

Web-Integration eines Optimierungsprogramms für Prosumernetze

Masterarbeit



Institut für Elektrische Anlagen und Netze
Technische Universität Graz

Vorgelegt von
Daniel Freydl, BSc

Betreuer
Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

Co-Betreuer
Dipl.-Ing. Martin Fürnschuß

Institutsleiter: Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I
Telefon: (+43 316) 873 – 7551
Telefax: (+43 316) 873 – 7553
<http://www.iean.tugraz.at>
<http://www.tugraz.at>

Graz / August 2022



Danksagung

Mit der Fertigstellung dieser Arbeit ist auch der Abschluss meines Elektrotechnik-Wirtschaft Masterstudiums an der TU Graz verbunden. Damit endet ein großer Lebensabschnitt, der nicht immer leicht war und mit einigen Herausforderungen verbunden war. Auf meinem Weg haben mich einige Personen unterstützt, bei denen ich mich bedanken möchte.

Zuerst möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Liebe Mama, liebe Sarah ihr seid die beste Unterstützung, die man sich nur wünschen kann und ich danke euch dafür, dass ihr mir dieses Studium ermöglicht habt.

Weiters möchte ich mich beim Institut für Elektrische Anlagen und Netze mit Institutsleiter Univ.-Prof. DDipl.-Ing. Dr.techn. Robert Schürhuber bedanken, welches mir die Möglichkeit zur Verfassung dieser Arbeit gegeben hat. Meinem Co-Betreuer Dipl.-Ing. Martin Fürnschuß sei an dieser Stelle besonderer Dank ausgesprochen, da ich mich mit meinen unzähligen Fragen jederzeit an ihn wenden konnte und er mich während meiner Arbeit immer unterstützt hat.

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 24.08.2022

Daniel Freydl, BSc

Kurzfassung

Steigende Energiepreise sorgen für eine steigende Nachfrage im Bereich der dezentralen Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, da mit ihnen die Erzeugungskosten reduziert werden können. Eigenständige Erzeugung führt auch zu einer gewissen Unabhängigkeit von klassischen Energiebereitstellern. Durch die Installation dezentraler Erzeugeranlagen werden klassische Konsumenten auch zu Produzenten, diese werden auch als Prosumer bezeichnet. Prosumer sind aber weiterhin mit dem Energieversorgungsnetz verbunden.

Die Installation von dezentralen Erzeuger- und Speicheranlagen für zB Elektrizität, Wärme oder Kälte bringt auch hohe Investitionskosten und auch laufende Kosten mit sich, weshalb die Dimensionierung und der optimale Einsatz der einzelnen Komponenten zur Herausforderung wird. Mittels Optimierungsalgorithmen kann bereits in der Planungsphase Erkenntnisse über die optimale Größe der einzelnen Komponenten erlangt werden. Ziele der Optimierung können zB die Minimierung der jährlichen Energiekosten oder die maximale Unabhängigkeit vom Energieversorgungsnetz sein.

Am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz ist ein Programm namens ProsOpt für die Optimierung von Prosumerhaushalten entwickelt worden. Das Programm verfügt über keinerlei Benutzeroberfläche und zusätzlich zu einer MATLAB¹ Lizenz benötigen Nutzer ein detailliertes Wissen über den Aufbau des Programms, um es richtig bedienen zu können.

Ziel dieser Masterarbeit ist es die Benutzerfreundlichkeit von ProsOpt wesentlich zu verbessern. Umgesetzt wird dies mittels einer Webapplikation, die es Nutzern mittels einer grafischen Oberfläche ermöglicht, das Programm zu bedienen.

Weiters wird ProsOpt um einer Verschattungsanalyse für Photovoltaikanlagen erweitert, da Objekte in der Nähe von Photovoltaikanlagen durch die Schatten, die sie auf diese werfen, den Ertrag deutlich mindern können. Dazu wird ein bestehendes Programm, ebenfalls vom Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz adaptiert und in ProsOpt integriert.

Mit der integrierten Verschattungsanalyse werden zwei Szenarien mit ProsOpt berechnet. Die Szenarien stellen einen Haushalt dar, der mittels einer PV-Anlage sowie einem elektrischen Energiespeicher zu einem Prosumerhaushalt gemacht werden soll.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Optimierung sehr stark von den standortspezifischen Bedingungen abhängig ist. Jedes Prosumersystem ist daher individuell zu betrachten. Anhand zweier berechneter unterschiedlicher Szenarien für Prosumersysteme ist erkennbar, dass die Verschattung von PV-Anlagen einen wesentlichen Einfluss auf die Dimensionierung von Prosumersystemen sowie auf die ökonomischen und energetischen Erträge hat.

Schlüsselwörter: Photovoltaik, Prosumer, Autonomie, lineare Optimierung, Verschattung, Web-Integration

¹ numerisches Rechenprogramm: © The MathWorks Inc. URL: <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>. Letzter Abruf am 19.08.2022

Abstract

Rising energy prices are creating increasing demand in the area of distributed generation from renewable energy sources, as they can be used to reduce generation costs. Independent generation also leads to a certain independence from classic energy providers. By installing decentralized generation systems, classic consumers also become producers; these are also referred to as prosumers. Prosumers, however, are still connected to the energy supply network.

The installation of decentralized generation and storage systems for e.g. electricity, heating or cooling also entails high investment costs and running costs, which is why the dimensioning and optimal use of the individual components becomes a challenge. By means of optimization algorithms, knowledge about the optimal size of the individual components can be obtained already in the planning phase. Goals of the optimization can be, for example, the minimization of the annual energy costs or the maximum independence from the energy supply network.

At the Institute of Electrical Power Systems at TU Graz, a program called ProsOpt has been developed for the optimization of prosumer households. The program does not have any user interface and in addition to a MATLAB license, users need a detailed knowledge about the structure of the program to be able to use it properly. The goal of this master thesis is to significantly improve the usability of ProsOpt. This will be achieved by means of a web application that allows users to operate the program via a graphical user interface.

Furthermore, ProsOpt will be extended by a shading analysis for photovoltaic systems, since objects in the vicinity of photovoltaic systems can significantly reduce the yield due to the shadows they cast on them. For this purpose, an existing program, also developed by the Institute of Electrical Power Systems at TU Graz, will be adapted and integrated into ProsOpt.

With the integrated shading analysis, two scenarios are calculated with ProsOpt. The scenarios represent a household that is to be turned into a prosumer household by means of a PV system as well as an electrical energy storage system.

The results show that optimization is highly dependent on site-specific conditions. Therefore, each prosumer system has to be considered individually. Based on two calculated different scenarios for prosumer systems, it can be seen that the shading of PV systems has a significant influence on the dimensioning of prosumer systems as well as on the economic and energetic yields.

Keywords: Photovoltaic, prosumer, autonomy, linear optimization, shading analysis, web-integration

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
2 Prosumer	11
2.1 Photovoltaik	11
2.2 Wärmepumpen	13
2.3 Elektrische Energiespeicher	14
2.3.1 Direktes Laden	14
2.3.2 Verzögertes Laden	14
2.3.3 Peak-Shaving	14
2.3.4 Prognosebasiertes Laden	14
2.4 Eigenverbrauchsgrad	15
2.5 Autonomiegrad	15
3 Thermischer Energiebedarf	16
3.1 Wärmeübertragung	17
3.2 Luftaustausch	17
3.3 Sonneneinstrahlung	18
4 Optimierung	19
4.1 ProsOpt – Prosumer Optimization	19
4.2 Lineare Optimierung	20
4.3 Optimierung in ProsOpt	21
4.3.1 Levelized Cost of Energy (LCE)	21
4.4 ProsOpt – Szenarien	22
4.4.1 Szenario 1	22
4.4.2 Szenario 2	22
4.4.3 Szenario 3 und Szenario 4	22
4.4.4 Szenario 5	22

4.4.5	Szenario 6 und 7	22
4.4.6	Szenario 10	22
4.4.7	Szenario 11	23
4.4.8	Szenario 12	23
5	Verschattungsanalyse	24
5.1	Berechnung der Bestrahlungsstärke auf ein PV-Modul	24
5.2	NOCT-Methode	27
5.3	Einfluss der Verschattung	28
6	Web-Integration.....	30
6.1	Übersetzung in eine andere Programmiersprache	30
6.2	Verwendung von weiteren MathWorks-Produkten	30
6.3	ProsOpt-Weboberfläche	31
6.4	Hauptseite	32
6.4.1	Szenario	33
6.4.2	Allgemeine Daten	34
6.4.3	Netzanschluss	34
6.4.4	Gebäudekonfiguration	35
6.4.5	Geografische Daten.....	37
6.4.6	Leitungen.....	37
6.4.7	Photovoltaik.....	38
6.4.8	Verschattungsanalyse	40
6.4.9	Elektrofahrzeug	41
6.4.10	Elektrischer Energiespeicher	41
6.4.11	Solarthermie	41
6.4.12	Wärmepumpen und Klimaanlage.....	42
6.4.13	Thermische Energiespeicher	43
6.4.14	Gasheizung	44
6.4.15	Fernwärme	44
6.4.16	Zielfunktion	44
6.4.17	Während der Berechnungen.....	46
6.4.18	Fehlerfall.....	46

6.5	Ergebnisse	46
6.5.1	Eigenverbrauchs- und Autonomiegrad.....	47
6.5.2	Heiz- und Kühlbedarf	47
6.5.3	Temperaturen	48
6.5.4	PV-Anlage	49
6.5.5	Speicherstände.....	50
7	Berechnungen.....	51
7.1	Szenario 1	51
7.1.1	Ökonomische Parameter	53
7.1.2	Methode	53
7.1.3	Ergebnisse	54
7.1.4	Zusammenfassung	63
7.2	Szenario 2	64
7.2.1	Ökonomische Parameter	64
7.2.2	Ergebnisse	64
7.3	Zusammenfassung	70
8	Zusammenfassung und Ausblick	73
9	Literatur	75
10	Anhang.....	77
10.1	ProsOpt-Konfiguration	77



Abkürzungsverzeichnis

AG	Autonomiegrad
CSV	Comma Separated Values
EVG	Eigenverbrauchsgrad
ProsOpt	Prosumer Optimization; Programm zur Optimierung von Prosumersystemen [1]
Prosumer	Producer and consumer; Erzeuger und Verbraucher
PV	Photovoltaik
SOC	engl. State of Charge, Ladezustand

1 Einleitung

Mit dem steigenden Einsatz von Photovoltaikanlagen in Österreich werden die klassischen elektrischen Verbraucheranlagenbetreiber zu Prosumern. Sie sind in der Lage, einen Teil ihres elektrischen Energiebedarfs selbst zu decken. Dadurch entsteht eine gewisse Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz. Durch Wärmepumpen kann ein Gebäude auch thermisch von öffentlicher Versorgungsinfrastruktur wie Gas oder Fernwärme unabhängig werden.

Es entstehen hybride Energiesysteme, in denen das elektrische und thermische Energiesystem gekoppelt sind. Durch Speichertechnologien können Prosumer die selbst erzeugte Energie zwischenspeichern, um sie bei Bedarf selbst zu verbrauchen.

Mit der Vielzahl an Komponenten, die somit an der Deckung des Energiebedarfs eines Gebäudes beteiligt sind, steigt auch die Schwierigkeit der Dimensionierung und des optimalen Betriebs der einzelnen Komponenten.

Mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen kann der Einsatz der Systemkomponenten anhand von vorgegebenen Bedingungen zielgerecht gesteuert werden. Ein bestehendes Programm, welches am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz entwickelt worden ist, nennt sich ProsOpt (Prosumer Optimization). Es ist von DI Dr.techn. Mike Alexander Lagler im Zuge seiner Dissertation entwickelt worden [1].

Ziel dieser Masterarbeit ist die Entwicklung einer web-basierten Benutzeroberfläche für das Programm ProsOpt, sodass das Programm der Öffentlichkeit zugänglich ist. Zusätzlich soll das Programm um eine Verschattungsanalyse erweitert werden, welche die Auswirkung durch Verschattung umliegender Kubaturen auf den Ertrag der PV-Anlage ermittelt. Ein Programm zur Ermittlung der Verschattungsverluste ist ebenfalls am Institut für Elektrische Anlagen und Netze von DI Martin Fürnschuß im Zuge seiner Masterarbeit entwickelt worden [2].

Mit der Erweiterung von ProsOpt um die Verschattungsanalyse, wird ermittelt, inwieweit die Verschattung von PV-Anlagen eine Auswirkung auf vorgegebene Optimierungsziele auf Prosumersysteme hat.

Anhand von Berechnungsbeispielen wird gezeigt, inwieweit durch Anschaffung eines PV-Speichersystems für einen Einfamilienhaushalt eine Senkung der jährlichen Energiekosten möglich ist.

2 Prosumer

Das Kofferwort *Prosumer* setzt sich aus den beiden englischen Wörtern *producer* und *consumer* zusammen und beschreibt im Bereich der Energietechnik Anlagenbetreiber, die einen Teil ihres Energiebedarfs selbst produzieren können, aber auch Energie von anderen Anbietern beziehen oder selbst erzeugte (überschüssige) Energie über einen Anschluss an ein Energieversorgungsnetz veräußern können. Möglich wird das durch Technologien wie zum Beispiel der Photovoltaik (PV). Diese bringt sowohl einen gewissen Grad der Autonomie als auch eine ökonomische Entlastung oder auch einen Gewinn mit sich.

2.1 Photovoltaik

Die Erzeugung elektrischer Energie aus der Kraft der Sonne mittels Photovoltaik (PV) findet in Österreich seit Jahren großen Anklang. Wie in Abbildung 2-1 ersichtlich ist, hat sich die jährlich neu installierte PV-Leistung in Österreich von 2020 auf 2021 mehr als verdoppelt.

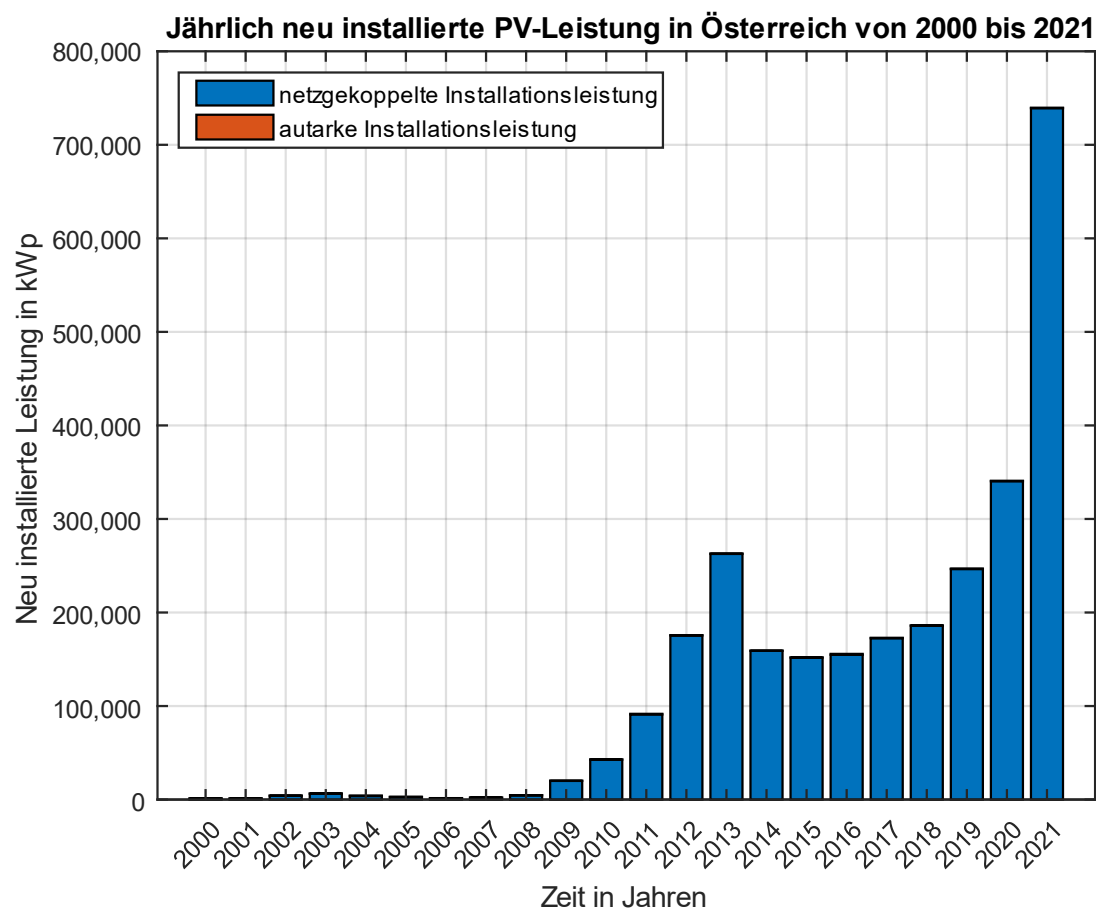


Abbildung 2-1: Jährlich neu installierte PV-Leistung in Österreich von 2000 bis 2021 (nach Tabelle 25 [3])

Auch in der kumulierten Installationsleistung ist der Wachstumstrend deutlich zu sehen:

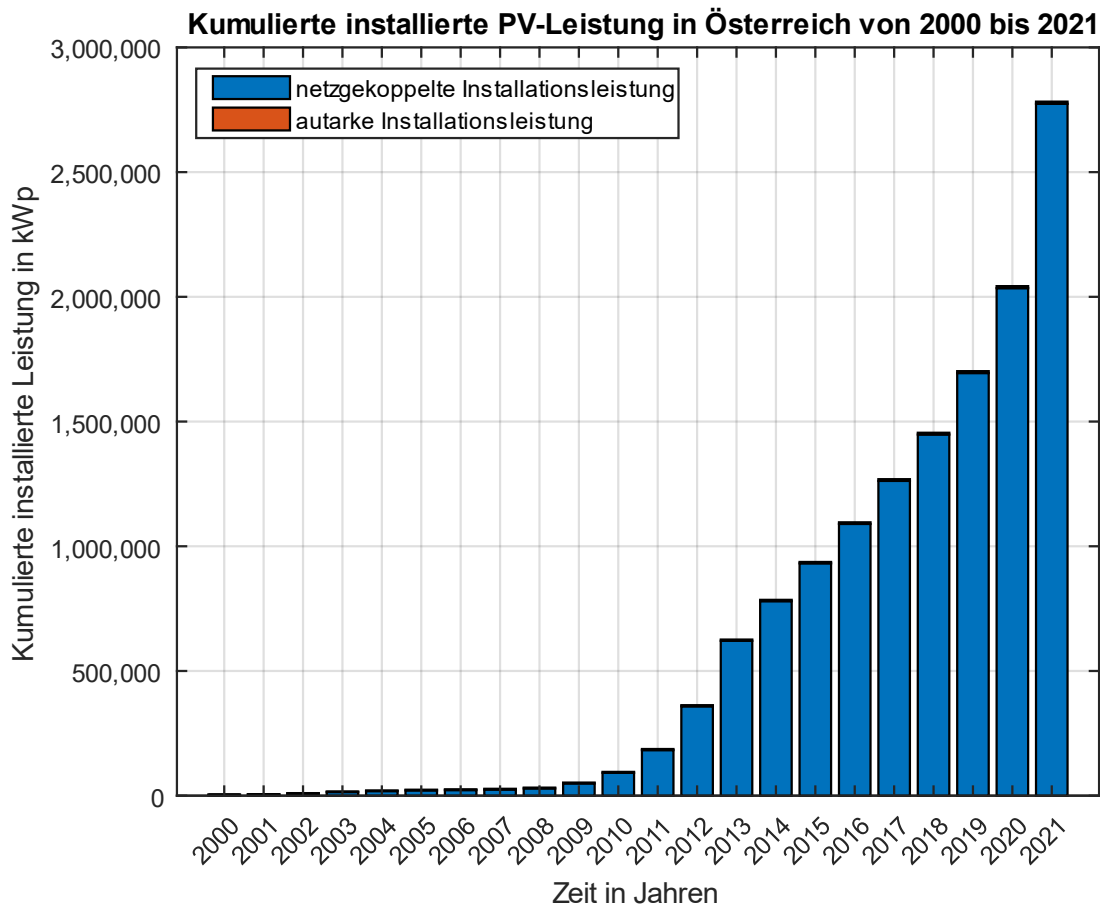


Abbildung 2-2: Kumulierte installierte PV-Leistung in Österreich von 2000 bis 2021 (nach Tabelle 26 [3])

Seit 2016 hat sich die kumulierte installierte PV-Leistung mehr als verdoppelt. Derzeit umfasst die installierte PV-Leistung in Österreich bereits über 2,5 GWp. Mit den aktuell steigenden Energiepreisen wird eine PV-Anlage für immer mehr Menschen interessant, da sie mit ihr zumindest einen Teil ihres elektrischen Energiebedarfs decken können. Durch die Eigenerzeugung entsteht für den Betreiber eine ökonomische Entlastung. Zusätzlich ist der Betreiber nicht mehr vollständig auf das öffentliche Stromnetz angewiesen.

Weiters werden in immer mehr Gebäuden Wärmepumpen und Klimaanlage installiert, um den thermischen Wärme- und Kühlbedarf zu decken, welche im Betrieb auch elektrische Energie benötigen. Dieser Energiebedarf kann zum Teil mittels einer PV-Anlage gedeckt werden.

2.2 Wärmepumpen

Eine Wärmepumpe erzeugt mit Hilfe zugeführter Energie höhertemperierte Nutzwärme aus einer Niedertemperaturquelle. In der Wärmepumpe befindet sich ein Wärmemittel, welches in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Durch ein Expansionsventil wird das Wärmemittel unter die Umgebungstemperatur abgekühlt. Da das Wärmemittel nun kälter als die Umgebung ist, kommt es zu einem Wärmestrom von der Umgebung zum Wärmemittel. Anschließend wird das Wärmemittel in einem Verdichter komprimiert, dadurch wird die Temperatur des Wärmemittels über die Temperatur des Heizkreislafs gehoben. Es kommt zu einem Wärmestrom vom Wärmemittel zum Heizkreislauf. Die so erzeugte Nutzwärme kann dann für die Heizung von Gebäuden oder zur Erzeugung von Warmwasser genutzt werden. Als Wärmequelle bietet sich zum Beispiel die Umgebungsluft, Grund- oder Oberflächenwasser aber auch das Erdreich an. Die Effizienz der Wärmepumpe hängt hierbei von der Temperaturdifferenz zwischen der Wärmequelle und dem Heizungssystem ab. Je höher diese ist, desto effizienter arbeitet die Wärmepumpe [4], [5].

