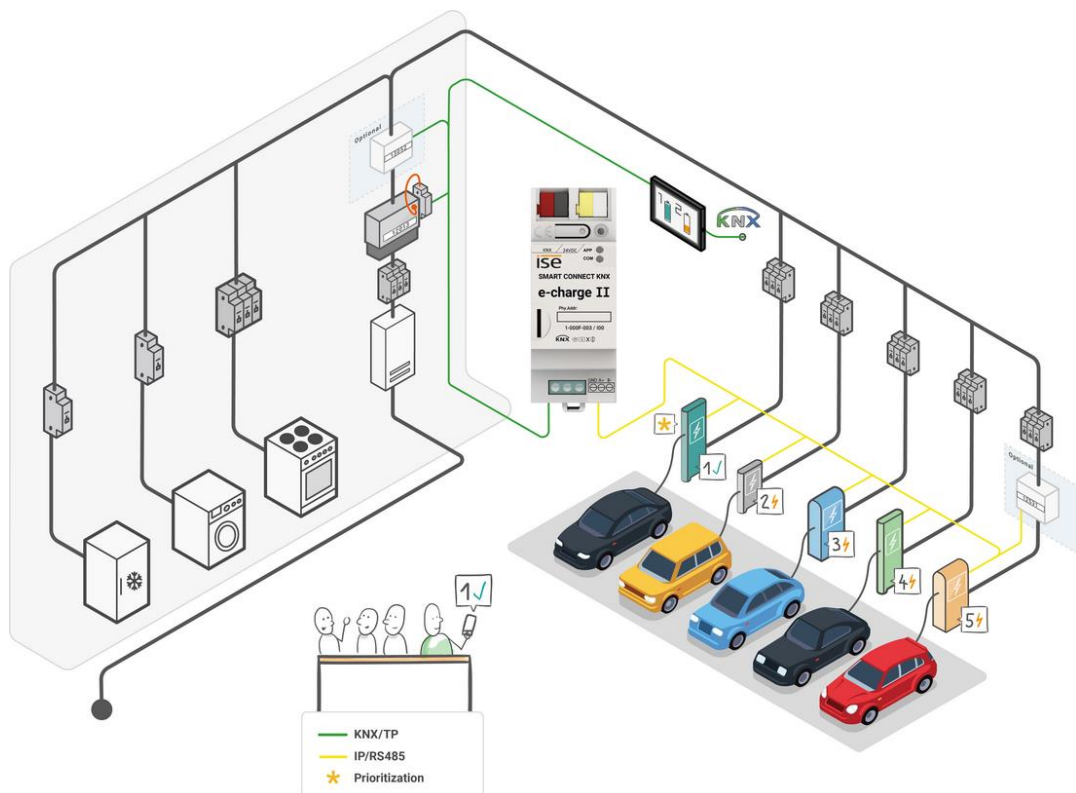


Abbildung 45: Einbindung ise e-charge II KNX-RS485 Gateway

(ise Individuelle Software und Elektronik GmbH, 2024)

6.2.2 Konkrete Maßnahmen zur Automatisierung des Eigenverbrauchs

Für die zukünftigen Großverbraucher, insbesondere im Hinblick auf die Ladestationen, wird ein weiteres KNX-RS485 Gateway benötigt. Dieses Gateway, basierend auf der RS485-Verkabelung, verbindet die beiden Ladestationen mit dem KNX-Bus. Dadurch ist es möglich, nicht nur grundlegende Informationen wie Starten oder Stoppen des Ladevorgangs zu übertragen, sondern auch eine präzise Vorgabe für die maximale Ladeleistung zu machen. Des Weiteren können die Zustände abgefragt und auf einer Visualisierungsseite dargestellt werden. Ein äußerst zukunftssträchtiges Thema im Bereich Elektroautos ist die Möglichkeit des bidirektionalen Ladens, bei dem elektrische Energie zurück in das Netz eingespeist werden kann. Dies setzt voraus, dass sowohl die Ladestation als auch das Elektroauto diese Funktionalität unterstützen. Die gleichen Möglichkeiten gelten, abgesehen vom bidirektionalen Energiefluss, auch für die Wärmepumpe.

6.3 Messung und Monitoring des optimierten Eigenverbrauchs

Zur Optimierung des Eigenverbrauchs ist es notwendig die Energiebedarfe und Energieerzeugung zu messen. Weiters ist auch ein Monitoring notwendig, dass auch auf aufgezeichnete Daten zugreift, um eine Wirksamkeit mitverfolgen zu können. Bei Bedarf sind auch dementsprechende Anpassungen an den Einstellwerten daraus ablesbar.

6.3.1 Methoden zur Messung des Eigenverbrauchs und der Effizienz

In Bezug auf die messtechnische Erfassung des Eigenverbrauchs sind zwei Messstellen vorgesehen. Die erste Messstelle befindet sich im Backup-Interface, das auch zur Netztrennung bei einem Netzausfall verwendet wird, um die Einrichtung eines Inselnetzes zur Eigenversorgung aus dem Speicher und der Photovoltaikanlage zu ermöglichen. Als zweite Messstelle ist der EVU-Smartmeter vorgesehen, um die Messung im Backup-Interface zu validieren.

Die Messwerte des Zählers im Backup-Interface und die Werte aus Abbildung 5.2.1 werden auf einer Visualisierungsseite des Quadclients am Homeserver dargestellt.



Abbildung 46: Visuseite Homeserver Quadclient Photovoltaikanlage

(Photovoltaikforum GmbH, 2010)

Eine detailliertere und übersichtlichere Anzeige ist mithilfe der App des Wechselrichter-Herstellers SolarEdge möglich (siehe Abbildung 47).

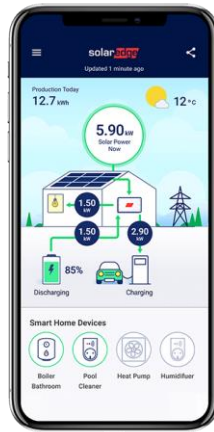


Abbildung 47: Ansicht App mySolarEdge

(SolarEdge Technologies Ltd., 2024)

6.3.2 Einrichtung eines Monitoring-Systems und Interpretation der Daten

Die Visualisierungsseite des Quadclients erfordert etwas mehr Aufwand, da Standardfelder verwendet und mit den entsprechenden Kommunikationsobjekten am KNX-Bus verknüpft werden. Diese Kommunikationsobjekte verbinden die einzelnen Werte mit den Anzeigefeldern. Hier werden auch das Anzeigesymbol, das Anzeigeformat und die Einheit als Suffix festgelegt.

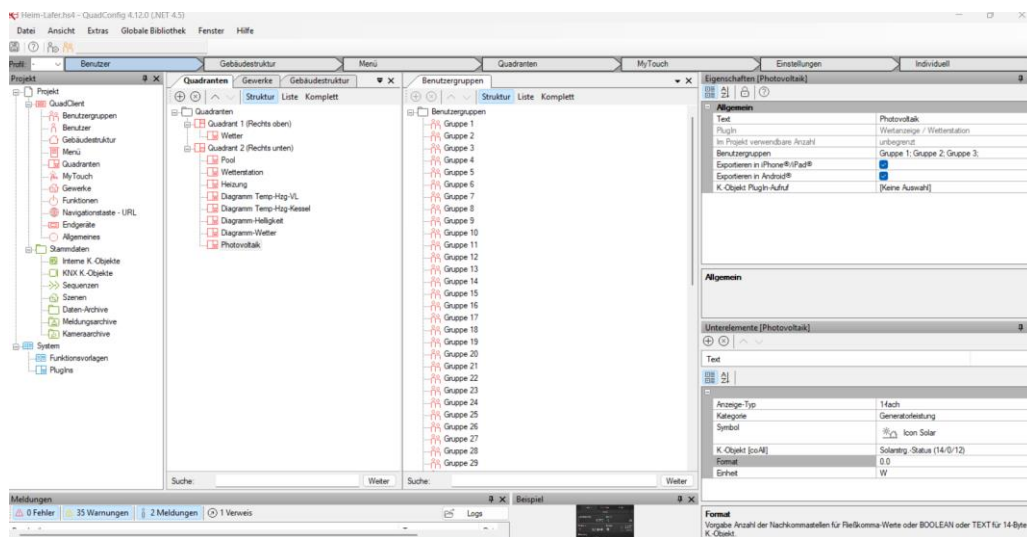


Abbildung 48: Screenshot Gira Homeserver QuadConfig mit Photovoltaik-Anzeigefelder

Quelle: Eigene Darstellung, Screenshot aus Gira Homeserver QuadConfig

Auf diese Weise werden schrittweise die einzelnen Anzeigefelder verknüpft. Abschließend wird das Diagramm hinzugefügt. Die Daten für das Diagramm stammen aus verschiedenen Archiven, die in den einzelnen Messwerten und Zeiträumen, nämlich täglich, wöchentlich, monatlich und jährlich, aufgezeichnet sind. Die einzelnen Archive sind aus Gründen des Speicherplatzes als Ringspeicher mit unterschiedlichen Aufzeichnungszyklen konfiguriert.