Wie in Abbildung 2-3 zu sehen ist, werden Heizungswärmepumpen in Österreich immer beliebter, da sie im Gegensatz zu klassischen Heizungsanlagen wie Öl-, Gas- oder Holzheizungen keinen Brennstoff benötigen. Stattdessen ist zur Erzeugung der Nutzwärme zB elektrische Energie erforderlich. Durch eine PV-Speicheranlage kann die elektrische Energie, die zum Betrieb der Wärmepumpe notwendig ist, zum Teil selbst erzeugt werden.

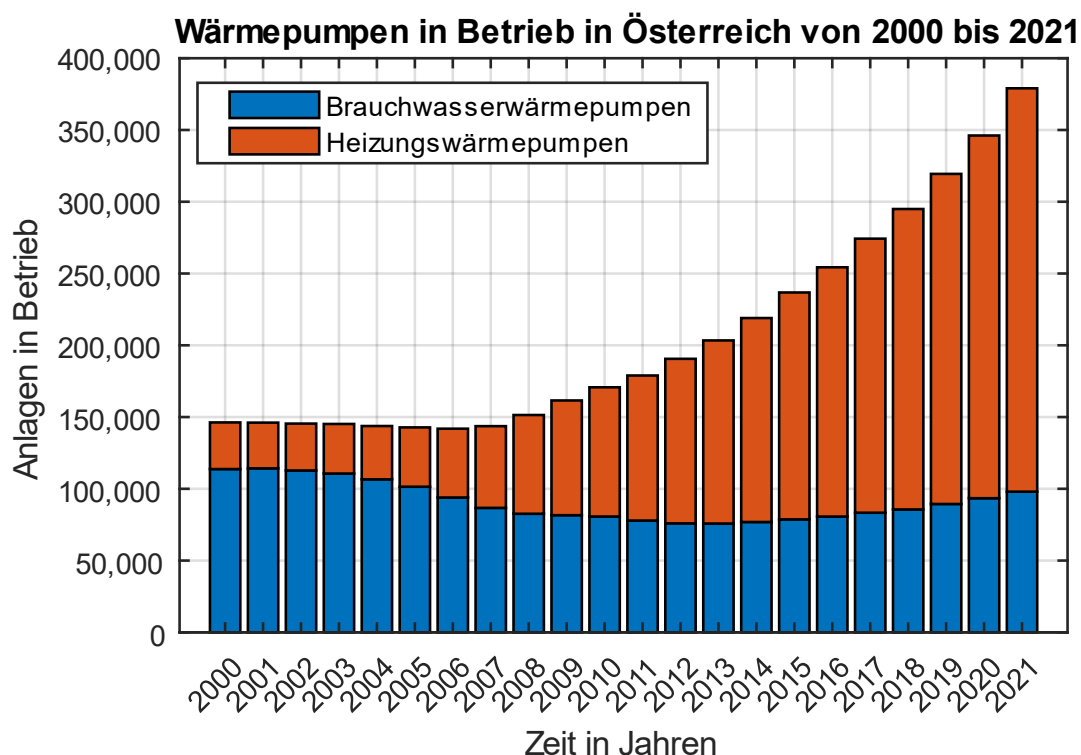


Abbildung 2-3: Wärmepumpen in Betrieb in Österreich von 2000 bis 2021 (nach Tabelle 61 in [3])

2.3 Elektrische Energiespeicher

Da die Erzeugung elektrischer Energie aus PV-Anlagen abhängig vom Wetter ist, sind elektrische Energiespeichersysteme ein Weg, um die Nutzung der selbst erzeugten elektrischen Energie auch an Tagen geringen Ertrages oder in der Nacht zu ermöglichen.

Für die Speicherung von elektrischer Energie, welche aus PV-Anlagen erzeugt wird, werden hauptsächlich Akkumulatoren eingesetzt. Akkumulatoren wandeln während der Aufladung elektrische Energie in chemische Energie um. Beim Entladen wird die chemische Energie wieder in elektrische Energie umgewandelt [6].

Durch die Maximierung des Eigenverbrauchs von Energie aus PV-Anlagen, kann eine Entlastung des Stromnetzes bewirkt werden, da der benötigte Strom direkt vor Ort erzeugt und verbraucht wird, und nicht über das Netz transportiert werden muss [7].

Für den Betrieb eines elektrischen Energiespeichers gibt es verschiedene Möglichkeiten:

2.3.1 Direktes Laden

Der erzeugte Strom aus der PV-Anlage wird direkt verbraucht, um den elektrischen Energiebedarf des Betreibers zu decken. Ist die Erzeugung höher als der Verbrauch, wird mit der überschüssigen Energie der Speicher geladen. Fällt die Erzeugung unter den Verbrauch, so wird die elektrische Energie wieder aus dem Speicher entnommen [7].

2.3.2 Verzögertes Laden

Das verzögerte Laden dient dazu, Einspeisungsspitzen zu verhindern. Es wird hierbei der erzeugte Strom der PV-Anlage teilweise eingespeist und teilweise in den Speicher geladen, bis der Speicher einen vorgegebenen Ladezustand erreicht hat [7].

2.3.3 Peak-Shaving

Beim Peak-Shaving wird der Speicher nur geladen, wenn die Erzeugung aus der PV-Anlage eine vordefinierte Grenze erreicht. Das dient dazu, hohe Einspeisespitzen zu verhindern. Dadurch kann eine Entlastung des Stromversorgungsnetzes erreicht werden. Allerdings sinkt auch die Priorität eines hohen Eigenverbrauchs [7].

2.3.4 Prognosebasiertes Laden

Last- und Wetterprognosen entscheiden bei dieser Methode darüber, wann das Laden bzw. Entladen des Speichers vorteilhaft ist. Der Eigenverbrauchsgrad (EVG) erreicht ähnlich hohe Werte wie beim direkten Laden, gleichzeitig kann eine Entlastung des Netzes erzielt werden [7].

2.4 Eigenverbrauchsgrad

Der Eigenverbrauchsgrad (EVG) gibt an, wie viel von der selbst erzeugten elektrischen Energie direkt vom Verbraucher genutzt wird [4], [8]. Der EVG für einen Betrachtungszeitraum T lässt sich nach Gleichung (1) berechnen.

$$EVG(T) = \frac{\sum_{n=1}^T P_{Erz.} \Delta t - \sum_{n=1}^T P_{Netz,Rück.} \Delta t}{\sum_{n=1}^T P_{Erz.} \Delta t} \quad (1)$$

$P_{Erz.}$	Erzeugerleistung
$P_{Netz,Rück.}$	Rückspeiseleistung
Δt	Zeitschritt

In ProsOpt beträgt der Zeitschritt Δt standardmäßig 15 Minuten. Für Zeiten, in denen keine Erzeugung stattfindet, wird in dieser Arbeit der EVG als null definiert. ProsOpt liefert als Ergebnis den EVG über den gesamten Berechnungszeitraum. Dieser wird als Durchschnitt der einzelnen Viertelstundenwerte gebildet.

2.5 Autonomiegrad

Der Autonomiegrad (AG) gibt an, wie unabhängig der Prosumer ist. Ein AG von 100 % bedeutet, dass der Prosumer die gesamte benötigte Energie selbst erzeugen kann. Der AG lässt sich nach Gleichung (2) berechnen.

$$AG(T) = \frac{\sum_{n=1}^T P_{Erz.} \Delta t - \sum_{n=1}^T P_{Netz,Rück.} \Delta t}{\sum_{n=1}^T P_{Erz.} \Delta t - \sum_{n=1}^T P_{Netz,Rück.} \Delta t + \sum_{n=1}^T P_{Netz,Bez.} \Delta t} \quad (2)$$

$P_{Erz.}$	Erzeugerleistung
$P_{Netz,Rück.}$	Rückspeiseleistung
$P_{Netz,Bez.}$	Bezugsleistung
Δt	Zeitschritt

3 Thermischer Energiebedarf

ProsOpt betrachtet das Prosumersystem als hybrides Energiesystem. Das thermische und elektrische System des Prosumers sind über Technologien wie Wärmepumpen, Klimaanlage oder thermische Speicher miteinander verbunden. Zur Ermittlung der optimalen Einsatzzeiten dieser Technologien, ist es notwendig, den Bedarf an thermischer Energie für das betrachtete Gebäude zu kennen. Der thermische Bedarf ist definiert als die Menge an Energie, die notwendig ist, um die Temperatur in einem Raum oder Gebäude zu halten. ProsOpt berechnet daher vor der Optimierung den Bedarf an Wärme und Kälte für das zu untersuchende Gebäude [1].

Der gesamte Energiebedarf eines Gebäudes hängt von internen und externen Faktoren ab. Die internen Faktoren sind interne Wärmequellen wie zB Beleuchtung, Haushaltsgeräte oder Personen, welche sich im Gebäude aufhalten. Externe Faktoren sind die Sonneneinstrahlung auf das Gebäude, die Übertragung von Wärme zwischen dem Gebäude und der Umwelt, sowie der Austausch von Luft zwischen dem Gebäude und der Umwelt [1], [9].

Der Heiz- oder Kühlbedarf in Wh errechnet sich nach Gleichung (3).

$$W_{h,k}(t) = (V_{Luft} \cdot c_{Luft} \cdot \rho_{Luft} + C_{sp}) \cdot \frac{\Delta \vartheta_i(t)}{3600} + Q_i(t) - Q_T(t) - Q_V(t) + Q_S(t) \quad (3)$$

ϑ_i	Innenraumtemperatur in °C
ρ_{Luft}	Dichte der Luft in kg/m ³
V_{Luft}	Raumluftvolumen in m ³
c_{Luft}	Spezifische Wärmekapazität von Luft in Ws/kgK
C_{sp}	Wärmespeicherkapazität des Gebäudes in Ws/K
Q_i	interne Wärmequellen und -senken in Wh
Q_T	Wärmegewinne/-verluste durch Wärmeübertragung zwischen Gebäude und Umwelt in Wh
Q_V	Wärmegewinne/-verluste durch Luftaustausch zwischen Gebäude und Umwelt in Wh
Q_S	Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung in Wh

Die Wärmespeicherkapazität des Gebäudes wird in ProsOpt mittels eines vereinfachten Ansatzes aus der ÖNORM B 8110-6 1:2019-01 berechnet und ist in Gleichung (4) dargestellt [1], [10].

$$C_{SP} = f_b \cdot V \quad (4)$$

f_b	Spezifische Wärmespeicherkapazität in Wh/m ³ K
V	Bruttovolumen des Gebäudes in m ³

Der Faktor f_b wird in der Norm für verschiedene Gebäudebauweisen definiert, beispielhaft für Gebäude in Holzbauart ohne massive Innenbauteile wird ein Wert von 10 Wh/m³K empfohlen [10].

Um die Berechnung zu vereinfachen, werden in ProsOpt die einzelnen Räume eines Geschosses zu einer Zone zusammengefasst. Für jede Zone werden die entsprechenden Wärmegewinne und -verluste berechnet [1].

3.1 Wärmeübertragung

Wärmeübertragung entsteht unter den Zonen selbst und zwischen den Zonen und der Umwelt. In jeder Zone werden die einzelnen Außenwände, sowie die Decke und der Boden separat betrachtet, um die Wärmeübertragung zu berechnen. Anhand von Gleichung (5) kann die Wärmeübertragung für eine Fläche einer Zone berechnet werden [1].

$$Q_{T,i}(t) = \sum_{j=1}^N (U_{eq\ i,j} \cdot A_{i,j} + \Delta U_{tb}) \cdot (\vartheta_{in,i}(t) - \vartheta_{out\ i,j}(t)) \quad (5)$$

$U_{eq\ i,j}$	Wärmedurchgangskoeffizient der betrachteten Fläche in W/m ² K
$A_{i,j}$	Fläche m ²
ΔU_{tb}	Wärmebrückenkorrekturfaktor in W/m ² K
ϑ_{in}	Innenraumtemperatur in °C
ϑ_{out}	Außentemperatur in °C, Luft, Erde oder Innenraumtemperatur einer anderen Zone
i	Aktuell betrachtete Zone
j	betrachtete Fläche der Zone

3.2 Luftaustausch

Wärmeaustausch durch Luftströmung kann durch Fenster und Türen entstehen, oder durch mechanische Belüftungssysteme. Die entsprechenden Wärmegewinne und -verluste lassen sich nach Gleichung (6) berechnen.

$$Q_{V,i}(t) = n_i \cdot V_i \cdot (\vartheta_{in,i} - \vartheta_a) \quad (6)$$

n_i	Luftaustauschrate in h ⁻¹
V_i	Volumen der betrachteten Zone in m ³
ϑ_{in}	Innenraumtemperatur in °C
ϑ_a	Außentemperatur in °C
i	aktuell betrachtete Zone

3.3 Sonneneinstrahlung

Durch die Energie der Sonne wird das Gebäude aufgeheizt. Die Berechnung für die Wärmegewinne durch Sonneneinstrahlung auf transparente Flächen wie zB Glas erfolgt nach Gleichung (7) [1], [9].

$$Q_{Sw,i}(t) = \sum_{j=1}^N E_{F\,i,j}(t) \cdot F_F \cdot F_{cs}(t) \cdot g_{i,j} \cdot A_{i,j} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$E_{F\,i,j}$	Bestrahlungsstärke auf die aktuelle Fläche in W/m ²
F_F	Reduktionsfaktor für Fensterrahmen
F_{cs}	Reduktionsfaktor für Sonnenschutzsysteme
$g_{i,j}$	wirksamer Gesamtenergiedurchlassgrad
$A_{i,j}$	Fläche in m ²
Δt	Zeitschritt in h
i	Aktuell betrachtete Zone
j	Betrachtete Fläche der Zone

Für nicht transparente Flächen wie zB Wände erfolgt die Berechnung nach Gleichung (8) [1], [9].

$$Q_{So,i}(t) = \sum_{j=1}^N U_{i,j}(t) \cdot A_{i,j} \cdot R_{se} \cdot (\alpha_{s\,i,j} \cdot E_{F\,i,j}(t) - F_f \cdot h_r \cdot \Delta \vartheta_{er}) \cdot \Delta t \quad (8)$$

$E_{F\,i,j}$	Bestrahlungsstärke auf die aktuelle Fläche in W/m ²
$\alpha_{s\,i,j}$	Absorptionsgrad der Fläche
F_f	Formfaktor (0,5 für senkrechte Wände, ansonsten 1)
h_r	äußerer Abstrahlungskoeffizient in W/m ² K
$U_{i,j}$	Wärmedurchgangskoeffizient der betrachteten Fläche in W/m ² K
R_{se}	Wärmeübergangswiderstand in m ² K/W
$A_{i,j}$	Fläche m ²
Δt	Zeitschritt in h
$\Delta \vartheta_{er}$	Temperaturdifferenz Außenluft/Himmel
i	aktuell betrachtete Zone
j	betrachtete Fläche der Zone

4 Optimierung

Der Begriff *Optimierung* bedeutet, etwas zu verbessern. Gegenstand dieser Verbesserung können zB Werkzeuge, Prozesse oder vollständige Systeme sein. Man versucht mittels frei einstellbarer Stellschrauben ein Modell so zu beeinflussen, dass sich eine messbare Ergebnissituation verbessert. Ein Teilgebiet der Mathematik beschäftigt sich mit der formalen Beschreibung und Lösung solcher Optimierungsprozesse. Das Modell des Systems wird als Problem oder Optimierungsproblem bezeichnet. Mit Hilfe von mathematischen Algorithmen soll die bestmögliche Lösung für dieses Optimierungsproblem gefunden werden. Die Stellschrauben des Problems werden als Parameter bezeichnet [11].

Bezogen auf Prosumersysteme lassen sich verschiedene Optimierungsprobleme definieren. Technische Ziele sind zB die Maximierung des Autonomiegrads, um möglichst unabhängig zu sein oder die Maximierung des Eigenverbrauchsgrads, um einen möglichst großen Anteil der selbst erzeugten Energie selbst zu verbrauchen. Ökonomische und ökologische Optimierungen wie zB die Minimierung der jährlichen Energiekosten oder die Minimierung des CO₂-Ausstoßes können ebenfalls im Interesse von Prosumern sein.

4.1 ProsOpt – Prosumer Optimization

Am Institut für elektrische Anlagen und Netze der TU Graz ist im Zuge der Dissertation von DI Dr.techn. Mike Lagler ein Programm zur Optimierung von Prosumersystemen entstanden. Das Programm nennt sich ProsOpt, ist als MATLAB-Funktion implementiert und kann mittels gemischt ganzzahliger linearer Optimierung den optimalen Einsatz der verfügbaren Systeme, unter einer vom Benutzer definierten Zielvorgabe, bestimmen. Das Programm unterstützt verschiedene Optimierungsziele wie zB die Minimierung der jährlichen Energiekosten oder die Maximierung des Autonomiegrads.

ProsOpt koppelt das thermische und elektrische Teilsystem des Prosumers, um ein optimal dimensioniertes hybrides Energiesystem zu erhalten [1].

4.2 Lineare Optimierung

Die lineare Optimierung bietet Methoden, um das Minimum oder Maximum einer linearen Zielfunktion $F(x)$ zu finden. Der Vektor x beschreibt die Parameter, die vom Optimierungsalgorithmus verändert werden können, um eine optimale Lösung zu finden. Die Funktion kann durch lineare Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen eingeschränkt werden. Die mathematische Beschreibung eines linearen Optimierungsproblems ist in Gleichung (9) dargestellt.

$$\min_x \mathbf{c}^T \cdot \mathbf{x} \text{ subject to } \begin{cases} \mathbf{A}_{\text{neq}} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}_{\text{neq}} \\ \mathbf{A}_{\text{eq}} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{\text{eq}} \\ \mathbf{l}_b \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{u}_b \end{cases} \quad (9)$$

$\mathbf{x}$	Variablen
$\mathbf{A}_{\text{neq}}, \mathbf{A}_{\text{eq}}$	Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungsmatrizen
$\mathbf{b}_{\text{neq}}, \mathbf{b}_{\text{eq}}$	Konstanten für Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen
$\mathbf{l}_b, \mathbf{u}_b$	Unter- und Obergrenzen für die Variablen
$\mathbf{c}^T$	Zielfunktion

Abbildung 4-1 zeigt ein grafisches Beispiel für ein lineares Optimierungsproblem. Gegeben ist eine lineare Funktion, welche abhängig von den zwei Variablen X_1 und X_2 ist. Die linke Abbildung zeigt den Lösungsraum für die Funktion in grau. Durch das Hinzufügen von linearen Bedingungen, kann der Lösungsraum, in dem der Optimierungsalgorithmus nach Lösungen sucht, eingeschränkt werden.

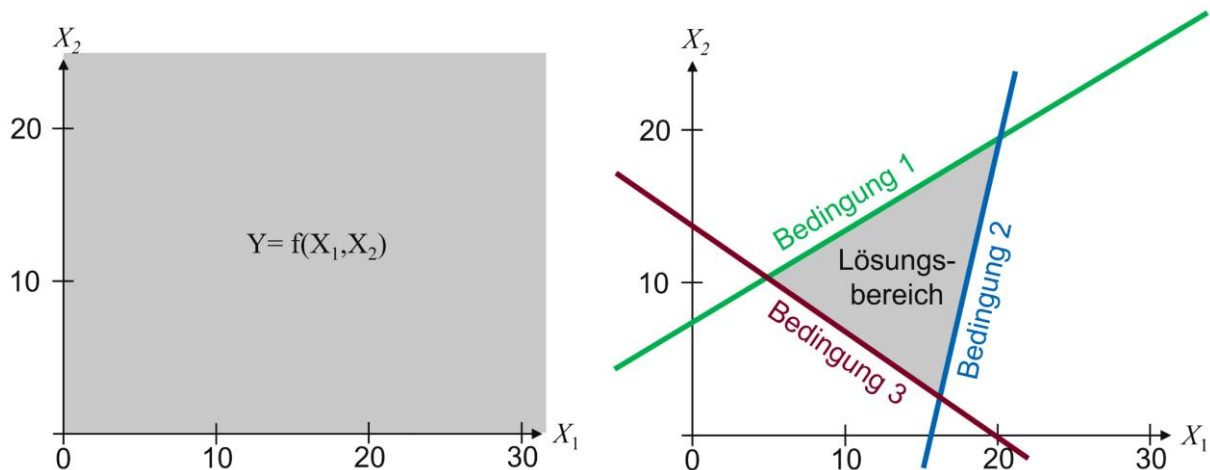


Abbildung 4-1: Grafisches Beispiel eines linearen Optimierungsproblems

4.3 Optimierung in ProsOpt

ProsOpt verwendet das gemischt ganzzahlige Optimierungsverfahren. Das bedeutet, dass Werte für bestimmte Variablen des Optimierungsproblems auf ganze Zahlen beschränkt werden können. ProsOpt nutzt dieses Verfahren, da zB die Heizpatrone im Modell des thermischen Energiespeichers nur ein- oder ausgeschaltet sein kann. Die Werte für diese Variable sind daher auf null und eins beschränkt.

Ein wichtiger Teil der Optimierung in ProsOpt ist die Einbeziehung der zukünftigen Wetterverhältnisse, sowie das Verbraucherverhalten und die Erzeugungsprognosen der Erzeugungsanlagen, um den optimalen Einsatz der einzelnen Komponenten zu erreichen. ProsOpt führt die Optimierung standardmäßig alle 15 Minuten durch. Für die Optimierung dieses Zeitbereichs wird eine Vorhersage für die nächsten 72 Stunden herangezogen. Im Moment verwendet ProsOpt ideale Vorhersagen, das bedeutet, dass die Vorhersage mit den tatsächlichen Werten der Zukunft genau übereinstimmt.

Die Optimierungsfunktion, die in ProsOpt implementiert ist, hat als Ziel, die jährlichen Energiekosten des Prosumers zu minimieren. Um die jährlichen Energiekosten zu minimieren, ist es notwendig, jeder Technologie einen Preis zuzuweisen, mit dem der Optimierungsalgorithmus die Technologie bewertet. ProsOpt benutzt hierfür die sogenannten Levelized Cost of Energy (LCE) [1].

4.3.1 Levelized Cost of Energy (LCE)

Die LCE beziehen die Investitionskosten und die laufenden Kosten, die während dem Betrieb einer Anlage entstehen auf die Nutzung der Anlage. Die Berechnung erfolgt mittels Kapitalwertmethode, wie in Gleichung (10) dargestellt.

$$LCE = \frac{I_0 + \sum_{j=1}^n \frac{A_j}{(1+i)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{W_j}{(1+i)^j}} \quad (10)$$

I_0	Investitionskosten in €
A_j	laufende Kosten für das Jahr j in €
W_j	Nutzung der Anlage für das Jahr j in kWh
n	erwartete Lebensdauer der Anlage in Jahren
i	Zinssatz

Jeder Technologie in ProsOpt wird vor Start der Berechnung ein Wert für die LCE vom Benutzer zugewiesen. Aufgrund dieses Wertes entscheidet der Optimierungsalgorithmus, ob, wann und in welchem Maße eine Technologie eingesetzt wird [1].

Beispielhaft werden nachfolgend die LCE für eine PV-Anlage ermittelt: Die PV-Anlage besteht aus 10 Modulen und besitzt eine Leistung von 2,55 kWp. Die Investitionskosten betragen 900 €/kWp. Die Investitionskosten der Anlage betragen somit 2295 €.

Die jährlichen Betriebskosten werden mit zwei Prozent der Investitionskosten angenommen und belaufen sich auch 45,0 € pro Jahr. Die Lebensdauer wird mit 25 Jahren angenommen, der Zinssatz wird mit 2,8 %.

Die Anlage produziert pro Jahr 2,68 MWh an elektrischer Energie.

Mit diesen Werten ergibt sich durch Einsetzen in Gleichung (10) für die PV-Anlage ein LCE von 0,0651 €/kWh.

4.4 ProsOpt – Szenarien

ProsOpt unterstützt mehrere unterschiedliche Szenarien für die Berechnung. Die Szenarien repräsentieren die unterschiedlichen Technologien, die ein Prosumer einsetzen kann.

4.4.1 Szenario 1

Szenario 1 repräsentiert ein Vergleichsszenario ohne Prosumertechnologien. Der komplette elektrische Energiebedarf wird aus dem Netz bezogen. Der Heiz- und Warmwasserbedarf wird durch Fernwärme gedeckt. Zur Kühlung ist eine Klimaanlage installiert.

4.4.2 Szenario 2

Szenario 2 erweitert Szenario 1 um eine PV-Anlage und die Möglichkeit zur Rückspeisung elektrischer Energie in das Netz.

4.4.3 Szenario 3 und Szenario 4

Szenario 3 und 4 erweitern Szenario 2 um ein Elektrofahrzeug. In Szenario 3 wird das Fahrzeug nur als Last betrachtet, Szenario 4 benutzt einen Teil des Fahrzeugs als V2G/G2V-Speicher.

4.4.4 Szenario 5

Szenario 5 erweitert Szenario 2 um einen fest installierten elektrischen Energiespeicher.

4.4.5 Szenario 6 und 7

Szenario 6 und 7 basieren auf Szenario 2 und ersetzen die Fernwärme mit einer Wärmepumpe, um den Heiz- und Warmwasserbedarf zu decken. Szenario 7 beinhaltet zusätzlich einen thermischen Energiespeicher mit Heizkartusche.

4.4.5.1 Szenario 8 und 9

Szenario 8 und 9 erweitern Szenario 6 und 7 jeweils um einen fest installierten elektrischen Energiespeicher.

4.4.6 Szenario 10

Szenario 10 fügt zu Szenario 6 ein Elektrofahrzeug als Last hinzu.

4.4.7 Szenario 11

Szenario 11 erweitert Szenario 9 um ein Elektrofahrzeug.

4.4.8 Szenario 12

Szenario 12 basiert auf Szenario 2 und besitzt keine Klimaanlage.

Zur Übersicht sind die Szenarien, sowie die Technologien, die pro Szenario aktiv sind, in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: ProsOpt Szenarien

Technologie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Fernwärme	✓	✓	✓	✓	✓	x	x	x	x	x	x	✓
Netzbezug	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Rückspeisung	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Klimaanlage	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
Wärmepumpe	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x
Photovoltaik	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Elektrischer Energiespeicher	x	x	x	x	✓	x	x	✓	✓	x	✓	x
Thermischer Energiespeicher	x	x	x	x	x	x	✓	x	✓	x	✓	x
Elektrofahrzeug	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	✓	✓	x
V2G/G2V	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x	x	x

5 Verschattungsanalyse

Das in ProsOpt integrierte Berechnungsprogramm für PV-Anlagen berechnet ausgehend von der Globalstrahlung, welche aus den Wetterdaten entnommen werden und der Positionierung der Module die resultierende erzeugte elektrische Energie der Anlage. In der Realität kann der Ertrag von PV-Anlagen durch Verschattung reduziert werden. Verschattung kann durch umliegende Objekte wie zB Bäume oder Gebäude entstehen. Zusätzlich kann es bei Anlagen, die aus mehreren Modulreihen bestehen dazu kommen, dass eine Modulreihe durch die davor liegende Reihe verschattet wird. Zusätzlich zur Web-Integration von ProsOpt wird in dieser Masterarbeit eine Verschattungsanalyse in ProsOpt integriert. Hierzu wird ein wie ProsOpt am Institut für Elektrische Anlagen und Netze entwickeltes Programm zur Konzeptionierung von PV-Anlagen herangezogen [2]. Teile dieses Programms sollen in ProsOpt integriert werden, um die Auswirkung von Verschattung auf PV-Anlagen zu berücksichtigen.

5.1 Berechnung der Bestrahlungsstärke auf ein PV-Modul

Um die erzeugte elektrische Energie eines PV-Moduls berechnen zu können, muss zuerst bekannt sein, wie groß die Bestrahlungsstärke auf dieses Modul ist. Die Bestimmung des Sonnenstandes in Bezug auf dieses Modul ist daher der erste Schritt in der Berechnung. In der DIN 5034-2 ist eine eindeutige Beschreibung des Sonnenstandes mittels zweier Winkel definiert [2], [4].

Der Sonnenazimut α_S wird ausgehend vom geografischen Norden bis zum Sonnenmeridian gemessen. Die Sonnenhöhe γ_S ist als der Winkel zwischen dem Horizont des Beobachterpunktes und dem Sonnenmittelpunkt definiert. Die Winkelbeziehungen sind in Abbildung 5-1 dargestellt.

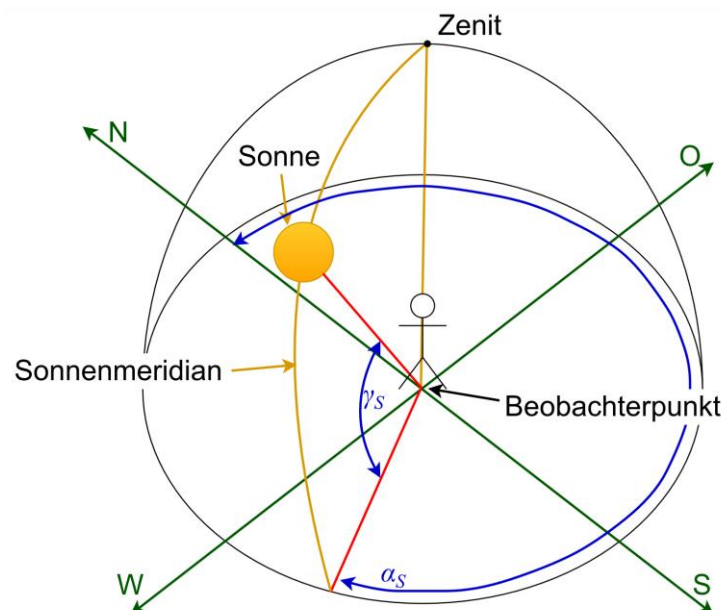


Abbildung 5-1: Winkelbeziehungen des Sonnenstandes nach DIN 5034-2 (nach Abbildung 3-2 in [2])

Die Bestrahlungsstärke der Sonne auf die Erdoberfläche wird als Globalstrahlung E_G bezeichnet und auf einer Platte, welche horizontal auf der Erdoberfläche liegt, gemessen [2], [4].

Die so gemessene Bestrahlungsstärke lässt sich in drei Teile zerlegen:

- Direktstrahlung $E_{G,Dir}$: Sonnenstrahlung, welche ungehindert auf die Messfläche auftrifft.
- Diffusstrahlung $E_{G,Diff}$: Sonnenstrahlen, die an Partikeln und Molekülen in der Atmosphäre gestreut werden und dann auch die Messfläche treffen.
- Reflektierte Strahlung $E_{G,Ref}$: Strahlung, die an der Umgebung reflektiert wird und dann auf die Messfläche treffen.

Durch die Neigung der Erdachse und die elliptische Umlaufbahn der Erde um die Sonne, ändert sich von einem fixen Beobachtungspunkt die Bahn der Sonne über das Jahr. Im Winter sind die Tage auf der nördlichen Hemisphäre kürzer als im Sommer. Diese unterschiedlichen Bahnen sind in Abbildung 5-2 für verschiedene Monatserste in Graz angegeben. In den Wintermonaten ist der lichte Tag kürzer. Zudem steigt die Sonne auch nicht so hoch auf. Die Fläche, die von einer Sonnenbahn bis zur Abszisse eingeschlossen wird, ist ein Maß für die Einstrahlungsenergie auf die Erdoberfläche. Diese ist in den Sommermonaten wesentlich größer, somit ist auch die Energie, welche auf die Erdoberfläche trifft, höher [2].

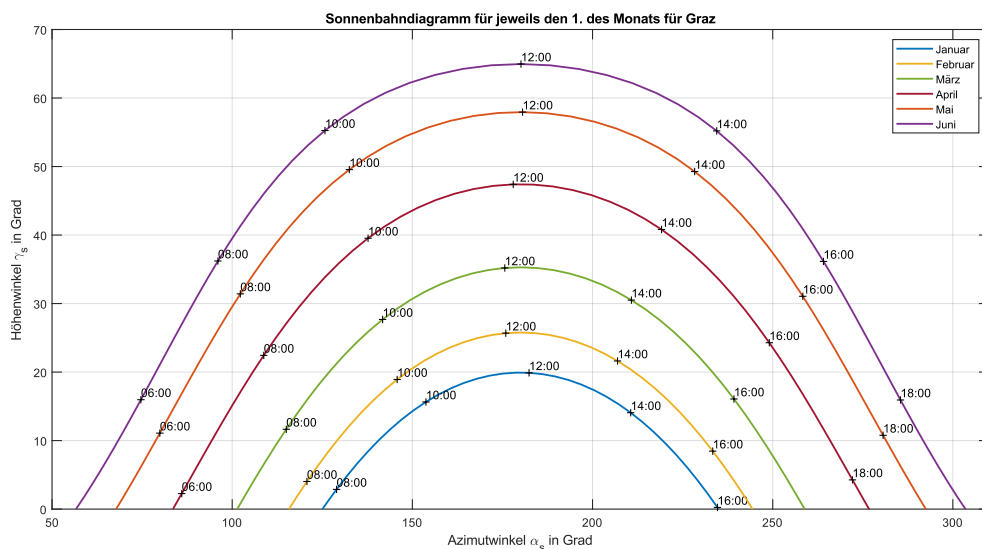


Abbildung 5-2: Sonnenbahndiagramm für jeweils den 1. des Monats für Graz

Die Stärke der Globalstrahlung ändert sich mit dem Breitengrad. In der Nähe des Äquators trifft über das Jahr gesehen wesentlich mehr Sonnenstrahlung auf die Erde. Die jährliche Globalstrahlungsenergie, die in Graz auf die Erde trifft, liegt bei 1245,5 kWh/m² in Rio de Janeiro hingegen beträgt dieser Wert 1761,3 kWh/m² [12].

Zur Berechnung des Ertrags eines PV-Moduls kann die Globalstrahlung nicht direkt benutzt werden, da die Module meist geneigt installiert werden. Daher muss zuerst die

Bestrahlungsstärke auf das ausgerichtete Modul berechnet werden. Die Ausrichtung des Moduls wird durch die beiden Winkel α_{Mod} und γ_{Mod} bestimmt. α_{Mod} beschreibt die azimutale Ausrichtung des Moduls und wird zwischen der geografischen Nordachse und dem Modul gemessen. Zeigt das Modul direkt nach Süden, so ist $\alpha_{Mod} = 0^\circ$. In Richtung Osten wird der Winkel negativ. Bei einer Südostausrichtung beträgt $\alpha_{Mod} = -45^\circ$.

Der Winkel γ_{Mod} beschreibt die Neigung des Moduls gegenüber der Horizontalen. Ist das PV-Modul parallel zur Horizontalen, so ist $\gamma_{Mod} = 0^\circ$. Wird das Modul senkrecht aufgestellt beträgt $\gamma_{Mod} = 90^\circ$ [2], [4].

Mit Hilfe dieser beiden Winkel und den Sonnenwinkeln α_S und γ_S kann der Sonneneinfallswinkel θ_{gen} nach Gleichung (11) berechnet werden [2], [4].

$$\theta_{gen} = \cos^{-1}[-\cos(\gamma_S) \cdot \sin(\gamma_{Mod}) \cdot \cos(\alpha_S - \alpha_{Mod}) + \sin(\gamma_S) \cdot \cos(\gamma_{Mod})] \quad (11)$$

α_S	Sonnenazimut in $^\circ$
α_{Mod}	Modulausrichtung in $^\circ$
γ_S	Sonnenhöhe in $^\circ$
γ_{Mod}	Modulneigung in $^\circ$

Die direkte Bestrahlungsstärke $E_{Mod,Dir}$ lässt sich anschließend über Gleichung (12) bestimmen [2], [4].

$$E_{Mod,Dir} = E_{G,Dir} \cdot \frac{\cos(\theta_{Gen})}{\sin(\gamma_S)} \quad (12)$$

$E_{G,Dir}$	direkter Anteil der Globalstrahlung in W/m^2
θ_{Gen}	Sonneneinfallswinkel in $^\circ$
γ_S	Sonnenhöhe in $^\circ$

Für die Berechnung der diffusen Bestrahlungsstärke auf das Modul existieren mehrere Ansätze. Das bestehende Programm nutzt das Modell von *Klucher*. Nach Gleichung (13) wird der Korrekturfaktor F bestimmt [2], [4].

$$F = 1 - \left(\frac{E_{G,Diff}}{E_G} \right)^2 \quad (13)$$

$E_{G,Diff}$	diffuser Anteil der Globalstrahlung in W/m^2
E_G	Globalstrahlung in W/m^2

Mit dem Korrekturfaktor kann die diffuse Bestrahlungsstärke $E_{Mod,Diff}$ nach Gleichung (14) auf das Modul berechnet werden [2], [4].

$$E_{Mod,Diff} = E_{G,Diff} \cdot \frac{1}{2} \cdot [1 + \cos(\gamma_{Mod})] \cdot \left[1 + F \cdot \sin^3\left(\frac{\gamma_{Mod}}{2}\right) \right] \cdot [1 + F \cdot \cos^2(\theta_{Gen}) \cdot \cos^3(\gamma_S)] \quad (14)$$

$E_{G,Diff}$ diffuser Anteil der Globalstrahlung in W/m²

γ_{Mod} Modulneigung in °

F Korrekturfaktor

θ_{Gen} Sonneneinfallswinkel in °

γ_S Sonnenhöhe in °

Zuletzt wird noch die Stärke der reflektierten Strahlung auf das Modul $E_{Mod,Refl}$ nach Gleichung (15) berechnet. Die Albedo A beschreibt das Reflexionsvermögen der Umgebung und ist normativ festgelegt. Für unbekannte Umgebungen wird eine Albedo von 0,2 empfohlen [2], [4].

$$E_{Mod,Refl} = E_G \cdot A \cdot \frac{1}{2} \cdot [1 - \cos(\gamma_{Mod})] \quad (15)$$

E_G Globalstrahlung in W/m²

A Albedo

γ_{Mod} Modulneigung in °

Die gesamte Bestrahlungsstärke E_{Mod} , die auf das Modul trifft, lässt sich als Summe der direkten, diffusen und reflektierten Teilstrahlungsstärken bilden und ist in Gleichung (16) dargestellt [2], [4].

$$E_{Mod} = E_{Mod,Dir} + E_{Mod,Diff} + E_{Mod,Refl} \quad (16)$$

$E_{Mod,Dir}$ Direkte Bestrahlungsstärke in W/m²

$E_{Mod,Diff}$ Diffuse Bestrahlungsstärke in W/m²

$E_{Mod,Refl}$ Reflektierte Bestrahlungsstärke in W/m²

5.2 NOCT-Methode

Abhängig von der Höhe der Bestrahlungsstärke erwärmen sich die PV-Module. Die verwendeten Halbleiter in PV-Modulen besitzen negative Temperaturkoeffizienten, weshalb sich die erzeugte elektrische Leistung des PV-Moduls verringert. Das bestehende Programm nutzt daher die *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT)-Methode, um die Leistung der PV-Module zu berechnen [2].

5.3 Einfluss der Verschattung

Der Einfluss der Verschattung wird im vorliegenden Programm für jedes PV-Modul berechnet. Dazu wird ausgehend vom Mittelpunkt eines PV-Moduls zuerst ermittelt, welche Punkte der umliegenden Objekte zu sehen sind. Für die Punkte, die ein Beobachter im Modulmittelpunkt sehen würde, werden ein Höhen- und Azimutwinkel ermittelt. Abbildung 5-3 zeigt ein grafisches Beispiel für die Definition der Höhen- und Azimutwinkel für einen Würfel, der in unmittelbarer Nähe zu einem PV-Modul liegt.

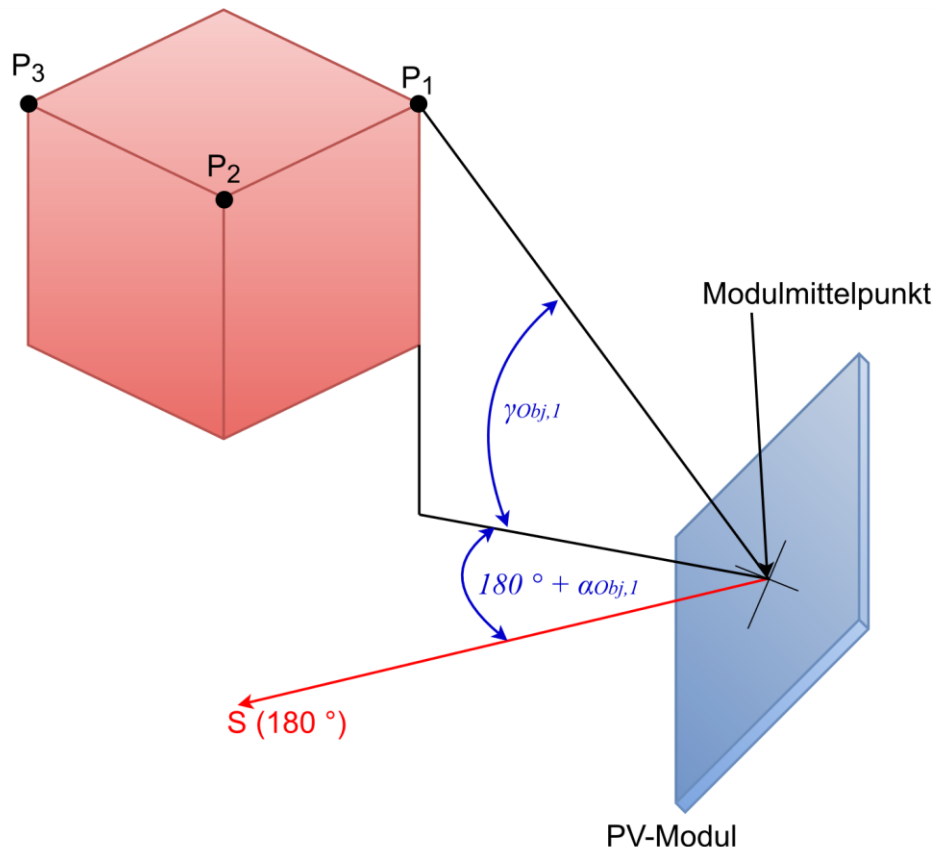


Abbildung 5-3: Definition des Höhen- und Azimutwinkels eines sichtbaren Punktes vom Modulmittelpunkt aus betrachtet (nach Abbildung 4-9 aus [2])

Im nächsten Schritt kann aus den ermittelten Winkeln für jeden Punkt der Schattenpolygonzug erstellt werden und in Abhängigkeit des Sonnenstandes die Verschattung des PV-Moduls über den gewünschten Betrachtungszeitraum berechnet werden.

Um nun zu ermitteln, ob ein PV-Modul verschattet ist, wird die Anzahl der Schnittpunkte einer Geraden auf Höhe des aktuellen Höhenwinkels der Sonne mit den Umrissen der Schattenpolygonzugs ermittelt. Ist diese Anzahl ungerade, so ist das entsprechende PV-Modul verschattet. Bei einer geraden Anzahl ist das PV-Modul nicht verschattet. Ein grafisches Beispiel für diese Methode ist in Abbildung 5-4 abgebildet. Der rote Schattenpolygonzug wird durch die umliegenden Objekte erzeugt. Um 16:30 steht die Sonne an diesem Wintertag schon sehr tief, es ergeben sich vier Schnittpunkte der Höhenwinkellinie der Sonne mit dem Schattenpolygonzug, das PV-Modul ist daher nicht verschattet.

Um 13:30 hingegen, steht die Sonne höher und es gibt nur drei Schnittpunkte mit dem Polygonzug – das PV-Modul ist zu diesem Zeitpunkt verschattet.