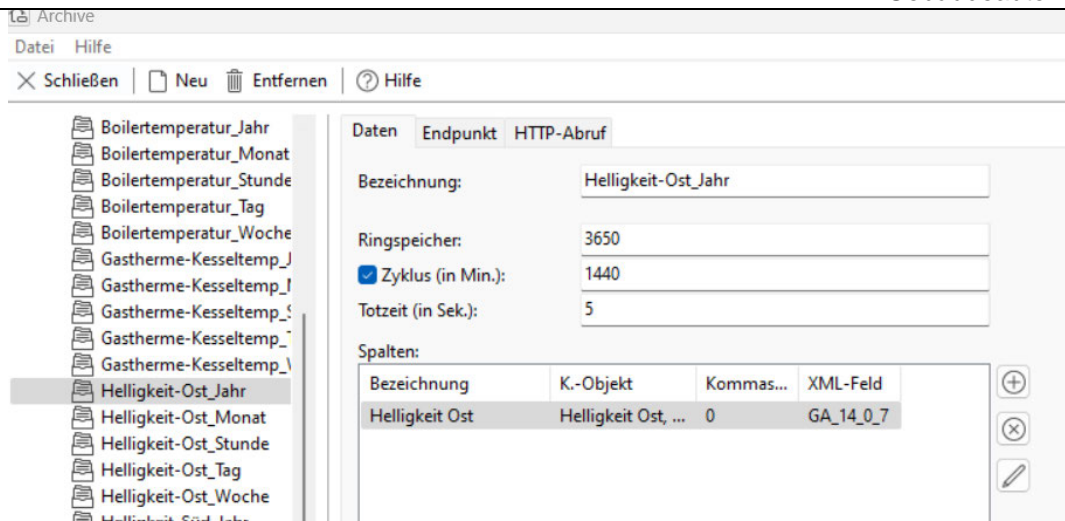


Abbildung 49: Screenshot Gira Homserver Archive

Quelle: Eigene Darstellung, Screenshot aus Gira Homserver Archive

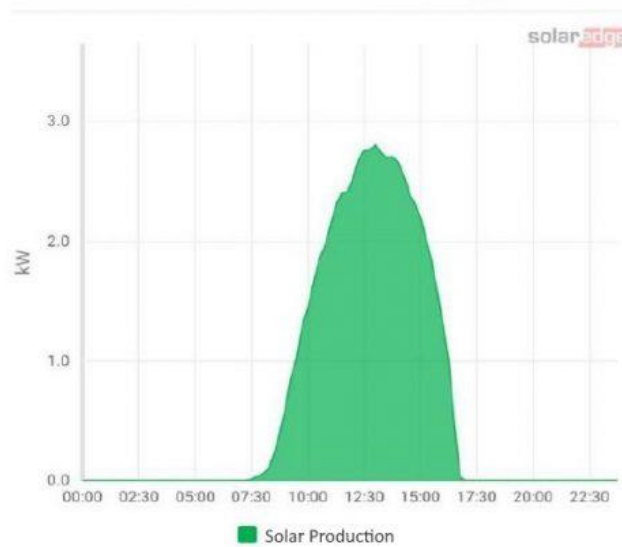
Die Einrichtung der Hersteller-App gestaltet sich komfortabler und einfacher. Hierzu muss lediglich die App auf dem Endgerät installiert, ein Benutzerkonto erstellt und der auf dem Typenschild aufgedruckte QR-Code gescannt werden. Damit ist die Einrichtung abgeschlossen.

6.3.3 Datengesteuerte Optimierung und Predictive Maintenance

Die individuellen Daten der Photovoltaikanlage sowie die Verbrauchsdaten des Wohnhauses werden in der Anwendung des Wechselrichterherstellers in übersichtlicher Form präsentiert. Dadurch lassen sich Verbrauchsspitzen identifizieren und bei Bedarf geeignete Maßnahmen ergreifen.

No Energy Meter

Power Production Monitoring



With Energy Meter

Power Production and Consumption Monitoring

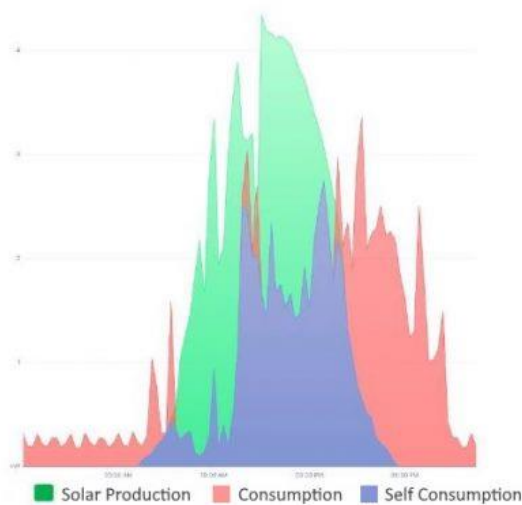


Abbildung 50: Verschiedene Energie-Tagesverläufe auf der App mySolarEdge

(SolarBright, 2022)

Ein weiterer äußerst nützlicher Aspekt besteht in der Möglichkeit, die individuellen Ertragswerte auf Modulebene abzurufen. Dadurch kann recht einfach festgestellt werden, ob und gegebenenfalls welches Modul Leistungseinbußen aufweist. Diese Leistungsabnahmen können verschiedene Ursachen haben, wie beispielsweise Verschmutzungen durch Laub oder auch Modulschäden, die mit bloßem Auge nicht erkennbar sind. Diese und weitere Überwachungsoptionen, wie die Temperaturüberwachung der Steckverbinder an den Leistungsoptimierern, können für die Zustandsüberwachung und die Ableitung von Wartungszeiten, also für Predictive Maintenance, herangezogen werden.