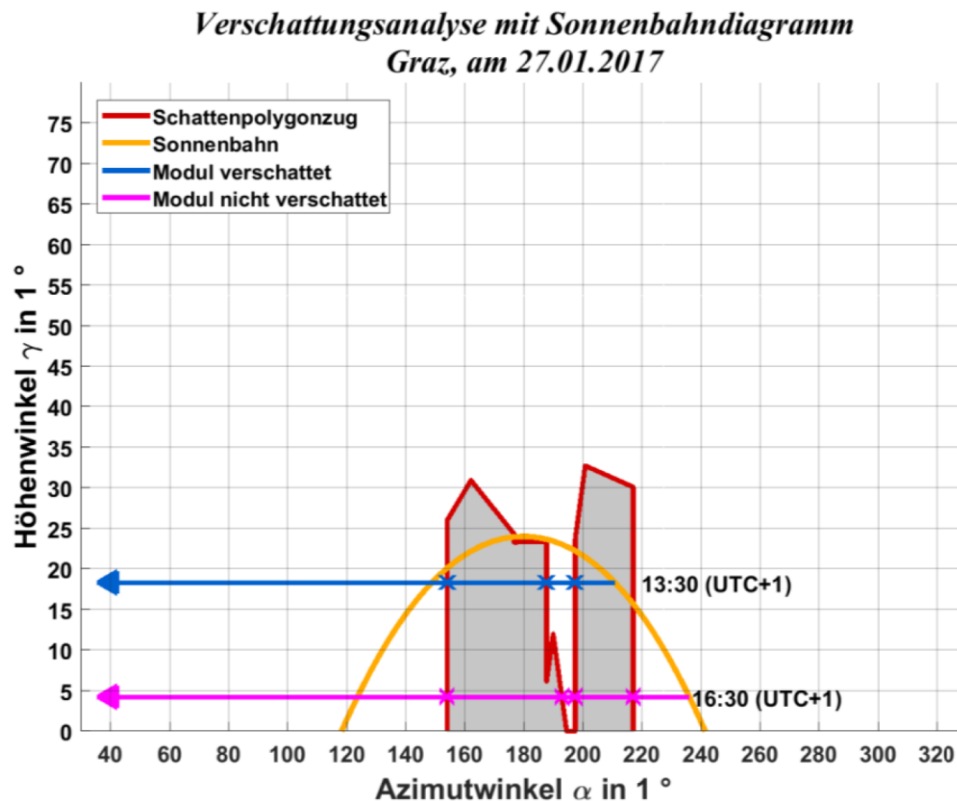


Abbildung 5-4: Verschattungsanalyse mit Sonnenbahndiagramm an einem Wintertag in Graz (Abbildung 4-12 aus [2])

Zur Berechnung der Verschattungsauswirkung wird der direkte Verschattungsgrad S_{Dir} eingeführt. Im vorliegenden Programm folgt der direkte Verschattungsgrad einer Binärlogik. Ist ein PV-Modul verschattet, so beträgt dieser Wert null. Ist das PV-Modul nicht verschattet, ist der direkte Verschattungsgrad eins. Die Erweiterung von Gleichung (16) ergibt Gleichung (17) [2].

$$E_{Mod} = E_{Mod,Dir} \cdot S_{Dir} + E_{Mod,Diff} + E_{Mod,Refl} \quad (17)$$

$E_{Mod,Dir}$ Direkte Bestrahlungsstärke in W/m^2

$E_{Mod,Diff}$ Diffuse Bestrahlungsstärke in W/m^2

$E_{Mod,Refl}$ Reflektierte Bestrahlungsstärke in W/m^2

S_{Dir} Direkter Verschattungsgrad

Die direkt auf das PV-Modul auftreffende Bestrahlungsstärke wird mit dem direkten Verschattungsgrad multipliziert. Ist das PV-Modul verschattet, so treffen nur mehr die diffuse und reflektierte Bestrahlungsstärke auf das PV-Modul [2].

6 Web-Integration

Hauptziel dieser Masterarbeit ist es, eine grafische Benutzeroberfläche für ProsOpt zu entwickeln und das Berechnungsprogramm der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Daher bietet sich die Umsetzung als Webapplikation an, da Nutzer keine zusätzliche Software auf ihren Geräten installieren müssen und Webapplikationen auch auf mobilen Endgeräten wie Smartphones und Tablets benutzt werden können. Allerdings ist das bestehende Programm ProsOpt in dem numerischen Rechenprogramm MATLAB geschrieben. MATLAB selbst bietet keine Möglichkeit zur Programmierung von Webapplikationen. Um nun trotzdem eine Webapplikation für ProsOpt zu erstellen, gibt es zwei grundlegende Möglichkeiten, die nachfolgend erklärt werden.

6.1 Übersetzung in eine andere Programmiersprache

Die Übersetzung von ProsOpt in eine andere Programmiersprache bringt einige Vorteile mit sich. Viele Programmiersprachen bieten gute Möglichkeiten zur Programmierung von Webapplikationen und sind im Gegensatz zu MATLAB meist ohne Lizenzkosten verfügbar. Allerdings ist MATLAB in Bezug auf mathematische Operationen wie zB Optimierungsalgorithmen oder Matrixoperationen wesentlich entwicklerfreundlicher, da die Funktionen einerseits direkt integriert sind und andererseits die Dokumentationen dieser Funktionen umfangreich sind. Es gibt zwar Bibliotheken wie zB die Google OR-Tools², welche es ermöglichen, Optimierungsalgorithmen in Programmiersprachen wie C#³, Java⁴ oder Python⁵ zu verwenden, im Vergleich zu den in MATLAB integrierten Funktionen sind diese aber komplizierter in der Handhabung. Weiters ist MATLAB im universitären Bereich stark vertreten, weshalb viele bereits mit MATLAB vertraut sind. Zudem würde eine Übersetzung von ProsOpt in eine andere Programmiersprache sehr aufwendig sein, weshalb diese Lösung für den Moment nicht attraktiv genug ist.

6.2 Verwendung von weiteren MathWorks-Produkten

MathWorks, die Firma, die MATLAB entwickelt und vertreibt, bietet zusätzliche Produkte an, um Benutzeroberflächen für MATLAB Programme zu entwickeln. Der einfachste Weg, eine Benutzeroberfläche in MATLAB zu erstellen sind die MATLAB GUI Funktionen. Damit lassen sich Applikationen erstellen, die auf Windows⁶, Linux⁷ und MacOS⁸ Betriebssystemen

² Softwarebibliothek für Optimierungsprobleme von Google: URL: <https://developers.google.com/optimization>. Letzter Abruf am 19.08.2022

³ Programmiersprache entwickelt von Microsoft: URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/csharp/>. Letzter Abruf am 19.08.2022

⁴ Programmiersprache entwickelt von Oracle: URL: <https://www.java.com/de/download/manual.jsp>. Letzter Abruf am 19.08.2022

⁵ Programmiersprache entwickelt von der Python Software Foundation: URL: <https://www.python.org/>. Letzter Abruf am 19.08.2022

⁶ Betriebssystem entwickelt von Microsoft: URL: <https://www.microsoft.com/de-at/windows>. Letzter Abruf am 19.08.2022

⁷ Freies Betriebssystem: URL: <https://www.kernel.org/>. Letzter Abruf am 19.08.2022

⁸ Betriebssystem von Apple: URL: <https://www.apple.com/at/macOS/monterey/>. Letzter Abruf am 19.08.2022

ausführen lassen. Nachteilig ist, dass diese Applikationen nicht auf mobilen Endgeräten verwendet werden können und Benutzer diese Applikationen erst auf deren Gerät installieren müssen und zusätzlich eine MATLAB-Runtime auf dem Gerät notwendig ist. Um MATLAB Programme als Webapplikation zur Verfügung zu stellen, gibt es zwei Produkte von MathWorks: eines ist MATLAB Web App Server. Dieses Produkt erlaubt es, Programme, die über eine MATLAB GUI verfügen online zugänglich zu machen. Diese Lösung benötigt keinen zusätzlichen Programmcode und ist deshalb sehr einfach umzusetzen, allerdings bietet der MATLAB Web App Server keine Möglichkeit moderne Web-Technologien einzusetzen.

Das zweite Produkt, mit dem MATLAB Programme als Webapplikation zur Verfügung gestellt werden können nennt sich MATLAB Production Server. Der MATLAB Production Server erlaubt es Drittprogrammen über eine Programmierschnittstelle MATLAB Programme auszuführen und die Berechnungsergebnisse zu erhalten. Vorteil dieser Lösung ist, dass die Benutzeroberfläche in einer geeigneten Programmiersprache implementiert werden kann, die auch moderne Web-Technologien unterstützt. Weiters muss keine MATLAB GUI entwickelt werden, der MATLAB Production Server benötigt nur den bereits vorhandenen Programmcode von ProsOpt. Aus diesen vorteilhaften Gründen wird die Lösung zur Integration von ProsOpt in eine Weboberfläche mittels MATLAB Production Server im Zuge dieser Masterarbeit umgesetzt.

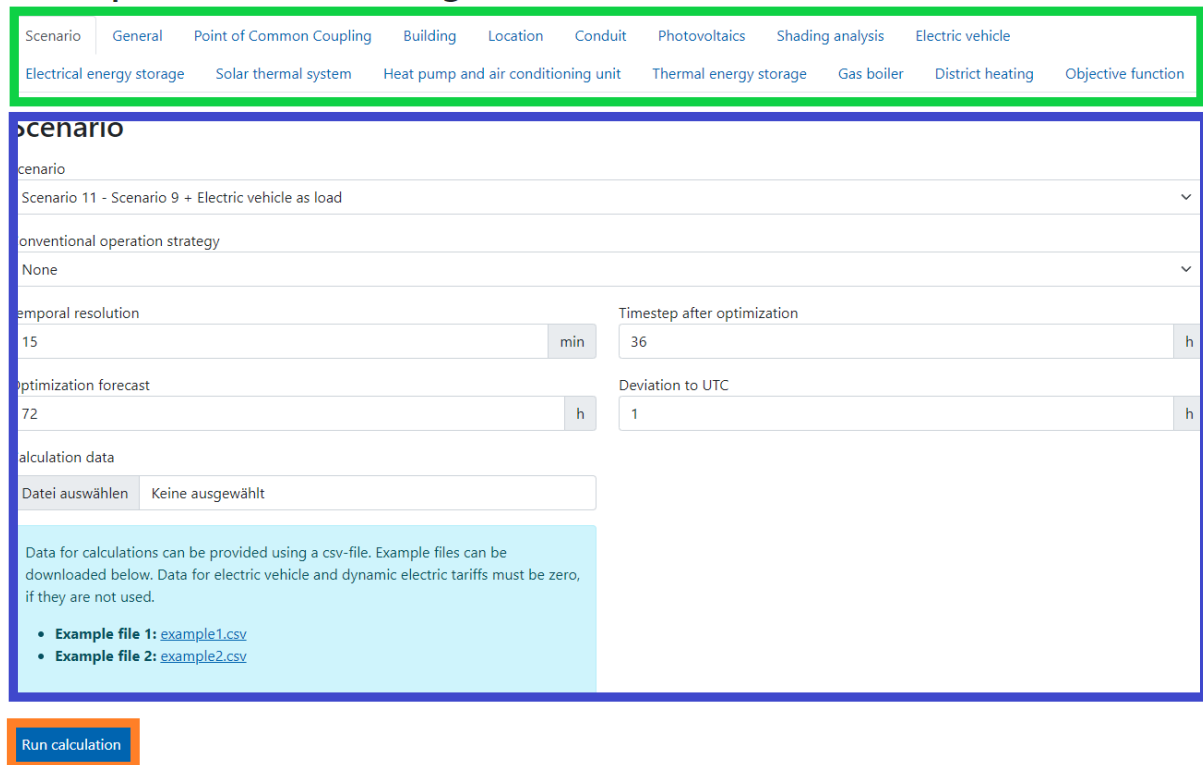
6.3 ProsOpt-Weboberfläche

Die Weboberfläche für ProsOpt wurde in C# mit dem aktuellen ASP.NET Core Framework⁹ programmiert. Die Webseite besteht aus einer Vielzahl von Eingabeelementen, welche nachfolgend genauer erklärt werden.

⁹ Software Framework von Microsoft: URL: <https://docs.microsoft.com/en-us/aspnet/core/?view=aspnetcore-6.0>. Letzter Abruf am 19.08.2022

6.4 Hauptseite

ProsOpt Calculation Configuration



scenario

scenario

Scenario 11 - Scenario 9 + Electric vehicle as load

conventional operation strategy

None

temporal resolution

15 min

Timestep after optimization

36 h

optimization forecast

72 h

Deviation to UTC

1 h

calculation data

Datei auswählen Keine ausgewählt

Data for calculations can be provided using a csv-file. Example files can be downloaded below. Data for electric vehicle and dynamic electric tariffs must be zero, if they are not used.

- Example file 1: [example1.csv](#)
- Example file 2: [example2.csv](#)

Run calculation

Abbildung 6-1: Hauptseite

Die Hauptseite von ProsOpt dient zur Eingabe aller notwendigen Daten für die Durchführung einer Berechnung. Abbildung 6-1 zeigt die Hauptseite und die drei Hauptaktionsfelder. Das grüne Rechteck zeigt die einzelnen Konfigurationsabschnitte, die vom Benutzer ausgewählt werden können. Klickt der Benutzer auf einen der Bereiche, so werden im blauen Rechteck die Eingabefelder für diesen Konfigurationsabschnitt angezeigt. Am Ende der Seite befindet sich ein Button, hier in orange hervorgehoben, der die Berechnung startet.

Um die Konfiguration so einfach wie möglich zu gestalten, besitzt jedes Eingabefeld einen vorausgefüllten Standardwert, sodass der Benutzer nicht alle Felder ausfüllen muss. Weiters müssen auch nur jene Technologien konfiguriert werden, die im gewählten Szenario enthalten sind. Zusätzlich wird überprüft, ob die Eingaben des Benutzers innerhalb festgelegter Grenzen liegen. Tun sie das nicht, wird die Berechnung nicht gestartet und der Benutzer bekommt eine entsprechende Fehlermeldung mit dem Namen des Feldes, welches einen ungültigen Wert besitzt. Zusätzlich wird das Feld rot umrandet. Abbildung 6-2 zeigt eine solche Fehlermeldung.

- 'Temporal resolution' must be greater than or equal to '1'.

Scenario

General

Point of Common Coupling

Building

Location

Con

Electrical energy storage

Solar thermal system

Heat pump and air conditioning u

Scenario

Scenario

Scenario 11 - Scenario 9 + Electric vehicle as load

Conventional operation strategy

None

Temporal resolution

-60

min

'Temporal resolution' must be greater than or equal to '1'.

Abbildung 6-2: Benutzereingabe ungültig

6.4.1 Szenario

Scenario

Scenario

Scenario 11 - Scenario 9 + Electric vehicle as load

Conventional operation strategy

None

Temporal resolution

15

min

Timestep after optimization

36

h

Optimization forecast

72

h

Deviation to UTC

1

h

Calculation data

Datei auswählen

Keine ausgewählt

Data for calculations can be provided using a csv-file. Example files can be downloaded below. Data for electric vehicle and dynamic electric tariffs must be zero, if they are not used.

- Example file 1: [example1.csv](#)
- Example file 2: [example2.csv](#)

Abbildung 6-3: Eingabefelder für das Szenario

Abbildung 6-3 zeigt die Eingabefelder für das zu berechnende Szenario. Die unterschiedlichen Szenarien sind in Kapitel 4.4 detailliert beschrieben. Zusätzlich können hier die Zeitparameter der Optimierung, sowie die Zeitzone der Eingabedaten verändert werden.

ProsOpt benötigt zur Berechnung einige Daten wie zB den elektrischen Energiebedarf als Lastprofil oder die Globalstrahlung über den Betrachtungszeitraum. Diese Daten können als Datei hochgeladen werden. Die Seite bietet auch die Möglichkeit zwei Beispieldateien herunterzuladen, um die Struktur der benötigten Datei besser verstehen zu können.

Die Weboberfläche akzeptiert CSV-Dateien und muss folgende Spalten, jeweils durch einen Strichpunkt getrennt, besitzen:

1. Zeitstempel: Den Zeitpunkt des Datensatzes im UNIX Format (Millisekunden seit dem 1.1.1970)
2. Wirkenergiebedarf in kWh
3. Blindenergiebedarf in kWh
4. Warmwasserbedarf in Litern
5. Anwesenheit des Elektrofahrzeugs
6. Wirkenergiebedarf des Elektrofahrzeugs
7. Blindenergiebedarf des Elektrofahrzeugs
8. Strombezugstarif in €/kWh
9. Stromeinspeisungstarif in €/kWh
10. Globalstrahlung in W/m^2
11. Direkte Sonneneinstrahlung in W/m^2
12. Diffuse Sonneneinstrahlung in W/m^2
13. Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$

Als Dezimaltrennzeichen dient ein Punkt.

6.4.2 Allgemeine Daten

Abbildung 6-4 zeigt die Eingabefelder für allgemeine Daten, die an mehreren Stellen in ProsOpt verwendet werden.

General

Reference water temperature	20 °C	Reference room temperature	20 °C
Heating system inlet temperature	55 °C	Cooling system inlet temperature	10 °C
Thermal energy storage inlet temperature	95 °C	Specific density of water	1000 kg/m ³
Specific heat capacity of water	4.184 kJ/kgK		

Abbildung 6-4: Allgemeine Daten

6.4.3 Netzanschluss

Die Eingabefelder für die Konfiguration des Netzanschlusses sind in Abbildung 6-5 dargestellt. Hier können die maximalen Leistungen für den Bezug und die Rückspeisung elektrischer Energie eingegeben werden.

Point of Common Coupling

Maximum purchase power	Maximum infeed power
18 kVA	18 kVA

Abbildung 6-5: Eingabefelder Netzanschluss

6.4.4 Gebäudekonfiguration

Die Gebäudekonfiguration besitzt eine Vielzahl an Eingabefeldern. Der erste Block der Eingabefelder beschäftigt sich mit den allgemeinen Daten des Gebäudes wie zB den Abmessungen und der Ausrichtung des Gebäudes und ist in Abbildung 6-6 zu sehen.

Building

Building type Passive house	Building orientation 0				
Roof type Two sided roof	Roof angle 30				
Length 9 m	Width 5 m	Garage length 4 m	Basement height 3.5 m	Ground floor height 3.5 m	First floor height 3.5 m

Abbildung 6-6: Eingabefelder Gebäude allgemein

Anschließend sind die einzelnen Geschosse des Gebäudes zu konfigurieren. Es können Geschosse aktiviert bzw. deaktiviert werden. Zusätzlich kann angegeben werden, ob ein Geschoss über die optionale Klimaanlage gekühlt wird. Weiters können die gewünschten Temperaturen in den Geschossen eingegeben werden. Wird das Geschoss nicht beheizt bzw. gekühlt, so ist der Wert -100 einzugeben. Die Eingabefelder sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Um ein Gebäude mit Flachdach zu berechnen, ist das Geschoss *Roof* zu deaktivieren. Dieses steht für einen Dachboden. Zusätzlich können noch das Erdgeschoss, das erste Obergeschoss, der Keller und eine angrenzende Garage konfiguriert werden.

Floors

Basement	Cooling	Minimum temperature	Maximum temperature	Air exchange rate
Yes	No	-100 °C	-100 °C	0.13 l/h
Ground floor	Cooling	Minimum temperature	Maximum temperature	Air exchange rate
Yes	Yes	22 °C	26 °C	0.5 l/h
First Floor	Cooling	Minimum temperature	Maximum temperature	Air exchange rate
Yes	Yes	22 °C	26 °C	0.5 l/h
Roof	Cooling	Minimum temperature	Maximum temperature	Air exchange rate
Yes	No	-100 °C	-100 °C	0.5 l/h
Garage	Cooling	Minimum temperature	Maximum temperature	Air exchange rate
Yes	No	-100 °C	-100 °C	0.64 l/h

Abbildung 6-7: Eingabefelder Geschosse

ProsOpt benötigt auch Informationen über die Heizperiode. Es können der Beginn der Heizperiode und das Ende der Heizperiode eingegeben werden. Die Monate, in denen die Heizperiode beginnt bzw. endet sind Monate, in denen entweder eine Heizung oder Kühlung

des Gebäudes möglich ist. Während der Heizperiode ist keine Kühlung möglich und außerhalb der Heizperiode wird nicht geheizt. Abbildung 6-8 zeigt die entsprechenden Eingabefelder.

Heating period

Start day	Start month
1	10
End day	End month
30	4

Abbildung 6-8: Eingabefelder Heizperiode

Die Eingabefelder für die Wärmedurchgangszahlen für das Gebäude sind in Abbildung 6-9 zu sehen. Es sind Wärmedurchgangszahlen für den Keller, die Geschossdecken, Außen- und Innenwände, Dach, Fenster und für Außentüren anzugeben.

Insulation values

Basement ceiling	Ceiling	External walls	Internal walls	Roof area	Windows
0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8
W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K	W/m ² K
External doors					
0.8					
W/m ² K					

Abbildung 6-9: Eingabefelder Wärmedurchgangszahlen

Abbildung 6-10 zeigt die Eingabefelder, die zur Berechnung des Heiz- und Kühlbedarfs notwendig sind, wie zB den Absorptionsgrad oder die Wärmeleitfähigkeit der Erde.

Thermal demand parameters

External heat transfer coefficient	Temperature difference between indoor and outdoor	Shading factor
0.04	10	0.7
Km ² /W	°C	
Total energy transmittance	Total energy transmittance with shutters	Activation of sun protection systems
0.42	0.07	0.8
Thermal conductivity	Thermal conductivity of the soil	Volumetric heat capacity
45	2.4	2800000
W/mK	W/mK	J/m ² K
Emissivity of external walls	Emissivity of roof area	Emissivity of external doors
0.9	0.9	0.9
Degree of absorption of external walls	Degree of absorption of roof area	Degree of absorption of external doors
0.5	0.3	0.25

Abbildung 6-10: Eingabefelder für Heiz- und Kühlbedarf

Die letzten Eingabefelder für das Gebäude legen fest, wie die Gebäudewände aufgebaut sind. Die Felder sind in Abbildung 6-11 zu sehen. Diese Eingabefelder dienen dazu, um bei der thermischen Berechnung festzustellen, ob zB eine Wand Fenster besitzt und wie viel Fläche

der Wand aus Fenstern besteht, um in weiterer Folge mit den entsprechenden Wärmedurchgangszahlen die Wärmeverluste zu berechnen.

Wall distribution

Wall	Basement ceiling	Ceiling	ExternalWall	Internal walls	Roof area	Windows	External doors
Basement north wall	0	0	1	0	0	0	0
Basement east wall	0	0	1	0	0	0	0
Basement west wall	0	0	1	0	0	0	0
Basement south wall	0	0	1	0	0	0	0
Basement ceiling	1	0	0	0	0	0	0
Basement ground	0	0	1	0	0	0	0
Ground floor north wall	0	0	0.875	0	0	0.125	0
Ground floor east wall	0	0	0.875	0	0	0.125	0
Ground floor west wall	0	0	0.875	0	0	0.12	0.05
Ground floor south wall	0	0	0.95	0	0	0	0.5

Abbildung 6-11: Eingabefelder Wandaufteilung

6.4.5 Geografische Daten

Abbildung 6-12 zeigt die Eingabefelder für Längen- und Breitengrad, sowie den Albedo-Wert. Die geografische Lage des Gebäudes wird benötigt, um den Stand der Sonne zu berechnen, da dieser sowohl Auswirkungen auf den Heiz- und Kühlbedarf als auch auf die Erzeugung von PV- und Solarthermieranlagen hat. Die Albedo gibt an, wie stark die Sonnenstrahlung von der Umgebung reflektiert wird. Die Albedo kann Werte von null bis eins annehmen, wobei eins für totale Reflektion steht. Für unbekannte Umgebungen wird eine Albedo von 0,2 empfohlen [1], [4].

Location

Longitude
Latitude

Surface albedo

Abbildung 6-12: Eingabefelder für geografische Daten

6.4.6 Leitungen

Für die Berechnung von Verlusten im Heizsystem benötigt ProsOpt Informationen über das Rohrsystem der Heizleitungen. Die Eingabefelder hierzu sind in Abbildung 6-13 dargestellt und umfassen die Fließgeschwindigkeit in den Rohren, die Länge der Rohre, sowie die Temperaturen und den Isolationswert.

Conduit

Flow rate 720 l/h	Length 30 m
Maximum hot temperature 95 °C	Maximum low temperature 65 °C
Insulation 0.1465 W/m ² K	

Abbildung 6-13: Eingabefelder für Leitungen

6.4.7 Photovoltaik

Die Eingabefelder für die PV-Anlage sind in drei Teile unterteilt. Der erste Teil enthält Felder für die Modulabmessungen, die Ausrichtung und Neigung der PV-Module, die maximal gewünschte Leistung der PV-Anlage und die elektrotechnischen Parameter der PV-Module aus deren Datenblatt. Diese Felder sind in Abbildung 6-14 dargestellt.

Photovoltaics

Azimuth orientation 0 °	Inclination 30 °
Nominal power of PV module at STC 255 Wp	Maximum peak power 6 kWp
Temperature coefficient -0.45 %/°C	Theta NOCT 45.7 °C
Module length 1.625 m	Module width 1.019 m
Module thickness 0.046 m	Frame thickness on long side 0.01 m
Frame thickness on short side 0.02 m	Distance between modules 0.25 m
Short circuit current 8.89 A	Open circuit voltage 37.8 V
Ventilation factor 2 %	

Abbildung 6-14: Eingabefelder Photovoltaik

Der zweite Teil der Eingabefelder behandelt den Inverter für die PV-Anlage. Diese sind in Abbildung 6-15 dargestellt. Einzugeben sind Daten zum Modus, indem der Inverter betrieben wird und das Größenverhältnis des Inverters zur maximalen Leistung der PV-Anlage sowie der Wirkungsgrad des MPP-Trackers.

Inverter

Inverter mode Constant power factor mode ▼	Constant power factor 1
Inverter sizing ratio 1.1	MPP efficiency 0.999

Abbildung 6-15: Eingabefelder Inverter

Zuletzt sind noch einige Wirkungsgrade des Wechselrichters bei verschiedenen Lastpunkten anzugeben, damit ProsOpt den Wirkungsgrad des Wechselrichters in verschiedenen



Betriebspunkten approximieren kann. Diese Werte sind meist auch in den Herstellerangaben zu finden. Diese Felder sind in Abbildung 6-16 zu sehen.

Inverter efficiency

Load	Efficiency
0.05	0.903
Load	Efficiency
0.1	0.941
Load	Efficiency
0.2	0.965
Load	Efficiency
0.25	0.97
Load	Efficiency
0.3	0.973
Load	Efficiency
0.5	0.978
Load	Efficiency
0.75	0.98
Load	Efficiency
1	0.98

Abbildung 6-16:Eingabefelder Wechselrichter Wirkungsgrade bei unterschiedlichen Lastpunkten

6.4.8 Verschattungsanalyse

Soll eine Verschattungsanalyse für die PV-Anlage durchgeführt werden, so sind die umliegenden Gebäude anzugeben. Hierzu müssen die vier Eckpunkte des Gebäudes, sowie die Höhe des Gebäudes eingegeben werden. Die Benutzeroberfläche bietet hier einige Bedienelemente, die in Abbildung 6-17 dargestellt sind.

Shading analysis

Building 1 Remove building

Left upper point	-15	20	Right upper point	0	20	Right lower point	0	10	Left lower point	-15	10
------------------	-----	----	-------------------	---	----	-------------------	---	----	------------------	-----	----

Floor height m

Roof height m

Add building

Abbildung 6-17: Eingabefelder Verschattungsanalyse

Mit Hilfe des blauen Buttons können weitere Gebäude hinzugefügt werden, der rote Button entfernt Gebäude aus der Liste. Zum leichteren Verständnis wird unter den Eingabefeldern die Anordnung der Gebäude in der Draufsicht dargestellt. Abbildung 6-18 zeigt eine beispielhafte Gebäudeanordnung. Das blaue Rechteck symbolisiert das Gebäude, welches von ProsOpt optimiert und somit die PV-Anlage installiert werden soll. Das Gebäude wird mit Hilfe der Daten, die der Benutzer bei den Gebäudedaten eingegeben hat, gezeichnet. Die umliegenden Gebäude werden in grau dargestellt. Zu beachten ist, dass Gebäude sich nicht überlappen dürfen.

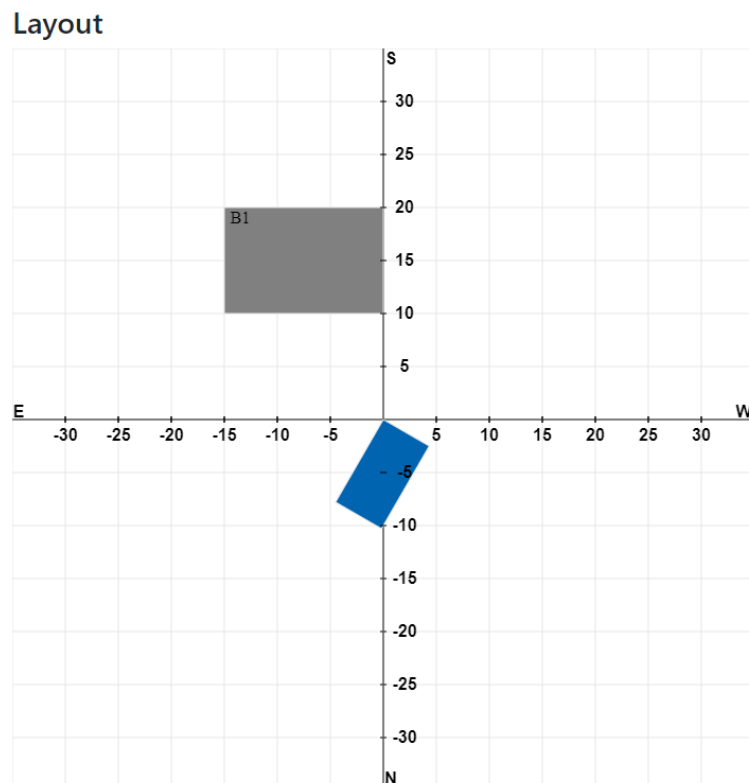


Abbildung 6-18: Verschattungsanalyse – Gebäudeanordnung

6.4.9 Elektrofahrzeug

Der nächste Punkt in der Benutzeroberfläche beschäftigt sich mit den Daten zu einem eventuell vorhandenen Elektrofahrzeug. Wie in Abbildung 6-19 zu sehen ist, müssen die Batteriekapazität sowie die maximale Lade- und Entladeleistung eingegeben werden. Wird ein Teil der Batteriekapazität als elektrischer Energiespeicher für das Gebäude verwendet im Sinne von Vehicle to Grid (V2G), so ist der Anteil der Batteriekapazität, die hierfür verwendet werden soll, einzugeben. Weiters kann man eingeben, welchen Wirkungsgrad das System besitzt und was der geringst zulässige State of Charge (SOC) der Fahrzeugbatterie ist. Das letzte Eingabefeld dient zur Initialisierung der Optimierungsfunktion. Der Optimierungsalgorithmus benötigt als Anfangskriterium, welchen Ladezustand die Fahrzeugbatterie zu Beginn der Berechnungen hat.

Electric vehicle

Capacity 40 kWh	Share V2G/G2V 0.2
Maximum depth of discharge 0.8	Maximum charging power 4.9 kW
Maximum discharging power 2.25 kW	Round trip efficiency 0.9
Self discharge rate 5 %/day	Initial state of charge 0.5

Abbildung 6-19: Eingabefelder Elektrofahrzeug

6.4.10 Elektrischer Energiespeicher

Nach dem Elektrofahrzeug kann ein stationärer elektrischer Energiespeicher konfiguriert werden. Abbildung 6-20 zeigt die Eingabefelder für den elektrischen Energiespeicher. Die Felder sind sehr ähnlich zu den Eingabefeldern des Elektrofahrzeugs und enthalten die Kapazität, die maximale Entladetiefe des elektrischen Energiespeichers, die maximale Lade- und Entladeleistung, den Gesamtwirkungsgrad sowie die Selbstentladung pro Monat, aber auch den Initialladezustand.

Electrical energy storage

Capacity 10 kWh	Maximum depth of discharge 1
Maximum charging power 1.875 kW	Maximum discharging power 2.25 kW
Round trip efficiency 0.9	Self discharge rate 5 %/month
Initial state of charge 0 kWh	

Abbildung 6-20: Eingabefelder elektrischer Energiespeicher

6.4.11 Solarthermie

ProsOpt kann auch eine Solarthermieranlage im Prosumersystem berücksichtigen. Die notwendigen Eingabefelder sind in Abbildung 6-21 dargestellt. Einzugeben sind die Ausrichtung und die Neigung der Solarkollektoren, der Kollektortyp, sowie die Anzahl der

Kollektoren, deren Fläche und Volumen. Zudem sind die Minimal- und Maximaltemperatur des Systems einzugeben.

Solar thermal system

Azimuth orientation 0 °	Inclination 30 °
Number of collectors 3	Maximum collector efficiency 0.86
Linear loss coefficient 6.1	Quadratic loss coefficient 0.025
Surface area 2.36 m ²	Volume 2.7 l
Degree of absorption 0.97	Incidence angle modifier 0.89
Collector type Flat plate collector ▼	Initial temperature 20 °C
Maximum temperature 120 °C	

Abbildung 6-21: Eingabefelder Solarthermie

6.4.12 Wärmepumpen und Klimaanlage

Zur Berechnung von Wärmepumpen und Klimaanlage benutzt ProsOpt eine Datenbank, in der Daten von Wärmepumpen bzw. Klimaanlage hinterlegt sind. Wie in Abbildung 6-22 zu sehen ist, kann eine entsprechende Wärmepumpe oder Klimaanlage über eine Liste ausgewählt werden. Zusätzlich werden Daten zur Wärmeleitfähigkeit der Erde und zur Tiefe der Wärmequelle benötigt.

Heat pump and air conditioning unit

Heat pump Buderus WLW196i 6 IR AR ▼	Air conditioning unit Viessmann Vitocal 300A AWO AC 301B07 ▼
Thermal conductivity of the soil 2.3 W/mK	Volumetric heat capacity 2800000 J/m ² K
Depth of the heat pump source 1.5 m	

Abbildung 6-22: Eingabefelder Wärmepumpen und Klimaanlage

6.4.13 Thermische Energiespeicher

Die Eingabefelder für thermische Energiespeicher sind in mehrere Teile untergliedert. Der erste Teil enthält die Konfigurationen für einen Wärmespeicher. Wie in Abbildung 6-23 zu sehen, ist zuerst die Kapazität des Wärmespeichers, sowie dessen Radius und Isolationswert einzugeben. Danach können Heizkartuschen konfiguriert werden, die den Wärmespeicher mittels elektrischer Energie aufladen können.

Heat storage

Capacity	300	l	Radius	0.25	m
Insulation	0.37	W/m2K			

Heating cartridges

Heating cartridge 1 power	2	kW	Heating cartridge 1 efficiency	0.99
Heating cartridge 2 power	2	kW	Heating cartridge 2 efficiency	0.99

Abbildung 6-23: Eingabefelder Wärmespeicher 1

Die Wärmespeicher in ProsOpt bestehen aus zwei Zonen, aus denen Wärme entnommen werden kann. Die Zonen unterscheiden sich durch ihre Temperatur. Die Daten zu den Zonen können wie in Abbildung 6-24 zu sehen, konfiguriert werden. Die Eingabefelder umfassen die Minimal- und Maximaltemperatur jeder Zone, sowie den Anfangsladezustand der Speicherzonen. Der Anfangsladezustand des thermischen Speichers ist als Wert zwischen null und eins anzugeben. Eins bedeutet, dass der Speicher vollgeladen ist.

High temperature zone

Minimum temperature	20	°C	Maximum temperature	65	°C
Initial state of charge	0				

Low temperature zone

Minimum temperature	20	°C	Maximum temperature	55	°C
Initial state of charge	0				

Abbildung 6-24: Eingabefelder Wärmespeicher 2

In ProsOpt kann auch ein Kältespeicher implementiert werden. Die Eingabefelder hierzu sind in Abbildung 6-25 dargestellt. Sie ähneln der Eingabefelder des Wärmespeichers. Kapazität, Radius sowie Isolationswert sind wieder konfigurierbar. Minimal- und Maximaltemperatur können auch eingegeben werden. Zur Berechnung ist noch der Initialzustand des Speichers einzugeben. Der Kältespeicher kann nicht über ein vordefiniertes Szenario ausgewählt werden, sondern kann manuell über den entsprechenden Button aktiviert werden.

Cold storage

☒ Enable cold storage

Capacity	200 I	Radius	0.25 m
Insulation	0.37 W/m2K	Minimum temperature	-10 °C
Maximum temperature	20 °C	Initial state of charge	0

Abbildung 6-25: Eingabefelder Kältespeicher

6.4.14 Gasheizung

Eine weitere Option in ProsOpt ist ein Gasheizsystem zu berücksichtigen. Dazu sind in Abbildung 6-26 die entsprechenden Eingabefelder abgebildet. Diese umfassen den Bruttoheizwert, den Wirkungsgrad und die Leistung des Systems.

Gas boiler

Gross heating value	11.32 kWh/Nm3	Efficiency	0.93
Power	10.1 kW		

Abbildung 6-26: Eingabefelder Gasheizung

6.4.15 Fernwärme

In einigen hinterlegten Szenarien von ProsOpt ist ein Fernwärmeanschluss hinterlegt. Um einen Fernwärmeanschluss zu konfigurieren, werden nur die Leistung und der Wirkungsgrad benötigt, wie in Abbildung 6-27 dargestellt.

District heating

Power	13 kW	Efficiency	0.93
-------	------------------------------------	------------	-----------------------------------

Abbildung 6-27: Eingabefelder Fernwärme

6.4.16 Zielfunktion

Der letzte Teil der Eingabefelder behandelt die Zielfunktion von ProsOpt. Die Zielfunktion von ProsOpt ist standardmäßig das ökonomische Optimum. Wie in Abbildung 6-28 zu sehen, können andere Zielfunktion über eine Liste ausgewählt werden. Darunter befinden sich einige Checkboxes. Diese bestimmen die Verschaltung der Wärmespeicherzonen innerhalb des Gesamtsystems.

Objective function

Objective function

Economic optimization

- ☐ Enable connection between high temperature and low temperature zone of thermal storage an source side
- ☒ Enable connection between high temperature zone and domestic hot water
- ☐ Enable connection between low temperature sources and heating demand
- ☒ Enable connection between high temperature and low temperature zone of thermal storage an demand side

Abbildung 6-28: Eingabefelder Zielfunktion

Levelized cost of energy

Purchase price	0.2	€/kWh	Infeed price	-0.07	€/kWh
Photovoltaics	-0.12	€/kWh	Electrical energy storage	0.02	€/kWh
Electric vehicle	0.02	€/kWh	Solar thermal system	0.12	€/kWh
Heat pump	0.15	€/kWh	Gas boiler	0.13	€/kWh
District heating	0.25	€/kWh	Thermal energy storage heating cartridge	0.05	€/kWh
Thermal energy storage high temperature	0.05	€/kWh	Thermal energy storage low temperature	0.05	€/kWh
Air conditioning unit	0.15	€/kWh	Thermal energy storage cold temperature	0.05	€/kWh

Abbildung 6-29: Eingabefelder Stromkosten

Um das ökonomische Optimum zu finden, werden in ProsOpt jeder Technologie Kosten in €/kWh zugewiesen. Diese Eingabefelder sind in Abbildung 6-29 dargestellt. Wenn in der Liste für die Zielfunktion nicht das ökonomische Optimum ausgewählt wird, werden die Kosten, die der Benutzer eingibt, überschrieben um die Zielfunktion entsprechend an das gewünschte Ziel anzupassen. Eine detaillierte Beschreibung zu den Kosten ist in Kapitel 4.3.1 zu finden.

6.4.17 Während der Berechnungen

Nachdem der Benutzer die Berechnung gestartet hat, wird eine Ladeanimation angezeigt. Diese ist in Abbildung 6-30 zu sehen. Mit dem roten Button kann eine Berechnung abgebrochen werden.

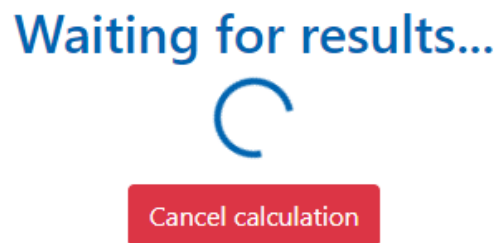


Abbildung 6-30: Warteanimation

6.4.18 Fehlerfall

Im Falle eines Fehlers im bestehenden MATLAB Programm zeigt die Weboberfläche, wie in Abbildung 6-31 dargestellt, eine Fehlermeldung an.



Abbildung 6-31: MATLAB Fehlermeldung

6.5 Ergebnisse

Nach den Berechnungen wird der Benutzer auf die Ergebnisseite weitergeleitet. Diese Seite zeigt einige Diagramme und Zahlenwerte an, die in den folgenden Unterpunkten erklärt werden. Diese Seite zeigt besonders die Vorteile einer Weboberfläche, die mit Web-Technologien programmiert wurde, im Vergleich zum MATLAB Web App Server. Die Diagramme, die auf dieser Seite dargestellt werden, sind interaktiv. Benutzer können in interessante Bereiche zoomen und Datenreihen ein- und ausblenden. Die verwendete Bibliothek namens *Chart.js* bietet noch eine Vielzahl an Erweiterungen und Konfigurationsmöglichkeiten, um den zukünftigen Anforderungen von ProsOpt gerecht zu werden.

6.5.1 Eigenverbrauchs- und Autonomiegrad

Der Eigenverbrauchs- und Autonomiegrad werden dem Benutzer zuerst angezeigt. Abbildung 6-32 zeigt die Felder, in denen diese Werte dargestellt werden.

Results

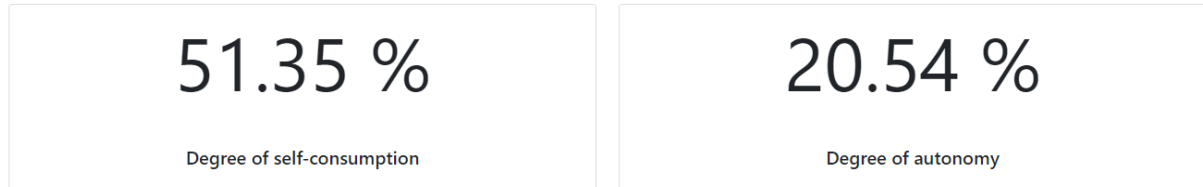


Abbildung 6-32: Eigenverbrauchsgrad (links) und Autonomiegrad (rechts)

6.5.2 Heiz- und Kühlbedarf

Nach dem Eigenverbrauchs- und Autonomiegrad wird der Heiz- und Kühlbedarf, wie in Abbildung 6-33 zu sehen, über den gesamten Berechnungszeitraum dargestellt. Mit Hilfe der farbigen Rechtecke über dem Diagramm kann die entsprechende Datenreihe aus dem Diagramm ausgeblendet werden.

Thermal demand

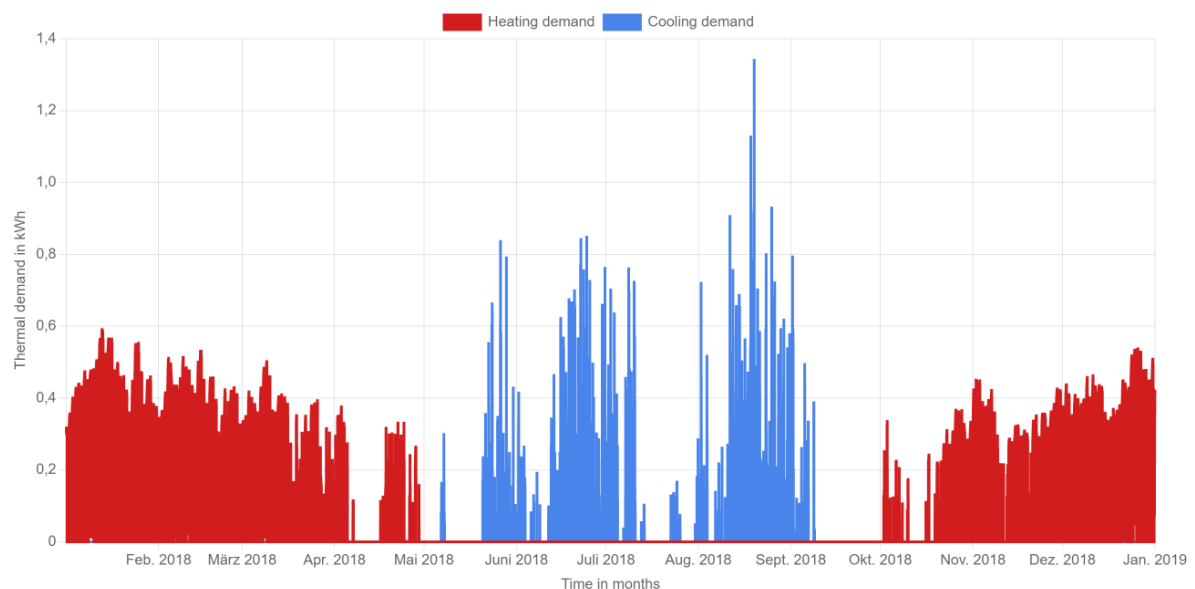


Abbildung 6-33: Heiz- und Kühlbedarf

6.5.3 Temperaturen

ProsOpt liefert auch die resultierenden Temperaturen der einzelnen Geschosse als Ergebnis. Dieser werden auch als Diagramm auf der Ergebnisseite dargestellt, wie in Abbildung 6-34 zu sehen ist.