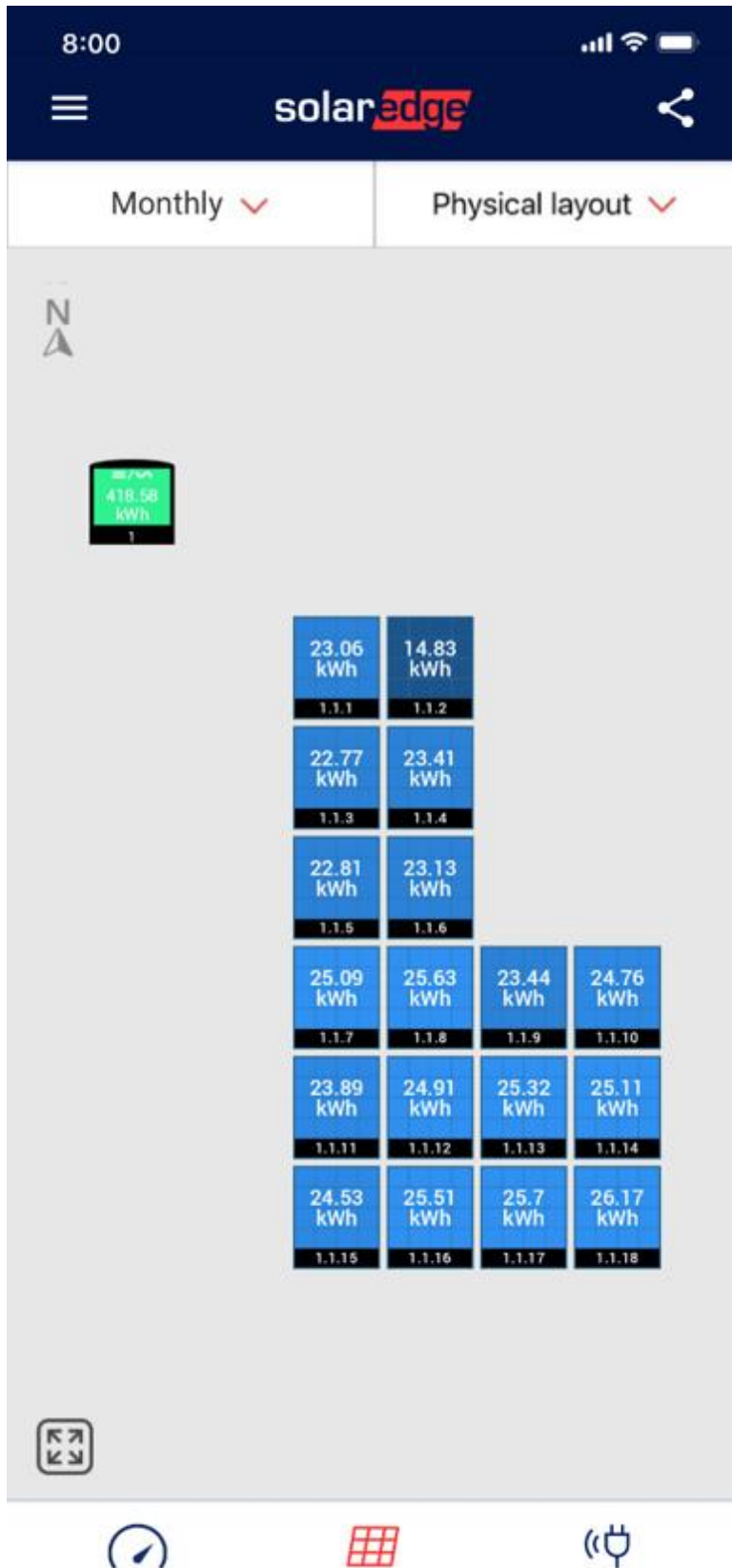


Abbildung 51: Modulmonitoring auf der App mySolarEdge
(SolarEdge Technologies Ltd., 2021)

7 Wirtschaftlichkeit und Rentabilität

7.1 Kostenanalyse und Amortisation

Eine Photovoltaikanlage ist mit hohen Investitionskosten verbunden und soll sich daher auch rechnen. Dafür ist eine Analyse der Kosten notwendig, um daraus die Amortisationszeit ermitteln zu können.

7.1.1 Übersicht über die Gesamtkosten der Anlage

Die Kosten der Photovoltaikanlage setzen sich aus verschiedenen Einzelposten zusammen. Hierzu gehören die PV-Module, welche jeweils mit einem Leistungsoptimierer ausgestattet sind, die beiden Hybrid-Wechselrichter, die jeweils über einen Energiespeicher verfügen, das Backup-Interface, das zur Netztrennung im Falle eines Netzausfalls dient, und die Unterkonstruktion. Zusätzlich wird ein Garantieverlängerungspaket für die Wechselrichter auf 25 Jahre erworben. Nicht zuletzt müssen auch die Kosten für die Montage und Inbetriebnahme berücksichtigt werden.

Die Zusammenfassung dieser Kosten ist in der folgenden Tabelle dargestellt:

Photovoltaikanlage							
Pos.	Beschreibung	Hersteller	Type	Menge	EH	Einzelkosten	Gesamtkosten
1	PV-Modul	JA Solar	JAM54S31-405/MR (1000V)	46	Stück	€ 97,00	€ 4 462,00
2	Leistungsoptimierer	Solaredge	S440	46	Stück	€ 49,17	€ 2 261,82
3	PV-Wechselrichter	Solaredge	SE8K-RWB48 Home Hub	2	Stück	€ 2 415,83	€ 4 831,66
4	PV-Wechselrichter Garantieverlängerung 25 Jahre	Solaredge	Garantieverlängerung auf 25 Jahre	2	Stück	€ 596,00	€ 1 192,00
5	PV-Speicher	Solaredge	9.2kWh SolarEdge Home Battery (48V)	2	Stück	€ 5 749,17	€ 11 498,34
6	Umschaltbox Netz-Ersatzbetrieb	Solaredge	Backup-Interface BI-EU3P	1	Stück	€ 1 007,50	€ 1 007,50
7	Unterkonstruktion			1	Set	€ 3 000,00	€ 3 000,00
8	Montage und Inbetriebnahme			1	Pauschale	€ 2 000,00	€ 2 000,00
9							
						Gesamt-Invest	€ 30 253,32

Tabelle 12: Aufstellung Investitionssumme Photovoltaikanlage

Quelle: Eigene Darstellung

7.1.2 Berechnung der Amortisationszeit und des ROI

Die Amortisationszeit der Photovoltaikanlage ist die Zeitspanne, in der sich die anfänglichen Investitionskosten durch die Reduzierung der Betriebskosten ausgleichen, was bedeutet, ab welchem Zeitpunkt mit einem Gewinn aus dem Betrieb der Anlage zu rechnen ist. Die englische Bezeichnung „Return on Investment“ (ROI) gibt die Rendite an, die über die Lebensdauer der Photovoltaikanlage erzielt werden kann. Da die PV-Module auf dem Dach voraussichtlich eine Lebensdauer von bis zu 30 Jahren haben, werden diese drei Jahrzehnte in beiden Berechnungen berücksichtigt.

Die Berechnung der Amortisation und des ROI erfolgt durch einen Vergleich der Investitionskosten für die Photovoltaik-Installation und der erwarteten Erträge. Bei der Variante mit der Photovoltaikanlage sind die anfänglichen Investitionskosten zwar höher, jedoch sind die laufenden Kosten deutlich niedriger als ohne die Photovoltaikanlage. Die laufenden Kosten umfassen jährliche Wartungskosten für Reinigung und gegebenenfalls die Arbeitsstunden eines Elektrofachmanns. Es wird auch eine eigene Versicherung berücksichtigt, die Schäden durch Wind, Hagel oder ähnliche Ereignisse abdeckt. Die Investitionsaufstellung für die Wechselrichter beinhaltet eine Garantieverlängerung auf 25 Jahre, daher wird nach Ablauf dieser Garantiezeit der Austausch beider Geräte eingeplant. Die beiden Energiespeicher bestehen aus LiFePO₄-Zellen und haben laut Tabelle 2 im Abschnitt 2.2.2 eine Lebensdauer von 15 Jahren.

Amortisationsrechnung PV-Anlage									
Jahresbezug elektrische Energie		4440 kWh		Jahresbezug elektr. Energie		14680 kWh			
Jahresverkauf elektrische Energie		5160 kWh							
JahresEigenverbrauch elektrische Energie		10240 kWh							

Mit PV-Anlage									
Jahr	Invest	Wechselrichter Tausch	Speicher Tausch	Wartung	Versicherung	Energieverkauf 0,08 ct/kWh	Energiebezug 0,28 ct/kWh	Jahrespreis	Mit PV-Anlage
0	€ 30 253,32	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 74,19	€ 0,00	€ 0,00	€ 30 327,51	€ 30 327,51
1	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 31 174,10
2	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 32 020,69
3	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 32 867,28
4	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 33 713,87
5	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 34 560,46
6	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 35 407,05
7	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 36 253,64
8	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 37 100,23
9	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 37 946,82
10	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 38 793,41
11	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 39 640,00
12	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 40 486,59
13	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 41 333,18
14	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 42 179,77
15	€ 0,00	€ 0,00	€ 11 498,34	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 12 344,93	€ 54 524,70
16	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 55 371,29
17	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 56 217,88
18	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 57 064,47
19	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 57 911,06
20	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 58 757,65
21	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 59 604,24
22	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 60 450,83
23	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 61 297,42
24	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 62 144,01
25	€ 0,00	€ 4 831,66	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 5 678,25	€ 67 822,26
26	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 68 668,85
27	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 69 515,44
28	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 70 362,03
29	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 71 208,62
30	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 200,00	€ 74,19	-€ 670,80	€ 1 243,20	€ 846,59	€ 72 055,21

Ohne PV-Anlage			
Jahr	Energiebezug 0,28 ct/kWh	Jahrespreis	Ohne PV-Anlage
0	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
1	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 4 110,40
2	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 8 220,80
3	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 12 331,20
4	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 16 441,60
5	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 20 552,00
6	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 24 662,40
7	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 28 772,80
8	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 32 883,20
9	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 36 993,60
10	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 41 104,00
11	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 45 214,40
12	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 49 324,80
13	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 53 435,20
14	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 57 545,60
15	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 61 656,00
16	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 65 766,40
17	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 69 876,80
18	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 73 987,20
19	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 78 097,60
20	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 82 208,00
21	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 86 318,40
22	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 90 428,80
23	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 94 539,20
24	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 98 649,60
25	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 102 760,00
26	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 106 870,40
27	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 110 980,80
28	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 115 091,20
29	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 119 201,60
30	€ 4 110,40	€ 4 110,40	€ 123 312,00

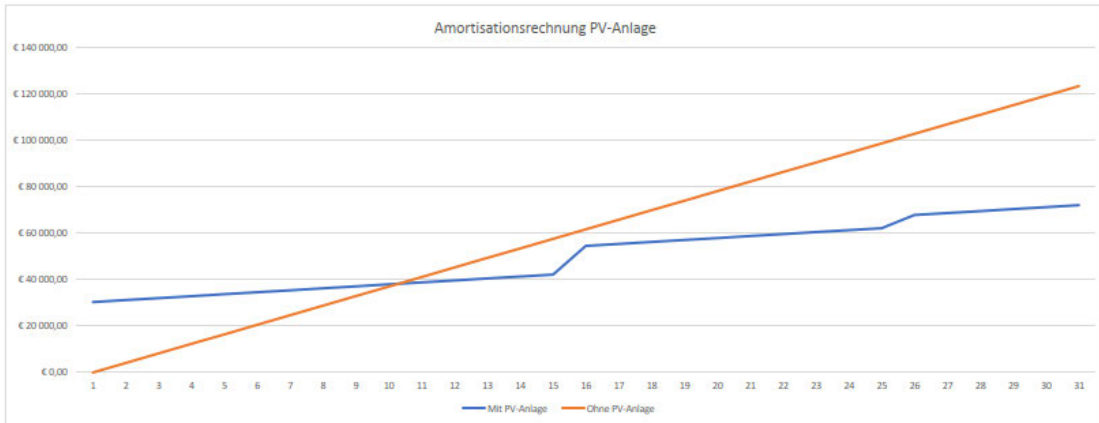


Tabelle 13: Amortisationsrechnung Photovoltaikanlage

Quelle: Eigene Darstellung

Die Ermittlung der Rendite einer Photovoltaikanlage basiert auf der Division des über einen Zeitraum von 30 Jahren generierten Gewinns durch die Höhe der getätigten Investition, wobei das resultierende Verhältnis anschließend mit 100 multipliziert wird.

$$ROI = \frac{\text{Gewinn}}{\text{Investition}} * 100 = \frac{123312 - 72055,21}{30253,32} * 100 = 169 \%$$

Es wird folglich eine Rendite von + 69 % erwartet.

7.2 Auswirkungen der Eigenverbrauchsoptimierung auf die Wirtschaftlichkeit

Die Eigenverbrauchsoptimierung hat nicht nur den Vorteil der rein physikalischen Unabhängigkeit vom Stromnetz, sondern auch einen wirtschaftlichen Vorteil. Je nachdem welche Wege die elektrische Energie, also Direktverbrauch von der Photovoltaikanlage oder mit dem Umweg über den Speicher, zurücklegt, sind unterschiedliche Kosten gegeben.

7.2.1 Energie- und Kosteneinsparungen durch erhöhten Eigenverbrauch

Diese vorherigen Berechnungen basieren auf dem Standard-Lastprofil H0. Wenn der Eigenverbrauch durch den verstärkten Einsatz der beiden Strategien Load-Shifting und Peak-Shaving gesteigert werden kann, ergibt sich eine verkürzte Amortisationszeit und damit eine höhere Rendite.

Dies setzt voraus, dass die Bewohner des Wohnhauses sich des Themas bewusstwerden und die Gebäudeautomation als Werkzeug in diesem Zusammenhang betrachten. Denn nur durch ihre Unterstützung ist eine optimale Anpassung der Automatismen an ihre Lebensgewohnheiten möglich. Weiterhin ist eine Steigerung des Eigenverbrauchs nur möglich, wenn die Bewohner bereit sind, ihr Energiekonsumverhalten an die Produktionszeiten der Photovoltaikanlage anzupassen, wodurch der Bezug von elektrischer Energie aus dem Netz reduziert werden kann. Dies führt zu niedrigeren Betriebskosten.

Ein wesentlicher Aspekt einer eigenen Photovoltaikanlage ist die Tatsache, dass die am eigenen Dach erzeugte Energie sehr niedrige Gestehungskosten aufweist. Die Gestehungskosten variieren je nachdem, ob die Energie direkt genutzt wird oder den Umweg über den Speicher nimmt.

Gestehungskosten ohne Speicher							
Pos.	Beschreibung	Hersteller	Type	Menge	EH	Einzelkosten	Gesamtkosten
1	PV-Modul	JA Solar	JAM54S31-405/MR (1000V)	46	Stück	€ 97,00	€ 4 462,00
2	Leistungsoptimierer	Solaredge	S440	46	Stück	€ 49,17	€ 2 261,82
3	PV-Wechselrichter	Solaredge	SE8K-RWB48 Home Hub	2	Stück	€ 2 415,83	€ 4 831,66
4	PV-Wechselrichter Garantieverlängerung 25 Jahre	Solaredge	Garantieverlängerung auf 25 Jahre	2	Stück	€ 596,00	€ 1 192,00
5	PV-Speicher	Solaredge	9.2kWh SolarEdge Home Battery (48V)	0	Stück	€ 5 749,17	€ 0,00
6	Umschaltbox Netz-Ersatzbetrieb	Solaredge	Backup-Interface BI-EU3P	1	Stück	€ 1 007,50	€ 1 007,50
7	Unterkonstruktion			1	Set	€ 3 000,00	€ 3 000,00
8	Montage und Inbetriebnahme			1	Pauschale	€ 2 000,00	€ 2 000,00
9	Betriebskosten auf 30 Jahre wie Wartung und Versicherung			1	Pauschale	€ 8 025,70	€ 8 025,70
10	PV-Wechselrichtertausch nach 25 Jahren	Solaredge	SE8K-RWB48 Home Hub	2	Stück	€ 2 415,83	€ 4 831,66
						Gesamt-Invest auf 30 Jahre	€ 18 754,98
						Gesamtproduktion auf 30 Jahre in kWh	462000,00
						Gestehungskosten ohne Speicher in ct/kWh	4,06

Gestehungskosten mit Speicher							
Pos.	Beschreibung	Hersteller	Type	Menge	EH	Einzelkosten	Gesamtkosten
1	PV-Modul	JA Solar	JAM54S31-405/MR (1000V)	46	Stück	€ 97,00	€ 4 462,00
2	Leistungsoptimierer	Solaredge	S440	46	Stück	€ 49,17	€ 2 261,82
3	PV-Wechselrichter	Solaredge	SE8K-RWB48 Home Hub	2	Stück	€ 2 415,83	€ 4 831,66
4	PV-Wechselrichter Garantieverlängerung 25 Jahre	Solaredge	Garantieverlängerung auf 25 Jahre	2	Stück	€ 596,00	€ 1 192,00
5	PV-Speicher	Solaredge	9.2kWh SolarEdge Home Battery (48V)	2	Stück	€ 5 749,17	€ 11 498,34
6	Umschaltbox Netz-Ersatzbetrieb	Solaredge	Backup-Interface BI-EU3P	1	Stück	€ 1 007,50	€ 1 007,50
7	Unterkonstruktion			1	Set	€ 3 000,00	€ 3 000,00
8	Montage und Inbetriebnahme			1	Pauschale	€ 2 000,00	€ 2 000,00
9	Betriebskosten auf 30 Jahre wie Wartung und Versicherung			1	Pauschale	€ 8 025,70	€ 8 025,70
10	PV-Wechselrichtertausch nach 25 Jahren	Solaredge	SE8K-RWB48 Home Hub	2	Stück	€ 2 415,83	€ 4 831,66
11	PV-Speichertausch nach 15 Jahren	Solaredge	9.2kWh SolarEdge Home Battery (48V)	2	Stück	€ 5 749,17	€ 11 498,34
						Gesamt-Invest auf 30 Jahre	€ 54 609,02
						Gesamtproduktion auf 30 Jahre in kWh	462000,00
						Gestehungskosten ohne Speicher in ct/kWh	11,82

Tabelle 14: Berechnung Gestehungskosten

Quelle: Eigene Darstellung

Wie deutlich erkennbar ist, weist die direkt von der Photovoltaikanlage erzeugte Energie die geringsten Gestehungskosten auf. Der größte Hebel liegt also darin, die Lasten in das Produktionszeitfenster der Photovoltaikanlage zu verschieben, unter Berücksichtigung der ausreichenden Produktion, um zusätzlichen Netzeinkauf zu vermeiden.