Indoor temperatures

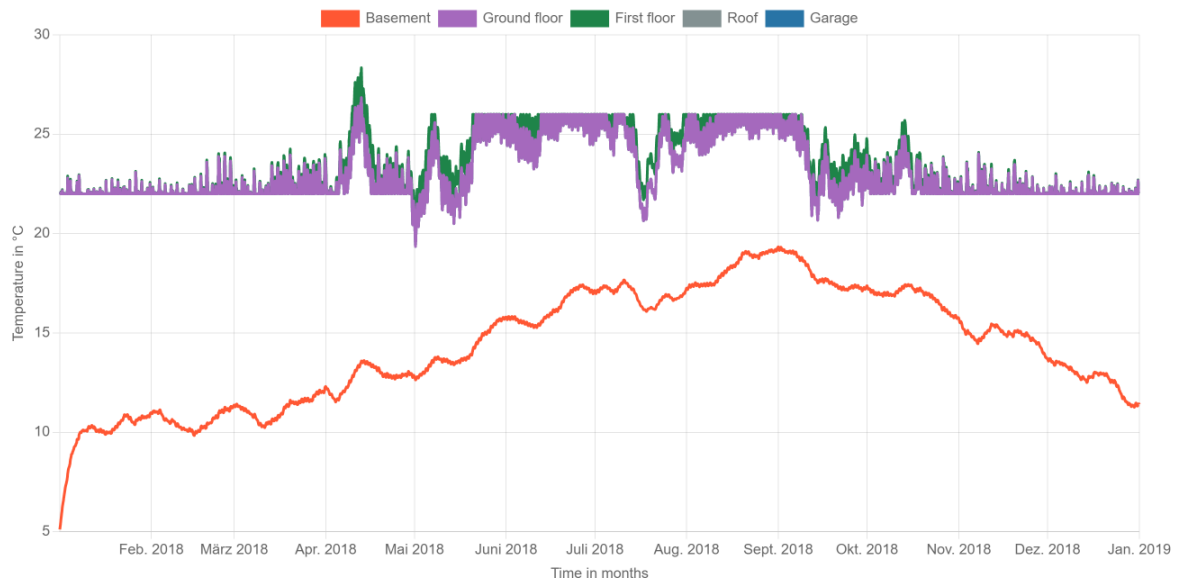


Abbildung 6-34: Temperaturen

6.5.4 PV-Anlage

Nach den Temperaturen der Geschosse sind die Ergebnisse für die PV-Anlage zu sehen, Diese sind in Abbildung 6-35 dargestellt. Über dem Diagramm befinden sich die ermittelte Spitzenleistung der Anlage und die Anzahl der Module, die auf der Dachfläche platziert werden. Das Diagramm darunter stellt die Leistung der PV-Anlage über den gesamten Berechnungszeitraum dar und zeigt auch den Einfluss der Verschattungsanalyse auf die Leistung der PV-Anlage.

Photovoltaic system results

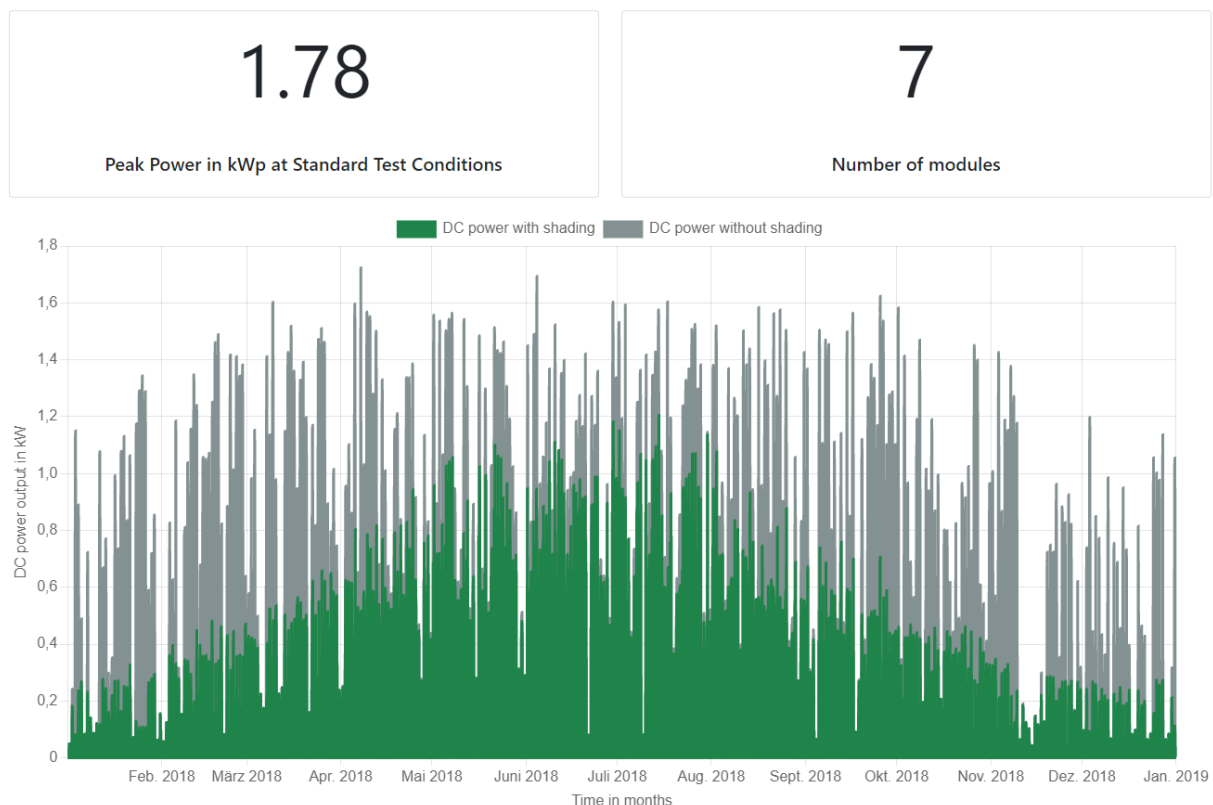


Abbildung 6-35: Erzeugungsprofil der PV-Anlage mit und ohne Verschattung

6.5.5 Speicherstände

Das letzte Diagramm auf der Ergebnisseite zeigt die Speicherstände über den Berechnungszeitraum für die einzelnen Speichersysteme. Diese sind in Abbildung 6-36 dargestellt. Anhand dieses Diagramms sei auch das Ein- und Ausblenden von Datenreihen gezeigt. Mit einem Klick auf das graue Rechteck über dem Diagramm, wird die zweite Temperaturzone des Wärmespeichers ausgeblendet und das Diagramm neu skaliert. Das Ergebnis ist in Abbildung 6-37 zu sehen.

Storage levels

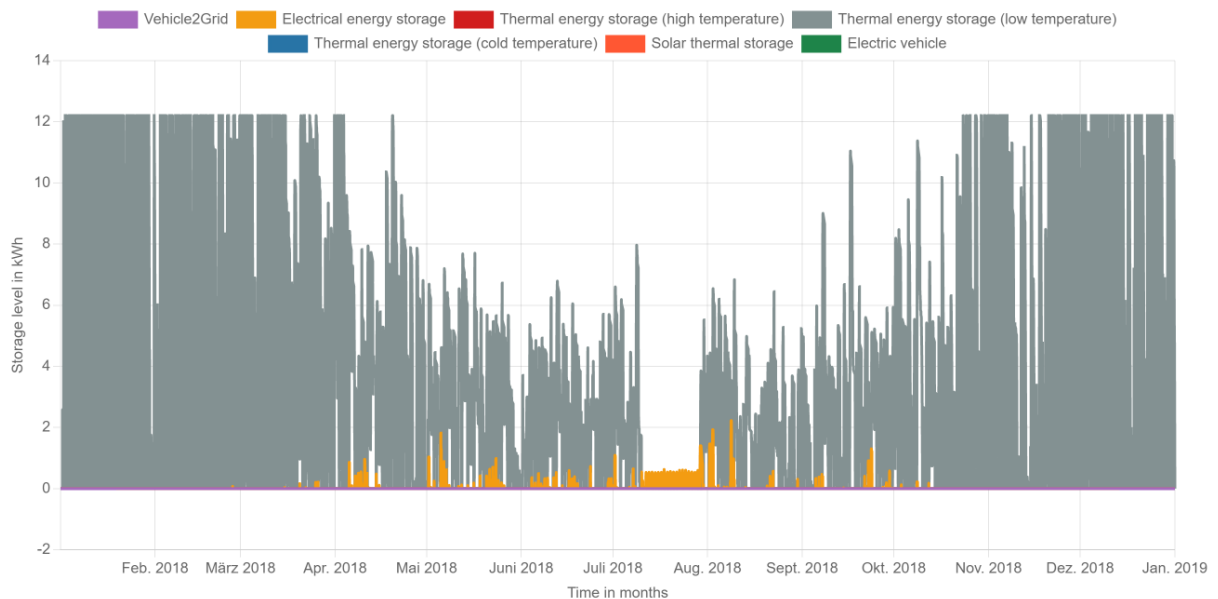


Abbildung 6-36: Speicherstände Ansicht 1

Storage levels

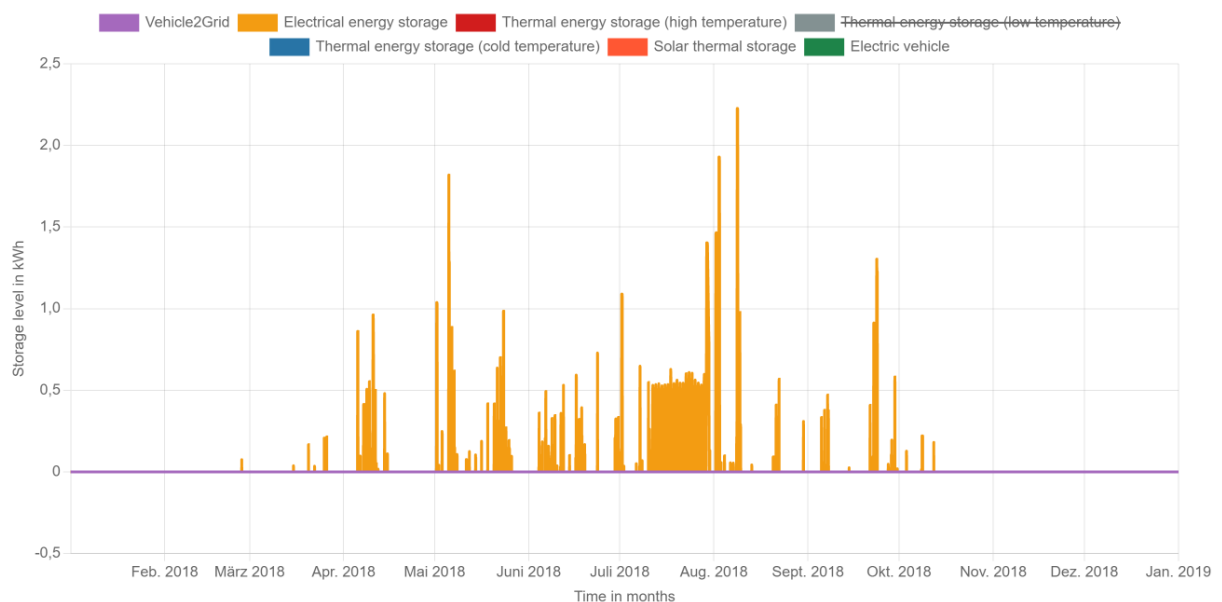


Abbildung 6-37: Speicherstände Ansicht 2

7 Berechnungen

Die aktuell steigenden Energiepreise machen PV- und Speicheranlagen für Einfamilienhaushalte immer interessanter. Anhand von zwei Berechnungsbeispielen, welche mit ProsOpt durchgeführt worden sind, wird untersucht, ob eine PV-Anlage mit elektrischem Energiespeicher zu einer Senkung der jährlichen Energiekosten führen kann und wenn ja, wie diese Anlagen zu dimensionieren sind. Zusätzlich werden die Auswirkungen der Verschattung auf die PV-Anlage und die jährlichen Energiekosten untersucht.

7.1 Szenario 1

Szenario 1 beschreibt einen Einfamilienhaushalt bestehend aus den zwei Elternteilen und einem Kind. Das Gebäude gliedert sich in zwei Geschosse, hat eine Länge von 10 m und eine Breite von 8 m, das Dach ist als Flachdach ausgeführt. Außerdem ist das Gebäude mit einem Keller in Tiefbauweise ausgeführt. In der unmittelbaren Umgebung befinden sich drei Gebäude, deren Höhe 15 m über der Geländeoberkante liegen. Die Bruttogeschossfläche des betrachteten Gebäudes 80 m² und es hat ein Raumvolumen von 560 m³. Abbildung 7-1 zeigt die Gebäudeanordnung in der Draufsicht. Das Einfamilienhaus ist in blau dargestellt, die umliegenden Gebäude B1-B3 sind in grau dargestellt.

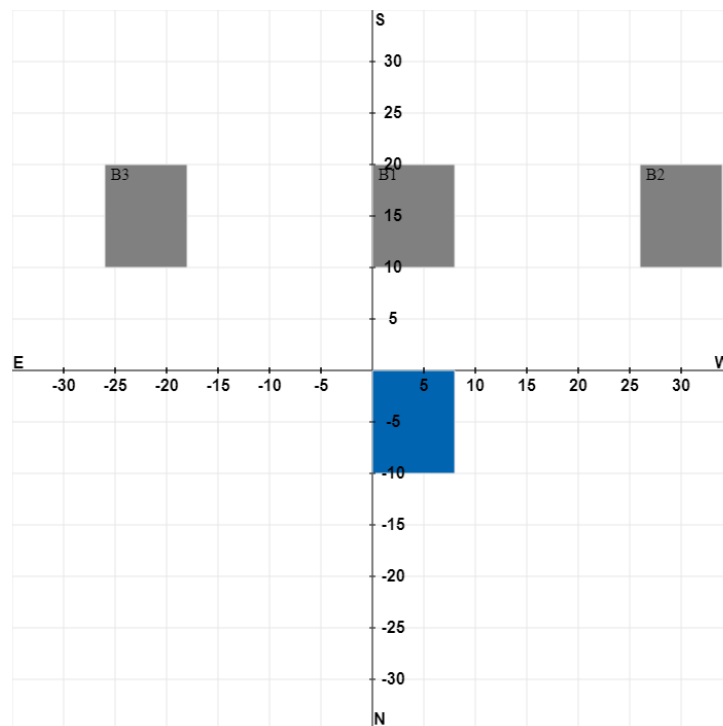


Abbildung 7-1: Gebäudeanordnung

Der elektrische Energieverbrauch und der Warmwasserbedarf der Familie ist mit Hilfe des LoadProfileGenerators von N. Pflugradt erzeugt worden [13]. Diese Daten sind mit dem Preset CHR03 für den LoadProfileGenerator erzeugt worden und in den nachfolgenden Grafiken

dargestellt. Im Juli ist die Familie auf Urlaub, weshalb der elektrische Energiebedarf in dieser Zeit sehr gering ist.

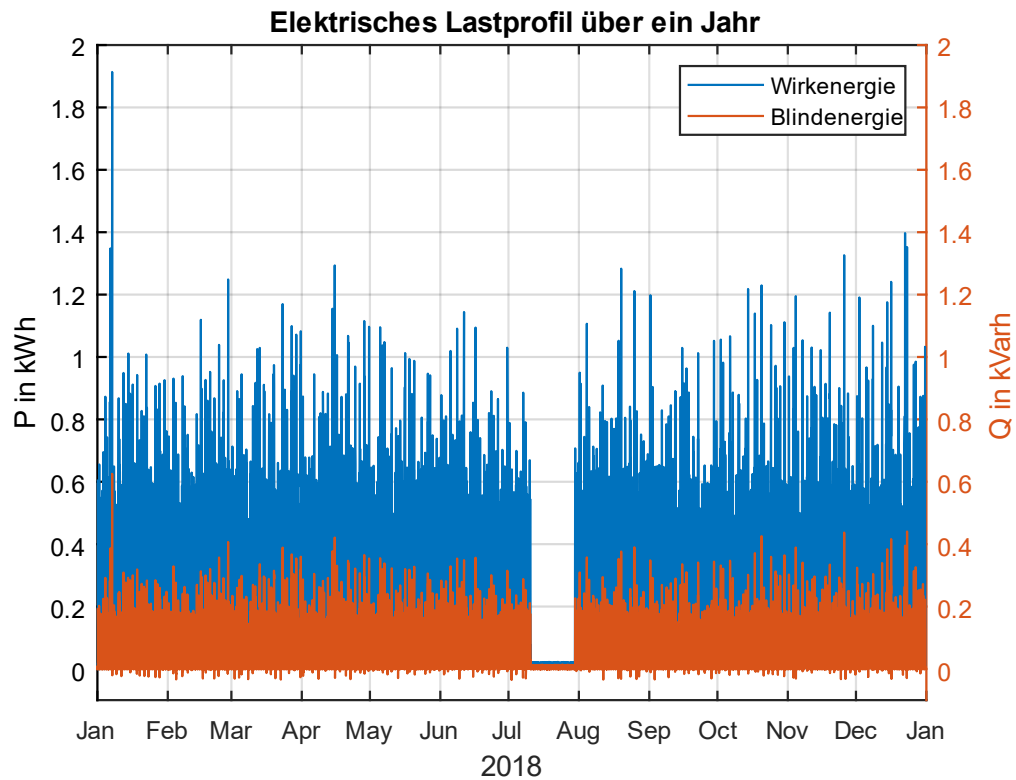


Abbildung 7-2: Elektrisches Lastprofil über ein Jahr für Szenario 1

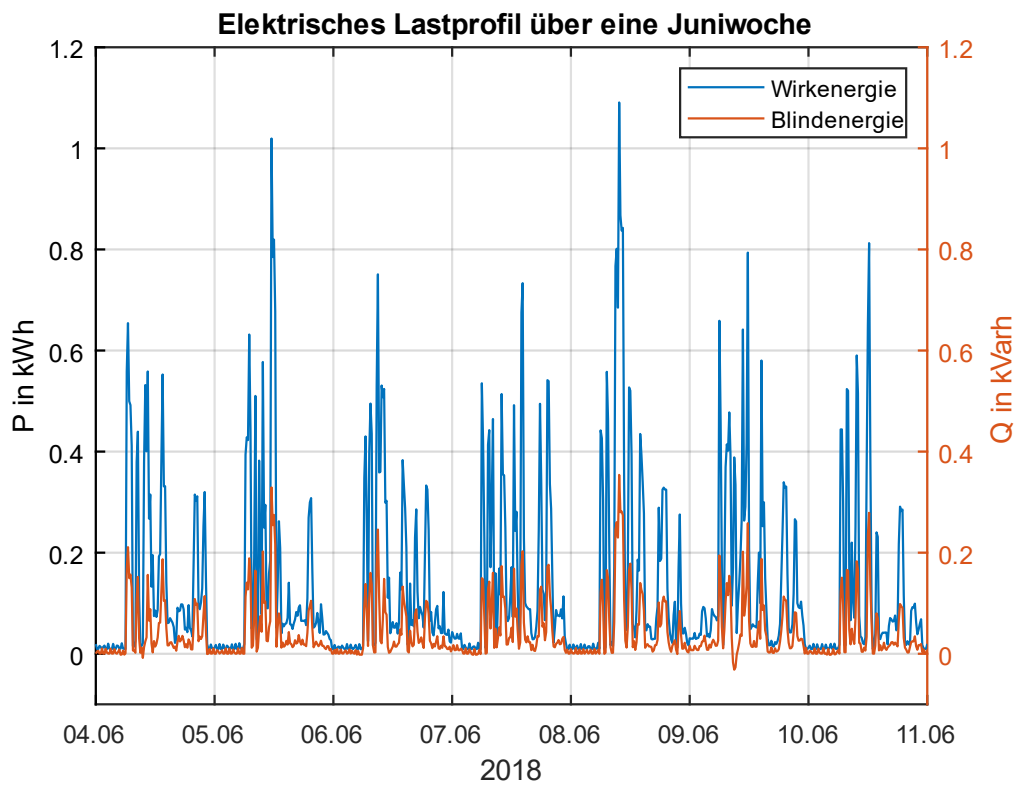


Abbildung 7-3: Elektrisches Lastprofil über eine Juniwoche für Szenario 1

Zur Heizung des Gebäudes dient eine Wärmepumpe mit einem thermischem Speichersystem. Für diese Systeme sind die Standardwerte, welche in ProsOpt hinterlegt sind, gewählt worden. Zusätzlich ist auch eine Klimaanlage zur Kühlung installiert. Die genauen Berechnungsparameter für dieses Szenario können dem Kapitel 10.1 entnommen werden.

Die jährlichen Energiekosten werden berechnet, indem die Anzahl an Kilowattstunden pro Technologie mit den Stromgestehungskosten multipliziert werden. Das Vergleichsszenario für die jährlichen Energiekosten ist derselbe Haushalt, allerdings ohne PV-Anlage und elektrischen Energiespeicher. Das bedeutet, dass bei der Ausgangslage sämtliche elektrische Energie aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen wird.

7.1.1 Ökonomische Parameter

Die aktuellen Preise für den Bezug bzw. die Einspeisung sind dem Tarifikalkulator der E-Control entnommen worden [14]. Der Tarif für den Bezug elektrischer Energie in der Steiermark beträgt aktuell ca. 0,40 €/kWh. Für die Einspeisung überschüssiger elektrischer Energie durch die PV-Anlage werden Prosumer mit ca. 0,10 €/kWh vergütet.¹⁰

Die Investitionskosten für die PV-Anlage werden mit 900 €/kWp angenommen und der Stromspeicher mit 1000 €/kWh.

Die restlichen Technologien werden mit den in ProsOpt gespeicherten Stromgestehungskosten bewertet. Diese Werte können aus Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Angenommene Stromkosten in ProsOpt

Technologie	Stromkosten in €/kWh
Wärmepumpe	0,15
Klimaanlage	0,20
Wärmespeicher Zone 1	0,05
Wärmespeicher Zone 2	0,05
Wärmespeicher Heizpatronen	0,05

7.1.2 Methode

Um die Auswirkungen der Dimensionierung der PV-Anlage und des elektrischen Energiespeichers zu erfassen, ist ProsOpt mehrmals mit unterschiedlichen Systemparametern ausgeführt worden. Variiert worden sind die Anzahl der PV-Module von 1-20 Stück und die Speicherkapazität des elektrischen Energiespeichers von 0-20 kWh.

¹⁰ Stand 25.07.2022

7.1.3 Ergebnisse

7.1.3.1 Eigenverbrauchsgrad

Der Eigenverbrauchsgrad (EVG) eines Prosumers gibt an, welcher Anteil der erzeugten elektrischen Energie vom Prosumer selbst genutzt wird. Sei es direkt für den Betrieb elektrischer Verbraucher oder zur Aufladung eines elektrischen Energiespeichers, um die elektrische Energie später nutzen zu können.

Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 zeigen die Erzeuger- und Lastprofile für den 06.04. für zwei PV-Anlagen unterschiedlicher Spitzenleistung. Die Anlage mit acht PV-Modulen besitzt eine Spitzenleistung von 2,04 kWp, die Anlage mit 18 PV-Modulen hat 4,59 kWp. Die Ergebnisse für diesen Zeitraum sind mit und ohne Verschattungsanalyse ident, da es zu dieser Jahreszeit keine Verschattung durch die umliegenden Gebäude gibt.