7.2.2 Langfristige finanzielle Vorteile der Gebäudeautomation

Wie aus der vorherigen Berechnung hervorgeht, besteht ein nahezu dreifacher Kostenunterschied, je nachdem, ob die elektrische Energie tagsüber direkt von der Photovoltaikanlage oder während der Dunkelzeiten aus dem Speicher entnommen wird. Dies bietet Möglichkeiten für weitere langfristige finanzielle Einsparungen.

8 Gesetzliche und regulatorische Aspekte

8.1 Gesetze und Verordnungen für Photovoltaikanlagen und Speicher

Natürlich unterliegt die Installation und der Betrieb von Photovoltaikanlagen einem Regelwerk mit Gesetzen und Verordnungen. Hiermit soll sichergestellt werden, dass die Anlage ohne Leistungseinbußen und schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt, installiert und betrieben werden kann.

8.1.1 Überblick über relevante Gesetze und Verordnungen

In Österreich gelten grundsätzlich die europaweiten Normen, wie in allen anderen EU-Staaten, wobei es teilweise nationale Ergänzungen gibt. Diese Normen sind auch im elektrotechnischen Bereich der Photovoltaik relevant.

In Österreich ist der Österreichische Verband der Elektrotechnik (OVE) für die elektrotechnischen Normen zuständig. Der OVE hat einige dieser Normen direkt übernommen und sie in deutscher Sprache mit möglichen nationalen Ergänzungen veröffentlicht. Diese Normen sind anhand der Bezeichnung „EN“ und des fünfstelligen Nummerncodes erkennbar. Andere sind in der elektrotechnischen Hauptnorm, der OVE E 8101, zusammengefasst.

Zusätzlich hat der OVE auch einige Richtlinien im Bereich der Photovoltaik und der dazugehörigen Speichertechnologie veröffentlicht:

OVE E 8101: 2019-01-01
OVE E 8101/AC1: 2020-05-01
OVE EN 62446-1:2019-05-01
OVE EN IEC 62446-2:2021-09-01
OVE-Richtlinie R 11-1:2022-05-01
OVE-Richtlinie R 11-3:2016-11-01
OVE-Richtlinie R 20:2016-11-01
OVE-Richtlinie R 6-2-1:2012-04-01
OVE-Richtlinie R 6-2-2:2022-05-01

(OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 2023)

Diese Normen und Richtlinien sind von großer Bedeutung für die Planung, Installation und den Betrieb von Photovoltaikanlagen.

8.1.2 Auswirkungen auf die Planung und die Installation der Photovoltaikanlage

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass neben den Normen des OVE auch Publikationen von anderen Institutionen und Behörden berücksichtigt werden müssen, wie beispielsweise das Steiermärkische Baugesetz.

Die Vielfalt dieser Normen und Richtlinien bietet eine ausgezeichnete Orientierungshilfe für die ordnungsgemäße Planung, Installation und den Betrieb von Photovoltaikanlagen. Es setzt jedoch voraus, dass die verantwortlichen Fachleute die Inhalte dieser Normen kennen und anwenden. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da eine unsachgemäße Planung und Installation einer Photovoltaikanlage sowohl eine Gefahr für das Gebäude selbst als auch für die Menschen in der Nähe darstellen kann.

Bei Einhaltung der Vorgaben aus diesen Schriften kann eine Photovoltaikanlage garantiert werden, die über Jahrzehnte hinweg den Witterungseinflüssen standhält und die Sonnenenergie mit hoher Effizienz in elektrische Energie umwandelt.

8.1.3 Änderungen und Trends in der regulatorischen Landschaft

Mit dem Anstieg der Popularität von Photovoltaikanlagen zu Beginn der 2010er-Jahre wurden immer mehr Normen, Richtlinien und vergleichbare Vorschriften entwickelt. In diesen Dokumenten werden kontinuierlich die neuesten Erkenntnisse integriert, sowohl im Bereich der Elektrotechnik als auch in anderen Gewerken, die von Photovoltaikanlagen betroffen sind. Dies betrifft beispielsweise die Berechnung der Dachlasten, die durch eine Photovoltaikanlage verursacht werden, sowie die mögliche Blendung, die von solchen Anlagen ausgehen kann.

Der Trend in der Normung im Bereich Photovoltaik zielt auf eine verstärkte Standardisierung der neu auf den Markt kommenden PV-Produkte sowie auf die Überarbeitung der bereits seit längerem erhältlichen Produkte und Installationsverfahren ab.

8.2 Genehmigungen und Zertifizierungen

Vor der Installation sind je nach Anlagengröße und Standort die regionalen gesetzlichen Vorgaben einzuhalten und Genehmigungen einzuholen. Die Photovoltaikanlage sollte auch nur von entsprechend gut geschulten oder zertifizierten Professionisten geplant und installiert werden, um einen sicheren und langen Betrieb zu ermöglichen.

8.2.1 Notwendige Genehmigungen und deren Einholung

Photovoltaikanlagen sind in Abhängigkeit von ihrer Leistung und der installierten Modulfläche zu klassifizieren, was auch die erforderlichen Genehmigungen variiert. Der Bundesverband PHOTOVOLTAIC AUSTRIA hat in diesem Zusammenhang eine übersichtliche Darstellung erstellt. Für das Bundesland Steiermark gestaltet sich die Situation wie folgt:



Abbildung 52: Auszug der in Steiermark geltenden Gesetze, Verordnungen aus der Schnellübersicht im Leitfaden ÜBERSICHT ZUR ANZEIGE- UND GENEHMIGUNGSPFLICHT VON PHOTOVOLTAIKANLAGEN

(Bundesverband Photovoltaic Austria, 2023)

Überdies sind auch die Vorgaben aus Bundesgesetzen und Bundesverordnungen zu berücksichtigen, wie die Gewerbeordnung, das Luftfahrtgesetz, das Wasserrechtsgesetz und das Wohnungseigentumsgesetz. Die geplante Photovoltaikanlage ist aufgrund ihrer Dimensionen und Leistung so geringfügig, dass lediglich eine Meldepflicht beim zuständigen Bauamt erforderlich ist. Für den Anschluss der Photovoltaikanlage muss ein Antrag beim zuständigen Verteilnetzbetreiber (VNB) gestellt werden.

Beim Bauamt ist aufgrund der Größe von 89,7 Quadratmetern, was 46 PV-Module des Typs JAM54S31-405/MR von JA-Solar entspricht, jeweils mit einer Fläche von etwa 1,95 Quadratmetern, lediglich die Mitteilung erforderlich, dass diese Anlage am Nebengebäude installiert wird. Ein aufwändigerer Prozess ist mit dem Antrag beim VNB verbunden. Die netzgebundene Photovoltaikanlage ist integraler Bestandteil der elektrischen Anlage und ist mit dem öffentlichen Netz verbunden. Daher hat ihr Betrieb Auswirkungen auf dieses externe Netz, und es ist notwendig, vor der Errichtung einen Antrag zu stellen.

In der Regel stellen die VNBs ein Formular zur Verfügung, in dem die Daten der bereits in Betrieb befindlichen Anlage sowie die Daten der geplanten Photovoltaikanlage angegeben werden. Der VNB

überprüft daraufhin, ob es aus Sicht des Netzbetriebs möglich ist, die Einspeiseleistung in das Netz am Netzanschlusspunkt zu gewährleisten und ob zusätzliche Anforderungen von ihm erfüllt werden müssen.

Anzeige einer Erzeugungsanlage gem. §17a EEWG 2010

Eingangsdatum _____

Ansuchen zur Erteilung einer Zählpunktnummer - Einspeisung Photovoltaikanlage



**Elektrizitätswerk Fernetz
purkarthofer**
Ing. Franz Purkarthofer GmbH & Co KG

8072 Fernetz-Mellach, Werkstraße 3
Tel: 03135/52554, Fax: 03135/52554-33
www.ewerkfernitz.at, office@ewerkfernitz.at

<p>Installationsumfang</p> <p><input type="checkbox"/> Photovoltaikanlage mit _____ kWp Wechselrichter-Typ: _____ mit _____ kW</p> <p><input type="checkbox"/> Überschusseinspeisung <input type="checkbox"/> Volleinspeisung</p> <p><input type="checkbox"/> Stromspeicher-Typ: _____ mit _____ kWh Anschlusspunkt <input type="checkbox"/> AC <input type="checkbox"/> DC</p> <p>Gewünschter Beginn der Einspeisung: _____</p> <p>Anzahl und Lage der Zählerplätze: _____</p> <p>Prognostizierte Jahresmenge: _____ kWh</p>	<p>Kundenangaben</p> <p>Nachname _____ Vorname _____</p> <p>Straße _____ Haus _____ Wng _____ Postleitzahl _____ Ort _____ Telefon _____</p> <p>Standort-Kundenanlage</p> <p>Straße _____ Haus _____ Wng _____ Postleitzahl _____ Ort _____ Telefon _____ Nähere Standortangabe (z.B. Grundstück-Nr., KG und Nachbar) _____</p>
--	---

Der Netzkunde ist gleichzeitig Betreiber der Photovoltaikanlage. Die Einspeisung in das Stromnetz erfolgt 3-phasig als Überschusseinspeisung*/(Direkteinspeisung*). Die Zählpunktnummer wird vom Verteilnetzbetreiber vergeben. Für den Anschluss der geplanten Photovoltaikanlage an das Netz des Verteilnetzbetreibers sind nachstehend angeführte Voraussetzungen zu erfüllen: Entsprechend der im behördlichen Bewilligungsbescheid für die o. a. Photovoltaikanlage anerkannten installierten Leistung, wird vom Verteilnetzbetreiber der technisch geeignete Anschlusspunkt festgelegt und werden die erforderlichen Anpassungsmaßnahmen ermittelt. Nach technischer Überprüfung und kaufmännischer Beurteilung wird mir ein Kostenvoranschlag übermittelt. Zwecks Überprüfung meiner Elektroinstallation für die Einspeisung von Photovoltaik-Strom werde ich nach Zuteilung der Zählpunktnummer einen Überprüfungstermin zwischen dem von mir beauftragten, behördlich befugten, Elektroinstallationsunternehmen und dem Verteilnetzbetreiber vereinbaren. Weiter nehme ich zur Kenntnis, dass erst nach Erhalt eines, den geltenden Vorschriften entsprechenden, vollständigen Elektrogutachtens über die Installation der Photovoltaikanlage, diese an das Netz der Elektrizitätswerk Fernetz Ing. Franz Purkarthofer GmbH & Co KG angeschlossen wird.

Auszug aus §17a EEWG 2010
Der Verteilnetzbetreiber kann binnen 4 Wochen nach vollständiger Anzeige durch den Netzbetreiber den Netzzutritt wegen begründeter Sicherheitsbedenken oder technischer Inkompatibilität der Systemkomponenten verweigern und einen anderen Netzanschlusspunkt vorschlagen. Die Verweigerung ist dem Netzbetreiber gegenüber nachvollziehbar zu begründen. Photovoltaikanlagen mit einer Engpassleistung bis 20 kW, die über einen bestehenden Anschluss als Entnehmer an das Netz angeschlossen werden, sind zu 100% des vereinbarten Ausmaßes der Netznutzung an das Verteilnetz anzuschließen, ohne dass hierfür ein zusätzliches Netzzutrittsentgelt anfällt.

Auszug aus §54 EEWG 2010
Für den Anschluss von Erzeugungsanlagen auf Basis erneuerbarer Energieträger auf den Netzebenen 3 bis 7 ist ein nach der Engpassleistung gestaffeltes, pauschales Netzzutrittsentgelt zu verrechnen. Sollten die tatsächlichen Kosten für den Anschluss der Erzeugungsanlage mehr als 175 Euro pro kW betragen, können die diesen Betrag überschreitenden Kosten dem Netzbetreiber gesondert in Rechnung gestellt werden.

<small>Die Lieferung und die Leistungen des EVU, wie z.B. die Herstellung oder die Abänderung des Hausanschlusses sind vom Kunden gesondert zu bestellen.</small>	Datum _____	Unterschrift des Kunden _____
---	-------------	-------------------------------

* nicht zutreffendes bitte streichen

EVU - Vermerke

Anlagennummer _____	
Vorzählerleitung _____	bestehendes Bezugsrecht _____
Netzsystem / Schutzmaßnahme _____	
Datum _____	
Stempel / Unterschrift - EVU _____	

Das oben genannte EVU stimmt den Ausführungen der Elektroinstallation nach den geltenden Vorschriften für Elektrotechnik (z.B. TAEV) und der ausgefüllten internen Installationsrichtlinien in der angeführten Kundenanlage im angegebenen Umfang zu.

Abbildung 53: Formular Ansuchen Photovoltaikanlage

(ELEKTRIZITÄTSMWERK FERNITZ ING. FRANZ PURKARTHOFFER GMBH & CO KG, 2024)

In der Rückmeldung gibt der VNB einige Informationen an:

- Ob die Einspeiseart, also Überschuss- oder Volleinspeisung möglich ist.
- Ob und in welcher Höhe die Einspeisung freigegeben wird.
- Die zeitliche Befristung, bis wann diese Freigabe gilt.

8.2.2 Umgang mit rechtlichen und bürokratischen Herausforderungen

Bei einer kleinen Photovoltaikanlage wie in diesem Fall sind die Anforderungen und Genehmigungsverfahren überschaubar. Bei größeren Anlagen mit mehr als 400 Quadratmetern Modulfläche sind jedoch erhebliche Planungsaufwände und Kosten zu berücksichtigen. Das Einreichen eines Antrags beim Verteilnetzbetreiber (VNB) stellt einen wesentlichen Teil der Anlagenplanung dar und erfordert eine vertiefte technische Analyse. Ab einer Leistung von mehr als 30 Kilowattpeak (kWp) wird beispielsweise ein sogenannter Netz-Anlagenschutz gefordert. Dieser trennt die Photovoltaikanlage automatisch im Falle von Abweichungen in Bezug auf Frequenz und/oder Spannung und versucht, sie gemäß einem festgelegten Verfahren erneut zu verbinden.

9 Fazit und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die in dieser Arbeit geplante Anlage zielt darauf ab, ein 3-Generationen-Wohnhaus im südlichen Grazer-Becken mit elektrischer Energie zu versorgen. Basierend auf dem elektrischen Energieverbrauch gemäß der letzten Jahresabrechnung und dem geplanten zusätzlichen Verbrauch durch eine Wärmepumpe und zwei Ladestationen für Elektroautos, ergibt sich ein Jahresbedarf von 14678 kWh elektrischer Energie. Dieser Wert diente als Ausgangspunkt für die Planung der Photovoltaikanlage. Ein nahezu unverbautes Dach am Nebengebäude mit entsprechend großer Fläche wurde für die Installation ausgewählt. Aufgrund der gewünschten schwarzstartfähigen Notstromfunktionalität und einer hohen Eigenverbrauchsquote wurden zwei Speicher mit insgesamt 18,4 kWh Kapazität eingeplant. Zusätzliche Installationen, wie eine Blitzschutzanlage, sind ebenfalls Teil der Planung, um das Risiko von Schäden an der Photovoltaikanlage zu minimieren.

9.2 Interpretation der Ergebnisse im Kontext der Forschungsfragen

Die Planung einer Photovoltaikanlage mit Speicher und der Vernetzung mittels einer KNX-Gebäudeautomation ist eine sehr projektspezifische Planungsarbeit. Es fließen hier die aktuellen, sowie die zukünftigen Energiebedarfe, genauso wie die freien Flächen, die zum Anbau der Photovoltaikanlage benötigt werden.

Bezüglich der ersten Forschungsfrage, die sich der Möglichkeit der Abdeckung des Jahresenergiebedarfs für ein spezifisches 3-Generationen-Wohnhaus widmet, kann mit Ja beantwortet werden. Für das ausgewählte reale Wohnhaus im südlichen Grazer Becken wurde ein zukünftiger Verbrauch von ca. 14,68 MWh berechnet. Dieser Energiebedarf wurde unter Einbeziehung des aktuellen Verbrauchs und Prognose der zukünftigen Elektrifizierung der Heizung und der Mobilität erstellt. Die geplante Photovoltaikanlage, konnte auf die verfügbaren Dachflächen am angedachten Nebengebäude mit einer Modul-Spitzenleistung von 18,63 kWp und einer maximalen Wechselrichterleistung von 16 kW konzipiert werden. Die verbaute Modulfläche umfasst dabei rund 90 m².