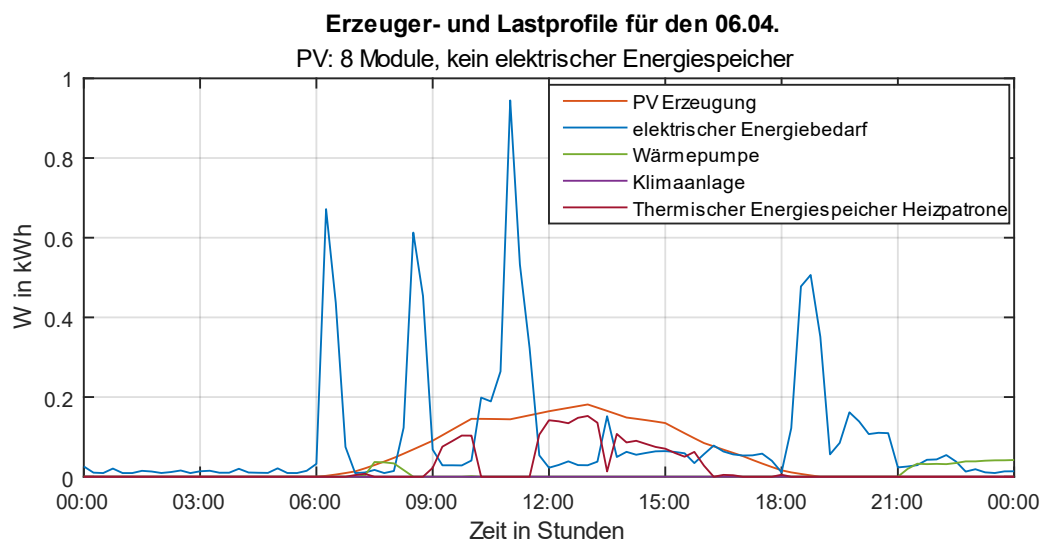


Abbildung 7-4: Erzeuger- und Lastprofile für den 06.04.; 8 PV-Module, kein elektrischer Energiespeicher, Szenario 1

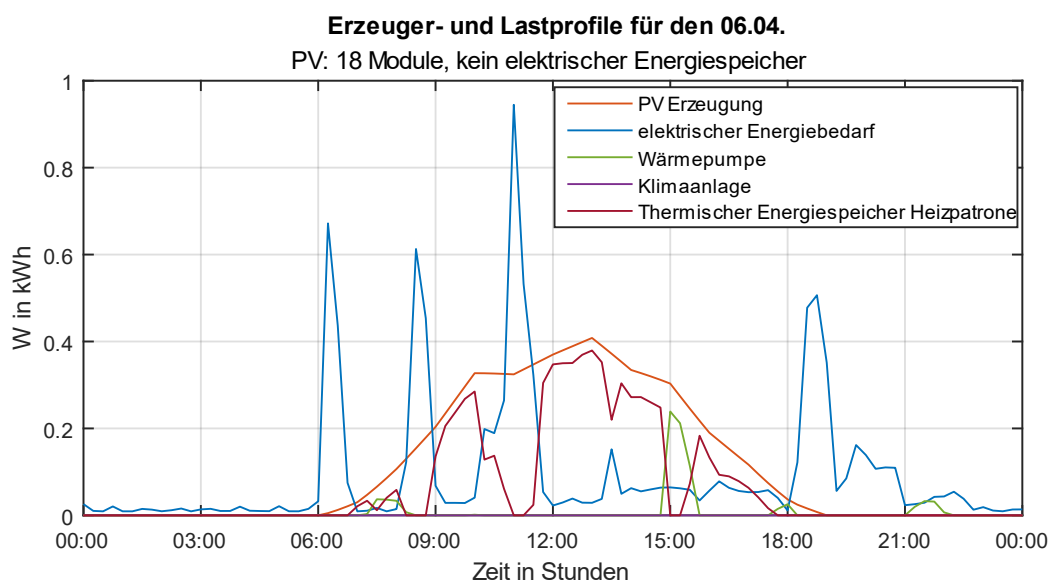


Abbildung 7-5: Erzeuger- und Lastprofile für den 06.04.; 18 PV-Module, kein elektrischer Energiespeicher, Szenario 1

Die blaue Linie stellt den elektrischen Energiebedarf dar. Dieser zeigt Lastspitzen in der Früh-, am Vormittag, zu Mittag und in den Abendstunden. Die orange Linie zeigt den Ertrag der PV-Anlage. Bei der größeren PV-Anlage ist deutlich zu erkennen, dass die Heizpatrone des thermischen Speichers stärker benutzt wird, um die erzeugte Energie lokal zu verbrauchen, anstatt sie ins Netz zu speisen. Steigt der elektrische Energiebedarf, wie zB gegen Mittag, werden zusätzliche Verbraucher wie die Heizpatrone oder die Wärmepumpe vom Optimierungsalgorithmus ausgeschaltet, um einen möglichst großen Teil der Lastspitze über die PV-Anlage zu decken.

Abbildung 7-6 zeigt ein sogenanntes Konturdiagramm für den Eigenverbrauchsgrad. Auf der Abszisse ist die Kapazität des elektrischen Energiespeichers und Auf der Ordinate ist die Anzahl der installierten PV-Module aufgetragen.

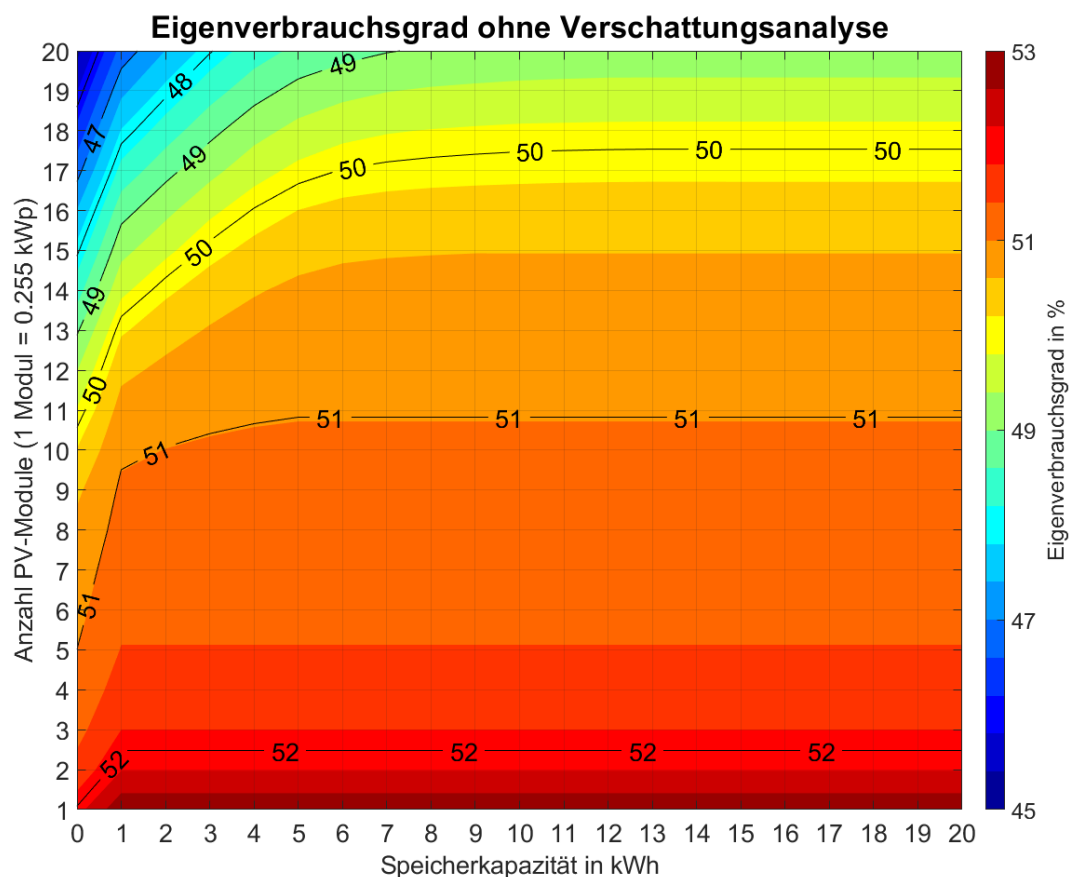


Abbildung 7-6: Eigenverbrauchsgrad ohne Verschattung, Szenario 1

Zu jeder Kombination der beiden Größen ist ein Wert für den EVG mit Hilfe von ProsOpt ermittelt worden. Zur optischen Unterscheidung sind die Werte für den EVG farblich skaliert. Die schwarzen Linien repräsentieren Linien gleichbleibenden Eigenverbrauchsgrad.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass der EVG für eine zunehmende Anzahl an PV-Modulen ohne Speichersystem immer weiter sinkt. Das hängt damit zusammen, dass die erzeugte Energie nicht immer direkt verbraucht werden kann.

Durch Installation eines elektrischen Energiespeichers kann der EVG für eine PV-Anlage gesteigert werden, aber nur bis zu einem gewissen Grad. Das ist daran zu erkennen, dass die schwarzen Konturlinien mit zunehmender Speicherkapazität stark abflachen.

Abbildung 7-7 zeigt die Erzeuger-, Last- und Speicherprofile für einen Tag für eine PV-Anlage mit 4,59 kWp und einen elektrischen Energiespeicher mit einer Kapazität von 4 kWh. Die grüne Linie stellt die Energie dar, die in den elektrischen Speicher geladen wird. Zu erkennen ist, dass der Optimierungsalgorithmus den elektrischen Energiespeicher nur lädt, wenn die Erzeugung der PV-Anlage höher als der elektrische Energiebedarf ist. Die gespeicherte elektrische Energie wird genutzt, wenn es zu Lastspitzen kommt, um einen Energiebezug aus dem Netz zu vermeiden.

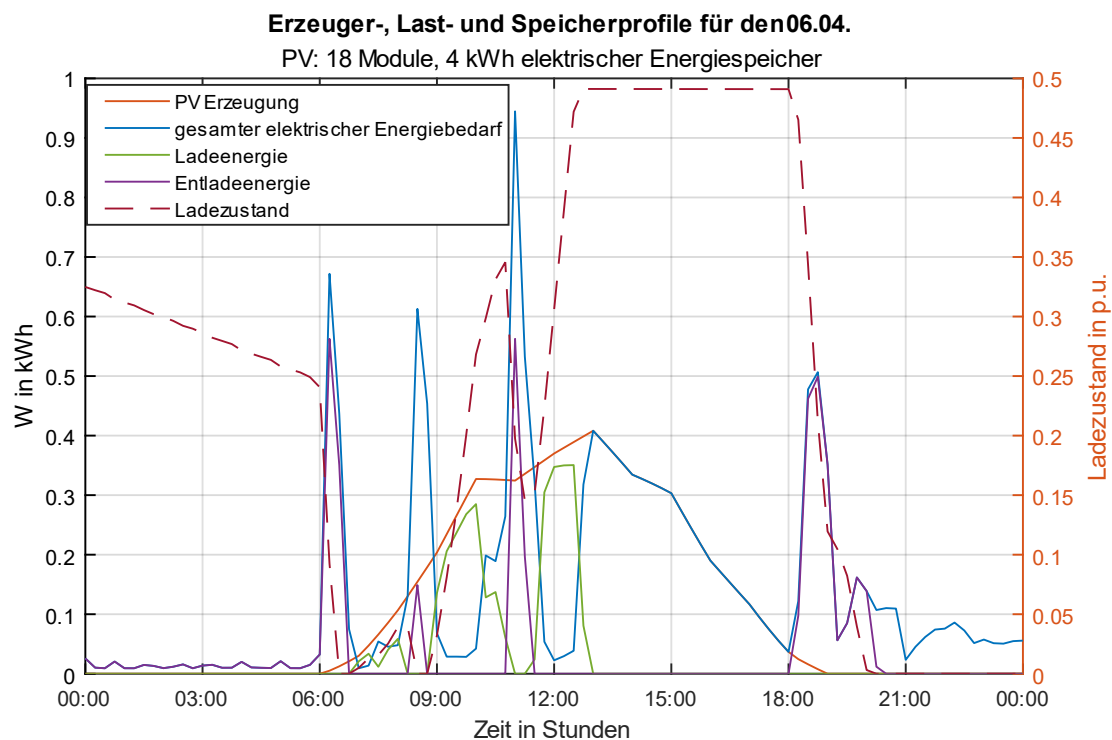


Abbildung 7-7: Erzeuger-, Last- und Speicherprofile für den 06.04.; 18 PV-Module, 4 kWh elektrischer Energiespeicher, Szenario 1

Abbildung 7-5 stellt die gleichen Kurven für das System dar, allerdings hat der elektrische Energiespeicher nun eine Speicherkapazität von 10 kWh. Durch die größere Speicherkapazität können die Lastspitzen an diesem Tag besser mit Hilfe des elektrischen Speichers gedeckt werden. Allerdings ist auch hier zu erkennen, dass der elektrische Speicher nur mit überschüssiger Energie aus der PV-Anlage geladen wird. Dadurch ergibt sich auf die ganze Berechnungsdauer gesehen kein erhöhter Eigenverbrauchsgrad, da die PV-Anlage dazu wesentlich mehr Energie erzeugen müsste.

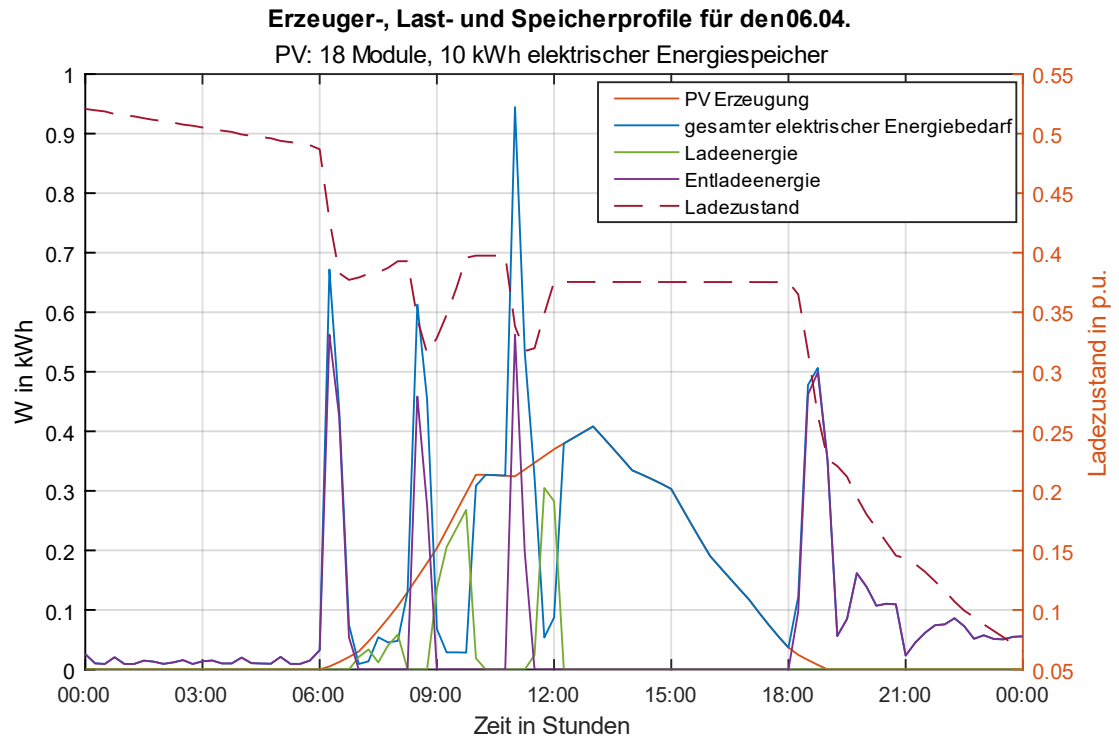


Abbildung 7-8: Erzeuger-, Last- und Speicherprofile für den 06.04.; 18 PV-Module, 10 kWh elektrischer Energiespeicher, Szenario 1

Abbildung 7-9 zeigt die Eigenverbrauchsgrade mit Verschattungsanalyse.

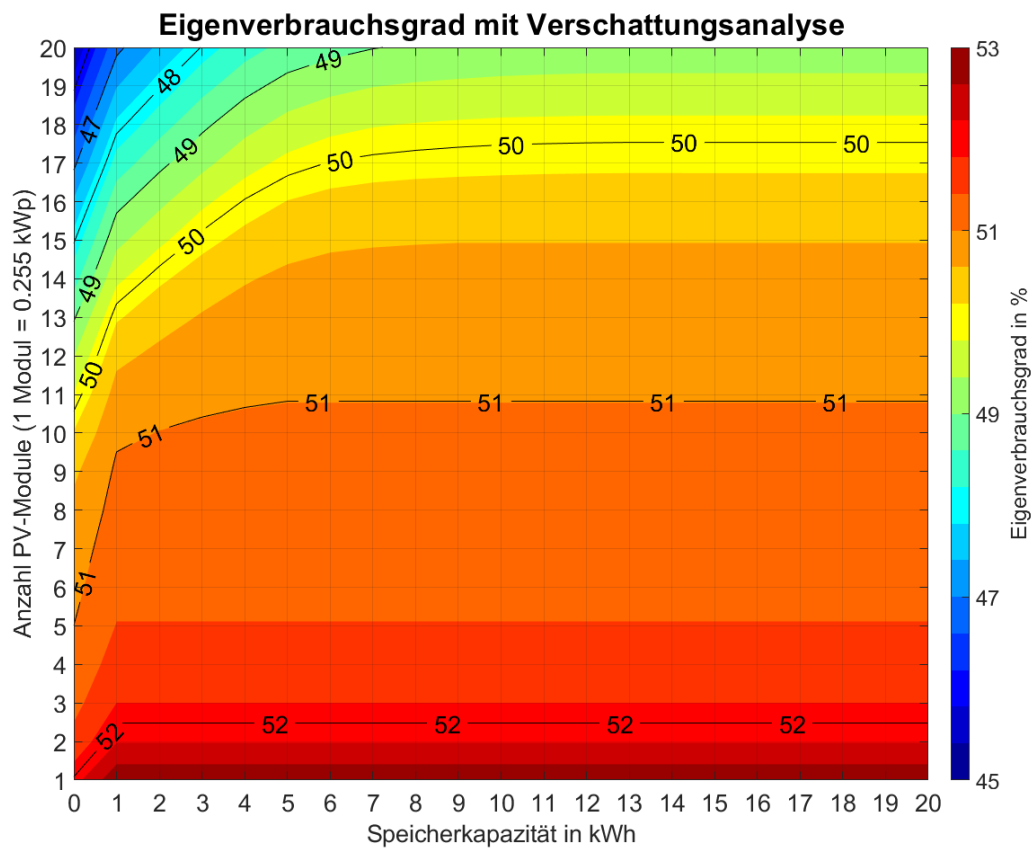


Abbildung 7-9: Eigenverbrauchsgrad mit Verschattungsanalyse, Szenario 1

Es zeigt sich, dass die Verschattung keinen Einfluss auf den EVG hat. Zum Verständnis betrachte man die erzeugte Energie der PV-Anlage in Abbildung 7-10 für eine PV-Anlage mit 4,59 kWp.

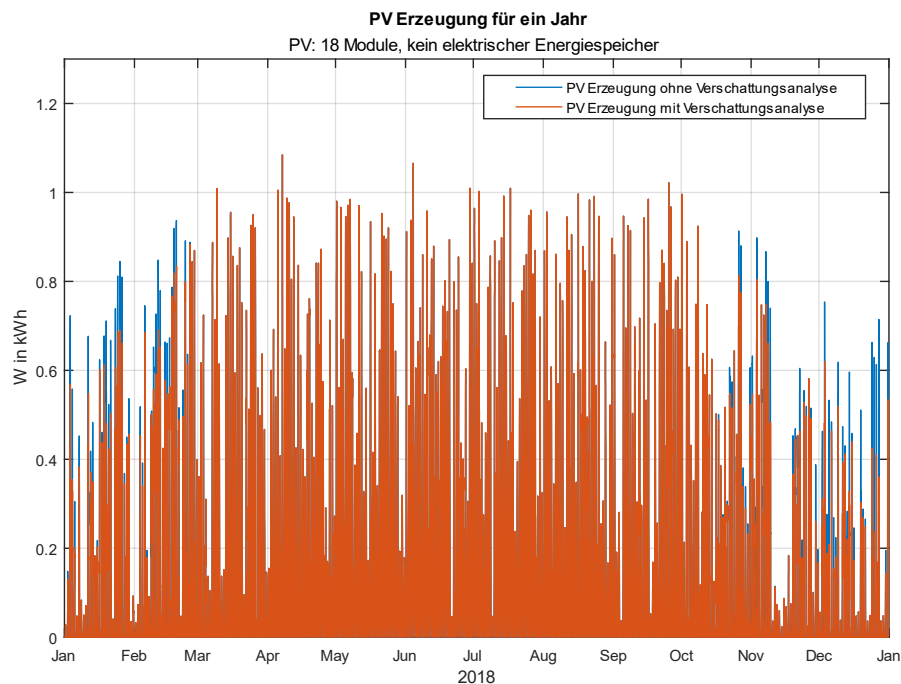


Abbildung 7-10: PV Erzeugung mit und ohne Verschattungsanalyse

Es ist zu erkennen, dass die Verschattung nur in den Wintermonaten einen Einfluss auf den Ertrag der PV-Anlage hat. Das erklärt auch, warum die Verschattung keinen Einfluss auf den EVG hat. Die Verschattung mindert den Ertrag nur in den Wintermonaten, in diesen Monaten findet aber, wie in Abbildung 7-11 dargestellt, keine Einspeisung statt. Infolgedessen ist der EVG in den Wintermonaten immer eins, da die erzeugte Energie der PV-Anlage direkt verbraucht wird.

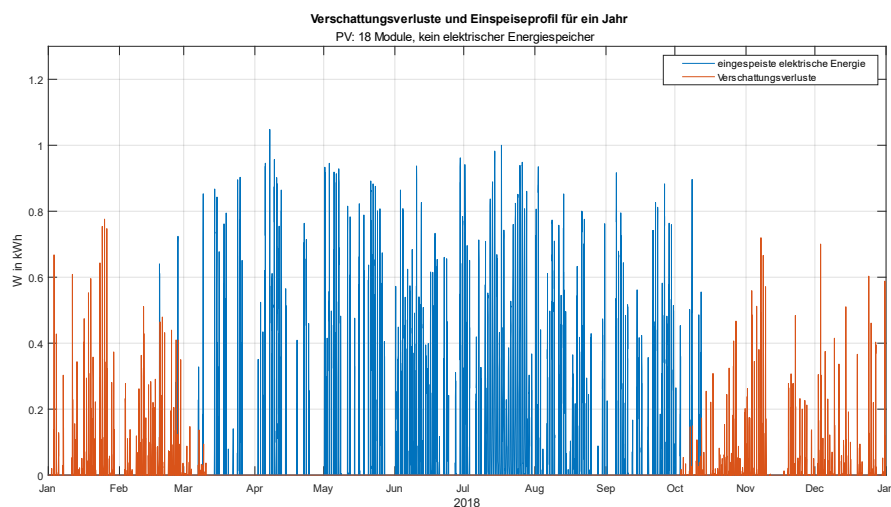


Abbildung 7-11: Verschattungsverluste und Einspeiseprofil für ein Jahr; 18 PV-Module, kein elektrischer Energiespeicher, Szenario 1

7.1.3.2 Autonomiegrad

Der Autonomiegrad (AG) eines Prosumers beschreibt, wie groß der Anteil der selbst erzeugten und genutzten elektrischen Energie im Vergleich zum Gesamtbedarf an elektrischer Energie ist. Abbildung 7-12 zeigt die Ergebnisse des Autonomiegrads für das Szenario ohne Verschattungsanalyse.