Die Photovoltaikanlage ist weiters mit einem Speicher geplant worden, da laut der zweiten Forschungsfrage es möglich ist mit dem passenden Speicher eine schwarzstartfähige Notstromfunktion bereit zu stellen. Für das exemplarisch gewählte Wohnhaus wurde aufgrund dieser gefragten Funktionalität, ein Speicher passend zum Hybrid-Wechselrichter mitprojektiert. Der gewählte Hybrid-Wechselrichter stellt die Funktionalität des Ladens des Speichers nur aus Photovoltaik-Energie bereit. Somit ist eine schwarzstartfähige Notstromfunktion gegeben. Die Größe des Speichers wurde mit Blick auf die Optimierung des Eigenverbrauchs und eines Notstromzeitfensters von neun Stunden auf 18,4 kWh festgelegt. Aufgeteilt wurde diese Speicher auf zwei gleich große 48 V Speicherpakete, wobei jedes einzelne Speicherpaket auf einen Wechselrichter einspeist.

Die dritte Forschungsfrage untersuchte die Anbindung der KNX-Gebäudeautomatisierung und die zu realisierenden Funktionen. Die Photovoltaikanlage wird über ein SolarEdge-KNX Gateway an das bestehende KNX-System im Wohnhaus angeschlossen. Über dieses Gateway werden alle relevanten Daten der Photovoltaikanlage, von der aktuellen AC-Leistung bis zu den Batterieladezuständen, ins KNX-System übermittelt. Im KNX-System werden die wichtigsten Daten auf einer eigenen Visu-Seite dargestellt und die Logiken zur Eigenverbrauchsoptimierung über den Gira Homeserver gesteuert. Diese Logiken regeln die Nutzung einzelner Geräte im Haus, wie die Waschmaschine und den Rasenmäroboter. Zukünftige Integrationen, wie die bisher nicht installierte Wärmepumpe und die beiden Ladestationen für Elektroautos, sind geplant. Auch bei zukünftigen Anschaffungen, wie einem neuen Geschirrspüler, wird auf die Konnektivität geachtet, um diese in das KNX-System zur Optimierung des Eigenverbrauchs einbinden zu können.

Literaturverzeichnis

- Alfons W. Gentner Verlag GmbH & Co. KG. (13. April 2021). *Smarte Sektorkopplung im Gebäude mit KNX*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Haustec: https://www.haustec.de/sites/default/files/styles/image_gallery_desktop/public/2021-03/knx_04.jpg.webp?itok=jKfIReFm
- Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA). (01. Jänner 2020). *Arbeiten auf Dächern, M 222*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von AUVA: <https://www.auva.at/cdscontent/load?contentid=10008.544604&version=1430386865>
- aWATTar GmbH. (01. Jänner 2024). *HOURLY*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von aWATTar: https://www.awattar.at/tariffs/hourly?utm_term=stromkosten%20aktuell&utm_campaign=at_de_google_search_leadfrom_prospecting_non-brand_strom&utm_source=google&utm_medium=cpc&hsa_acc=2610831308&hsa_cam=20411606399&hsa_grp=157552904091&hsa_a
- BATTERY 2030+. (01. Jänner 2024). *THE ROADMAP*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von battery2030: <https://battery2030.eu/wp-content/uploads/2021/09/Battery-hjul-version-2-beskuren-983x1024.png>
- BayWa r.e. AG. (18. Juli 2023). *SolarEdge Home Hub Wechselrichter-Dreiphasen System-Konfiguration (Ersatzstrom- und Storage-Modus)*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Solar-Distribution Baywa: https://solar-distribution.baywa-re.de/out/media/24-_Hybrid_WR_SExK-RWB48_Home_Hub_Inverter_Three_Phase_System_Configurations_Backup_and_Storage-Mode-de.pdf
- bChain. (01. Dezember 2022). *SmartHome*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von SmartHome-bChain: <https://smarhome.bchain.be/wp-content/uploads/2022/03/Peak-Shaving-Load-Shifting-1024x377.png>
- Bödeker, W., & Moebus, S. (15. Mai 2023). Das Paracelsus-Prinzip „Allein die Dosis macht, dass ein Ding (k)ein Gift sei“ - ein nicht mehr zeitgemäßer Lehrsatz und ätiologischer Mythos. *Prävention und Gesundheitsförderung*, S. 6. doi:<https://doi.org/10.1007/s11553-023-01037-4>
- Brenner Energie GmbH. (14. Oktober 2019). *Polykristallin vs. Monokristallin, eine Frage des Geschmacks?* Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Brenner Energie: <https://www.brenner-energie.de/files/assets/Grafiken/Mono-poly.jpg>
- Bundesverband Photovoltaic Austria. (01. November 2023). *Kurzversion-Leitfaden-zur-Anzeige-und-Genehmigungspflicht-von-PV-Anlagen*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Photovoltaic Austria: <https://pv-austria.at/wp-content/uploads/Kurzversion-Leitfaden-zur-Anzeige-und-Genehmigungspflicht-von-PV-Anlagen.pdf>
- (06. Jänner 2020). *Climatic Rating of Photovoltaic Modules: Different Technologies für Various Operating Conditions*. PVPS. Deutschland: IEA. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von IEA PVPS: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2021/02/Report-IEA-PVPS-T13-20_2020-Climatic-Rating-of-PV-Modules.pdf
- Cornelsen Verlag GmbH. (01. Jänner 2023). *Wörterbuch*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Duden: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Fotovoltaik>
- DEHN AUSTRIA GmbH. (01. Jänner 2011). *Downloads*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Dehn Austria: https://www.dehn.at/sites/default/files/media/files/DS710AT0121_Hohe_Aufl%C3%B6sung_Web_1.pdf

- Dr. Aribert Peters, Bund der Energieverbraucher e.V. (18. September 2004). *Die Stromformel für Verbraucher*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Bund der Energieverbraucher e.V.: https://www.energieverbraucher.de/de/bewertung-des-stromverbrauchs__646/ContentDetail__3449/
- Echtsolar. (26. Juni 2022). *Globalstrahlung – Werte, Tabelle & Erklärung*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Echtsolar: <https://echtsolar.de/globalstrahlung/>
- ECO ENERGY. (2024). *Lastprofile*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von ECO ENERGY: <https://shef-eco-energy.com/wp-content/uploads/2018/03/VDEW-Lastprofil-2.jpg>
- ELAUSYS SPRL. (01. Jänner 2024). *KNX-Schnittstelle for SolarEdge Inverters*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Elausys: <https://de.elausys.be/wp-content/uploads/2020/07/Connection-181x300.png>
- ELEKTRIZITÄTSWERK FERNITZ ING. FRANZ PURKARTHOFER GMBH & CO KG. (01. Jänner 2024). *PHOTOVOLTAIK*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von ewerkfernitz: <https://ewerkfernitz.at/wp-content/uploads/2022/04/Ansuchen-Photovoltaikanlage.pdf>
- Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft. (24. Juli 2016). *STECKERFERTIGE, NETZGEKOPPELTE KLEINST-PV-ANLAGEN*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von E-Control: <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/E-Control-Studie-KleinstPV.pdf/e83b42d4-235c-4b3c-9c57-780d1bb60dd1?t=1475681593836>;
- Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft. (18. April 2022). *TOR Erzeuger: Anschluss und Parallelbetrieb von Stromerzeugungsanlagen des Typs A und von Kleinsterzeugungsanlagen*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von E-Control: <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/TOR+Erzeuger+Typ+A+V1.2.pdf/0b3e3ab1-34c1-fc59-b422-514436713933?t=1649704105946>
- Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft. (01. Jänner 2024). *Ihr Stromverbrauch auf der Energierechnung*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von E-Control: https://www.e-control.at/newsletter-5/2022/-/asset_publisher/mg4CSkniK7cM/content/k-serie-rechnungen#:~:text=Ganz%20grob%20gesagt%2C%20verbraucht%20ein,ein%20Dreipersonen%2DHaushalt%204.200%20kWh
- EV Database (9-Five-9 Ventures BV). (01. Jänner 2024). *Volkswagen ID.3 Pro*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Electric Vehicle Database: <https://ev-database.org/de/pkw/1831/Volkswagen-ID3-Pro>
- EV Database (9-Five-9 Ventures BV). (01. Jänner 2024). *Volkswagen ID.7 Pro*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Electric Vehicle Database: <https://ev-database.org/de/pkw/1839/Volkswagen-ID7-Pro>
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. (23. September 2021). *Europäische Glas-Glas PV-Module sind besonders klimafreundlich*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2021/europaeische-glas-glas-pv-module-sind-besonders-klimafreundlich/jcr:content/fixedContent/pressArticleParsys/wideimage/imageComponent/image.img.3col.jpg/1634656935013/Layout-modul>.
- GEOPLEX GIS GmbH. (01. Jänner 2023). *Geoplex_Photovoltaik*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Geoplex: https://www.geoplex.de/fileadmin/user_upload/PDF_PV/Geoplex_Photovoltaik.pdf
- Günther, J.-M. (12. Juni 2013). Photovoltaikanlagen und der Schatten geschützter Bäume – Klima- und Naturschutz im Konflikt. *Natur und Recht*, S. 5. doi:DOI: 10.1007/s10357-013-2458-6

- iDM Energiesysteme GmbH. (29. November 2021). *Produktdatenbank*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von iDM Energie: https://admin.produktdatenbank-get.at/temp/20211223062614/810705_Produktdatenblatt_AERO_ALM_10-24_-_Rev.1.pdf
- ise Individuelle Software und Elektronik GmbH. (2024). *SMART CONNECT KNXe-charge II*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von ise: https://www.ise.de/fileadmin/_processed_/b/0/csm_Systemgrafik-e-charge-II-07-22_92cfe4fd74.png
- Klima- und Energiefonds. (01. August 2023). *Handlungsanleitung-fuer-die-Errichtung-von-PV-Anlagen*. Abgerufen am 08. Jänner 2024 von Klimafonds: <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/16/Handlungsanleitung-fuer-die-Errichtung-von-PV-Anlagen.pdf>
- KNX Association cvba. (01. Jänner 2024). *Smart home and building solutions*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von KNX: <https://www.knx.org/wGlobal/wGlobal/layout/images/knx-logo.png>
- KNX Association cvba. (01. Jänner 2024). *Unsere Vorgeschichte*. Abgerufen am 08. Jänner 2024 von KNX: <https://www.knx.org/knx-de/fuer-fachleute/Was-ist-KNX/knx-geschichte/>
- KNX Professionals Deutschland e.V. (2021). *KNX-Prof-Journal-2020*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von KNX-Professionals: <https://www.knx-professionals.de/knx-professionals/news/docs/KNX-Prof-Journal-2020.pdf>
- KNX Swiss. (01. Jänner 2024). *Technisches Grundwissen zu KNX*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von KNX: <https://www.knx.ch/knx-ch/technik/3-das-knx-grundprinzip.php>
- knx-user-forum e.V. (01. Jänner 2024). *Logikbaustein - 14360*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von knx-user-forum: https://service.knx-user-forum.de/?comm=get_LLicon&id=14360
- KURATORIUM FÜR ELEKTROTECHNIK (KFE). (01. September 2021). *Prüfbefund über eine Photovoltaikanlage*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von KFE: <https://shop.kfe.at/protokolle/eigenstaendige-protokolle/350/pruefbefund-ueber-eine-photovoltaikanlage?c=59>
- Land Steiermark, Landesamtsdirektion, Referat Kommunikation Land Steiermark. (01. Jänner 2024). *Durchschnittliche Globalstrahlung auf realer Fläche im Jahr*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Land Steiermark: https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/10703586_16178332/f5c0f0d0/global_rea_jahr.pdf
- Lömker - Elektrotechnik / Nord - Elektronik GmbH. (01. Jänner 2024). *KNX*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Lömker Eletrotechnik: <https://www.loemker-elektrotechnik.de/images/stories/KNX.jpg>
- men at work GmbH & Co. KG. (01. Jänner 2024). *Ausbildung Raumladungszone*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von men@work: http://www.work-crew.de/wordpress/wp-content/uploads/2011/05/ausbildung_raumladungszone.png
- men at work GmbH & Co. KG. (01. Jänner 2024). *Silizium*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von men@work: http://www.work-crew.de/wordpress/wp-content/uploads/2011/05/kristallstruktur_silizium_eigenleitung.png
- men at work GmbH & Co. KG. (01. Jänner 2024). *Störstellen*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von men@work: http://www.work-crew.de/wordpress/wp-content/uploads/2011/05/stoerstellenleitung_n-p-dotiertes_silizium.png
- MicroChemicals GmbH. (01. Juli 2021). *Vom Quarzsand zum Reinst-Silizium für Si-Wafer*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von MicroChemicals: https://www.microchemicals.com/uploads/pics/silizium_herstellung_metallurgisch_lichtbogenofen.jpg

- Nordkyn Design Ltd. (21. Februar 2021). *Lithium Battery Banks – Fundamentals*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Nordkyn Design: <https://nordkyndesign.com/wp-content/uploads/2015/09/LFP-internal.png>
- Österreichisches Institut für Bautechnik. (01. Mai 2023). *OIB-Richtlinien 2023*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von OIB: https://www.oib.or.at/sites/default/files/oib-ri_2_ausgabe_mai_2023.pdf
- OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik. (31. Jänner 2023). *Normen und Richtlinien für Photovoltaik-Anlagen*. Abgerufen am 08. Jänner 2024 von OVE: <https://www.ove.at/energiewende/news-zur-energiewende/detail/normen-und-richtlinien-fuer-photovoltaik-anlagen/>
- Photovoltaikforum GmbH. (08. März 2010). *Solarlog und Gira Homeserver*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Photovoltaikforum: <https://www.photovoltaikforum.com/core/attachment/69208-e63355f550aca45c73-jpg/>
- Photovoltaikforum GmbH. (30. April 2022). *Dünnschichtmodule - eine gute Wahl?* Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Photovoltaikforum: <https://www.photovoltaikforum.com/core/media/214-bildschirmfoto-2022-04-30-um-10-58-19-png/?thumbnail=large>
- Quaschnig, V. (01. Jänner 2013). *Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Volker Quaschnig: <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/2013-06-Dimensionierung-PV-Speicher/Bild1a.png>
- Quaschnig, V. (01. Jänner 2021). *So funktioniert eine Solarzelle*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Volker Quaschnig: <https://www.volker-quaschnig.de/artikel/pv-grundlagen/Abbildung2.png>
- Quaschnig, V. (01. März 2023). *Weltweit installierte Photovoltaikleistung*. Abgerufen am 01. Jänner 2024 von Volker Quaschnig: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/pv-welt/pv-welt.png>
- Schellong, W. (2016). *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen*. Berlin: Springer Vieweg. Abgerufen am 06. Jänner 2024
- Smart Building Services GmbH. (2024). *Automower, HomeServer Baustein zur Steuerung von Husqvarna Mährobotern*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von knxshop4u: https://www.knxshop4u.ch/media/images/org/13930_Automower_1.jpg
- SolarBright. (01. Jänner 2022). *The MySolarEdge App Revolutionising The Future Of Home Solar*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von SolarBright: <https://solarbright.com.au/wp-content/uploads/2023/03/mySolarEdge-app-2-484x1024-1.jpg>
- SolarEdge Technologies Ltd. (12. September 2021). *How mySolarEdge Helps System Owners Achieve Their Energy Goals*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von SolarEdge: <https://www.solaredge.com/sites/default/files/inline-images/blog08-Picture3.png>
- SolarEdge Technologies Ltd. (01. November 2022). *solaredge-home-fundamentals-brochure-de*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von SolarEdge: <https://knowledge-center.solaredge.com/sites/kc/files/solaredge-home-fundamentals-brochure-de.pdf>
- SolarEdge Technologies Ltd. (2024). *mySolarEdge*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von SolarEdge.
- Springer Gabler | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. (2024). *Prosument*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/prosument-54019>

- Sterner, M., & Stadler, I. (2014). *Energiespeicher Bedarf Technologien Integration*. Berlin: Springer Vieweg. Abgerufen am 06. Jänner 2024
- Verein „Österreichs E-Wirtschaft“. (26. September 2023). *Wechselrichterliste TOR Erzeuger Typ A*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von Österreichs Energie: <https://oesterreichsenergie.at/publikationen/ueberblick/detailseite/wechselrichterliste-tor-erzeuger-typ-a>
- Wesselak, V., & Voswinckel, S. (2012). *Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird*. Berlin: Springer Vieweg. Abgerufen am 06. Jänner 2024
- Wirtschaftskammer Österreich. (01. Jänner 2024). *Firmen WKO*. Abgerufen am 06. Jänner 2024 von WKO: <https://firmen.wko.at/elektrotechnik/>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich – Matthias Lafer – an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Sämtliche Stellen der Arbeit, die im Wortlaut oder dem Sinn nach Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder anderweitig veröffentlicht.

Ort, Datum