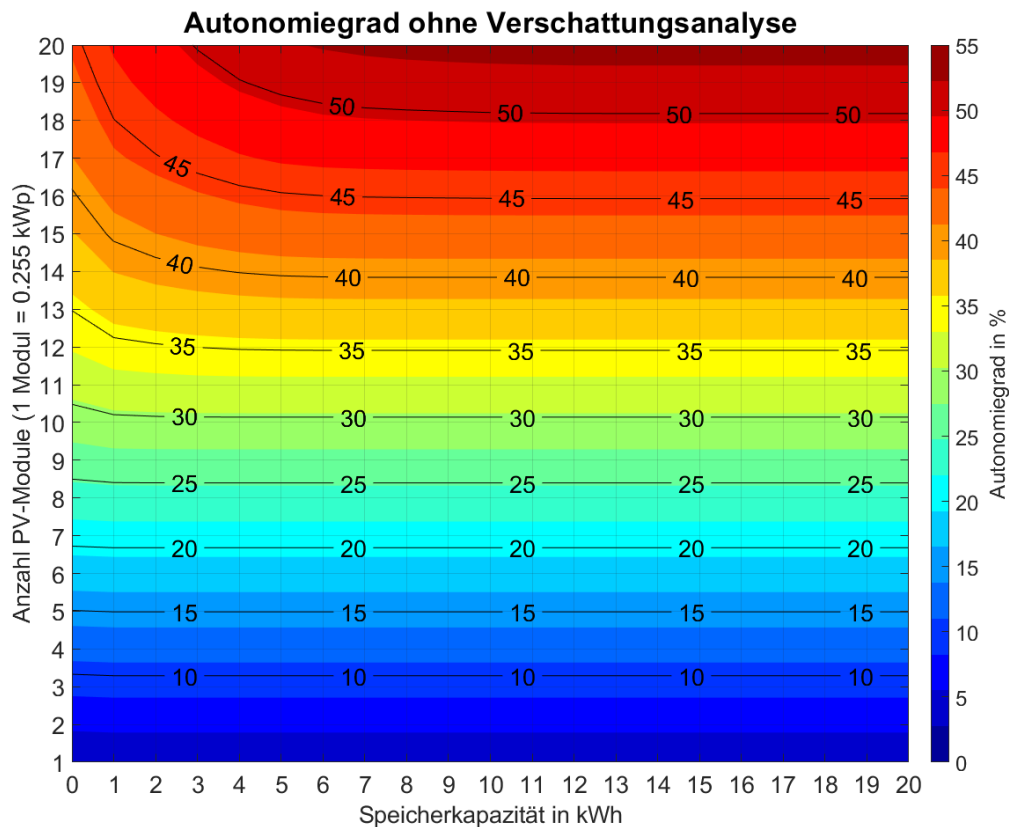


Abbildung 7-12: Autonomiegrad ohne Verschattungsanalyse, Szenario 1

Für PV-Anlagen ohne Speichersystem steigt der Autonomiegrad mit zunehmender Anzahl an PV-Modulen. Das liegt an der höheren Erzeugungsleistung größerer PV-Anlagen. Allerdings ist zu erkennen, dass die Steigerung der kWp-Leistung der PV-Anlage immer weniger zum AG beiträgt, da der erzeugte Strom der PV-Anlage nicht immer direkt verbraucht werden kann. Durch die Installation eines elektrischen Energiespeichers kann der AG für eine gegebene PV-Anlage beeinflusst werden. Im dargestellten Szenario ist der Einfluss des Energiespeichers erst ab einer PV-Anlagengröße von 3 kWp deutlich sichtbar. Bei einer PV-Anlage mit geringerer kWp-Leistung würde ein elektrischer Speicher zu keinem höheren Autonomiegrad führen, da die erzeugte Energie direkt verbraucht wird. Deutlich sichtbar ist auch, dass die Speicherkapazität des elektrischen Energiespeichers bezogen auf den Autonomiegrad einen begrenzten Einfluss hat. Ab einer gewissen Speichergröße, in diesem Szenario ca. 4-5 kWh Speicherkapazität, flachen die Konturlinien wie zuvor beim Eigenverbrauchsgrad ab. Das bedeutet, dass ab diesem Punkt keine Steigerung des Autonomiegrads durch Erhöhung der Speicherkapazität erreicht werden kann.

Berücksichtigt man die Verschattung, so ergibt sich für den Autonomiegrad folgender Konturplot nach Abbildung 7-13:

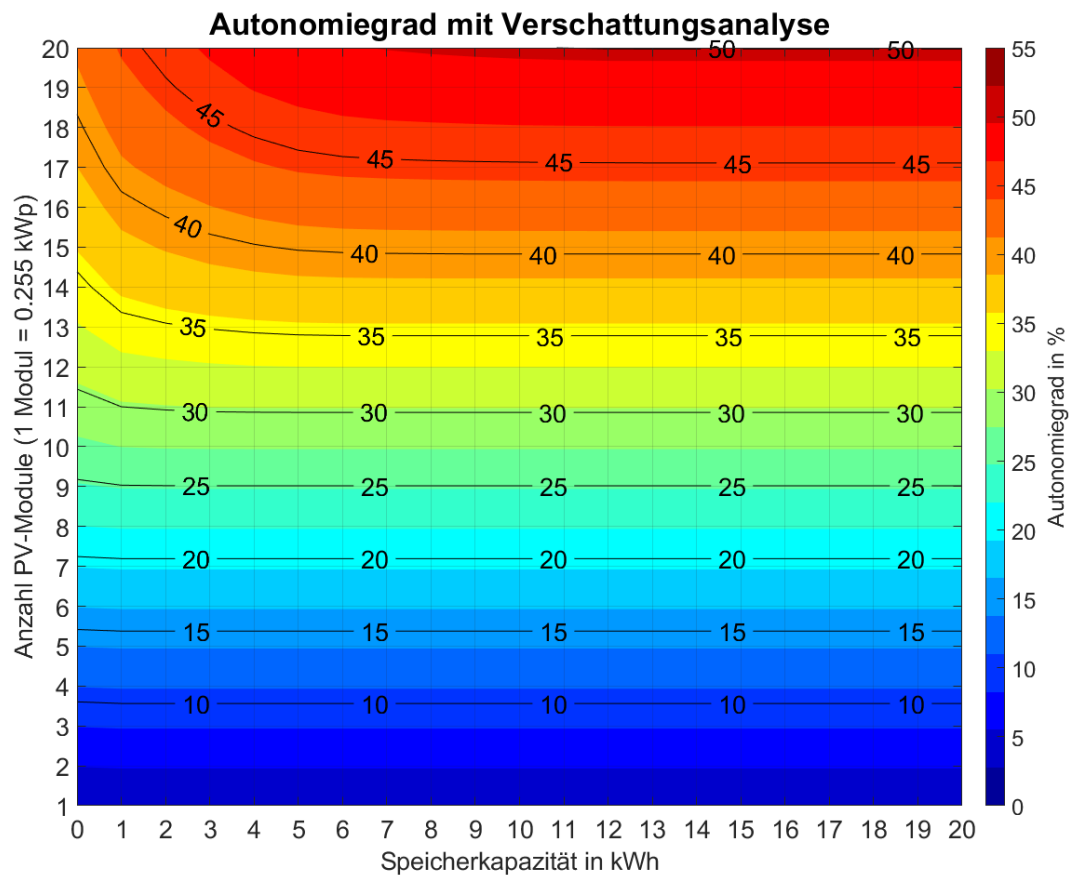


Abbildung 7-13: Autonomiegrad mit Verschattungsanalyse, Szenario 1

Es ist deutlich zu sehen, dass der AG für eine gegebene Anlage deutlich sinkt, wenn die Verschattung der PV-Module berücksichtigt wird. Allerdings hat die Verschattung keine Auswirkung auf die Speicherkapazität. Es ist wieder ersichtlich, dass eine Speicherkapazität von ca. 4-5 kWh ausreicht, um den AG für eine gegebene Anlage zu maximieren.

7.1.3.3 Jährliche Energiekosten

Die jährlichen Energiekosten bezogen auf das Ausgangsszenario ohne PV-Anlage und elektrischen Energiespeichers ohne Verschattungsanalyse sind in Abbildung 7-14 dargestellt.

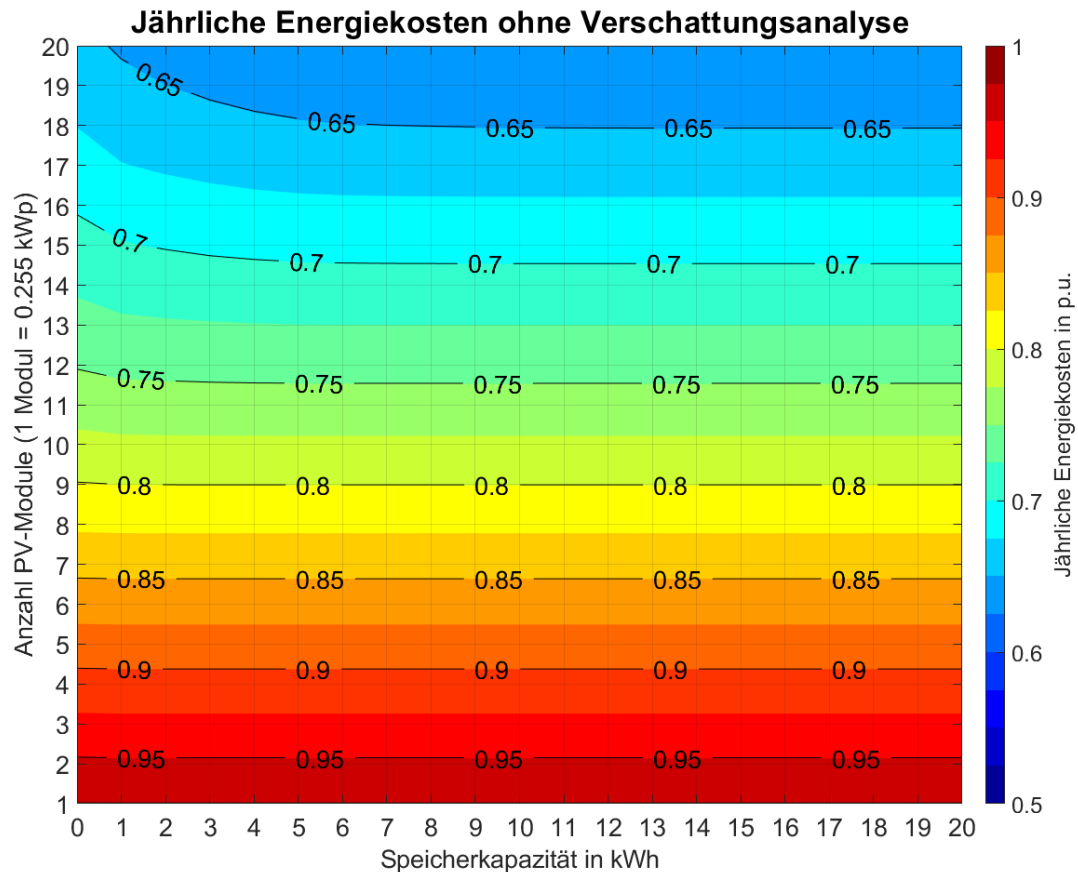


Abbildung 7-14: Jährliche Energiekosten ohne Verschattungsanalyse, Szenario 1

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst kleine PV-Anlagen für das gewählte Szenario eine ökonomische Entlastung bewirken. Analog zu den Ergebnissen des AG ist zu erkennen, dass elektrische Energiespeicher keinen Einfluss für PV-Anlagen, die kleiner als 3 kWp sind, haben. Erst für größere Anlagen kann der elektrische Energiespeicher zur Senkung der jährlichen Energiekosten beitragen. Es ist auch wieder zu erkennen, dass die Speichergöße nur bis ca. 4-5 kWh eine ökonomische Entlastung bieten.

Die Ergebnisse mit Verschattungsanalyse sind in Abbildung 7-15 dargestellt und zeigen eine Steigerung der Energiekosten im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Verschattung.

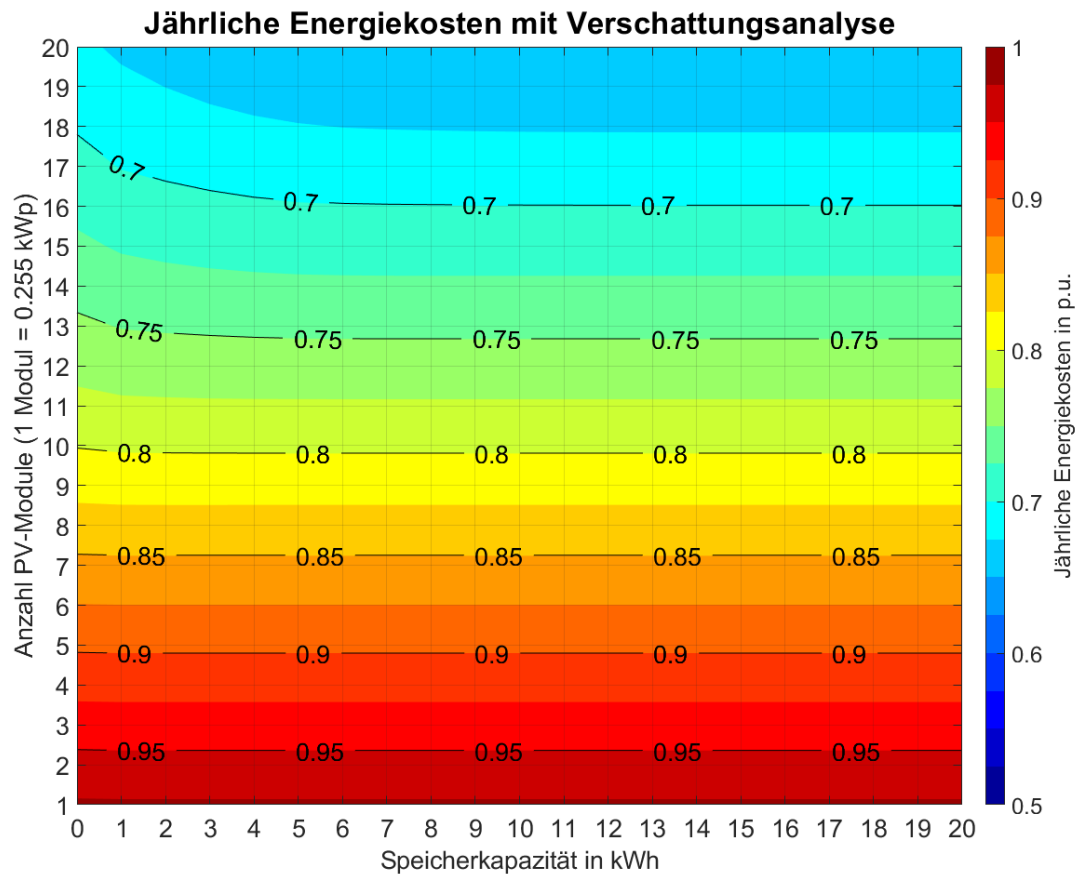


Abbildung 7-15: Jährliche Energiekosten mit Verschattungsanalyse, Szenario 1

Dies begründet sich damit, dass durch die Verschattung die jährlich erzeugte elektrische Energie im Vergleich mit der Betrachtung ohne Verschattung sinkt. So betragen beispielhaft für den Fall von 18 PV-Modulen und 5 kWh Speicherkapazität die jährlichen elektrischen Energiekosten 0,65 pu ohne Durchführung einer Verschattungsanalyse und mit Berücksichtigung sind sie um 0,03 pu höher, nämlich 0,68 pu.

7.1.4 Zusammenfassung

Das gewählte Szenario zeigt die Auswirkungen auf das Erzeugerprofil einer PV-Anlage durch die von umliegenden Gebäuden zeitabhängigen Schattenwürfe auf die PV-Module deutlich.

Zur Veranschaulichung sind in Tabelle 3 einige Punkte aus den Ergebnisdiagrammen von Szenario 1 mit konkreten Zahlenwerten angeführt. Der erste Eintrag repräsentiert das Vergleichsszenario für die jährlichen Energiekosten. Die Tabelle zeigt nur Ergebnisse mit Verschattungsanalyse, da diese die Realität abbilden.

Tabelle 3: Vergleichspunkte Szenario 1

Größe der PV-Anlage in kWp	Speicherkapazität in kWh	Eigenverbrauchsgrad in %	Autonomiegrad in %	Jährliche Energiekosten in €
0	0	0	0	3987
1,275	0	51	13,85	3573
1,275	2	51,42	13,96	3572
2,55	2	51,01	27,64	3176
3,825	3	50,09	39,41	2861
5,1	5	48,73	48,99	2610
5,1	10	49,13	49,96	2596

Durch die Verschattung sinkt der Ertrag der PV-Anlage und die ökonomischen Kostenvorteile nehmen ab. Deshalb ist es jedenfalls empfehlenswert die Umgebung und deren etwaigen Schattenwurf bei der Planung einer PV-Anlage zu berücksichtigen.

Die Installation eines elektrischen Energiespeichers bringt im betrachteten Szenario nur für PV-Anlagen, die größer als 3 kWp sind einen ökonomischen Vorteil. Zudem bringen Speicher, die eine Kapazität von 5 kWh oder mehr besitzen keine weiteren Kostenvorteile.

7.2 Szenario 2

Anhand von Szenario 2 soll gezeigt werden, welchen Einfluss die Tarifkosten für elektrische Energie haben. Es wird dieselbe Konfiguration wie aus Szenario 1 verwendet und die Ergebnisse miteinander verglichen.

7.2.1 Ökonomische Parameter

In den letzten Monaten sind die Preise vor allem für den Bezug elektrischer Energie in Österreich stark gestiegen. Szenario 2 nutzt daher für die Berechnung Preise, die auf dem Niveau vor den Erhöhungen liegen. Für den Bezug elektrischer Energie wird hier ein Preis von 0,20 €/kWh und ein Einspeisetarif von 0,07 €/kWh verwendet.¹¹

7.2.2 Ergebnisse

7.2.2.1 Eigenverbrauchsgrad

Nachfolgend sind die Ergebnisse für den Eigenverbrauchsgrad ohne Verschattungsanalyse für Szenario 2 in einem Konturplot dargestellt:

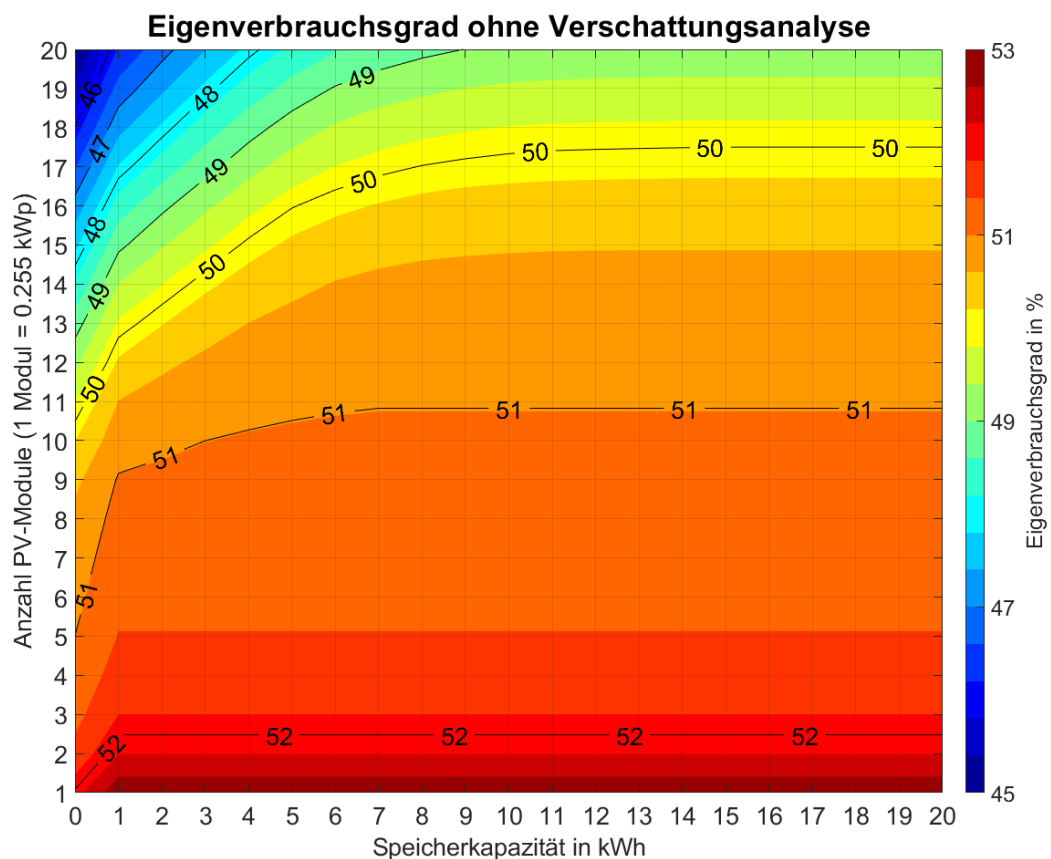


Abbildung 7-16: Eigenverbrauchsgrad ohne Verschattungsanalyse, Szenario 2

¹¹ Stand 01.07.2020

Die Ergebnisse für den Eigenverbrauchsgrad von Szenario 2 zeigen keinerlei Unterschiede zu den Ergebnissen aus Szenario 1. Das liegt daran, dass die Einspeisevergütung in beiden Szenarien sehr gering ist. Deshalb ist es für den Prosumer wesentlich effizienter, die erzeugte elektrische Energie der PV-Anlage selbst zu verbrauchen oder in einem elektrischen Energiespeicher zwischenspeichern.

Berücksichtigt man die Verschattung, so ergibt sich der Konturplot des Eigenverbrauchsgrad für Szenario 2 nach Abbildung 7-17:

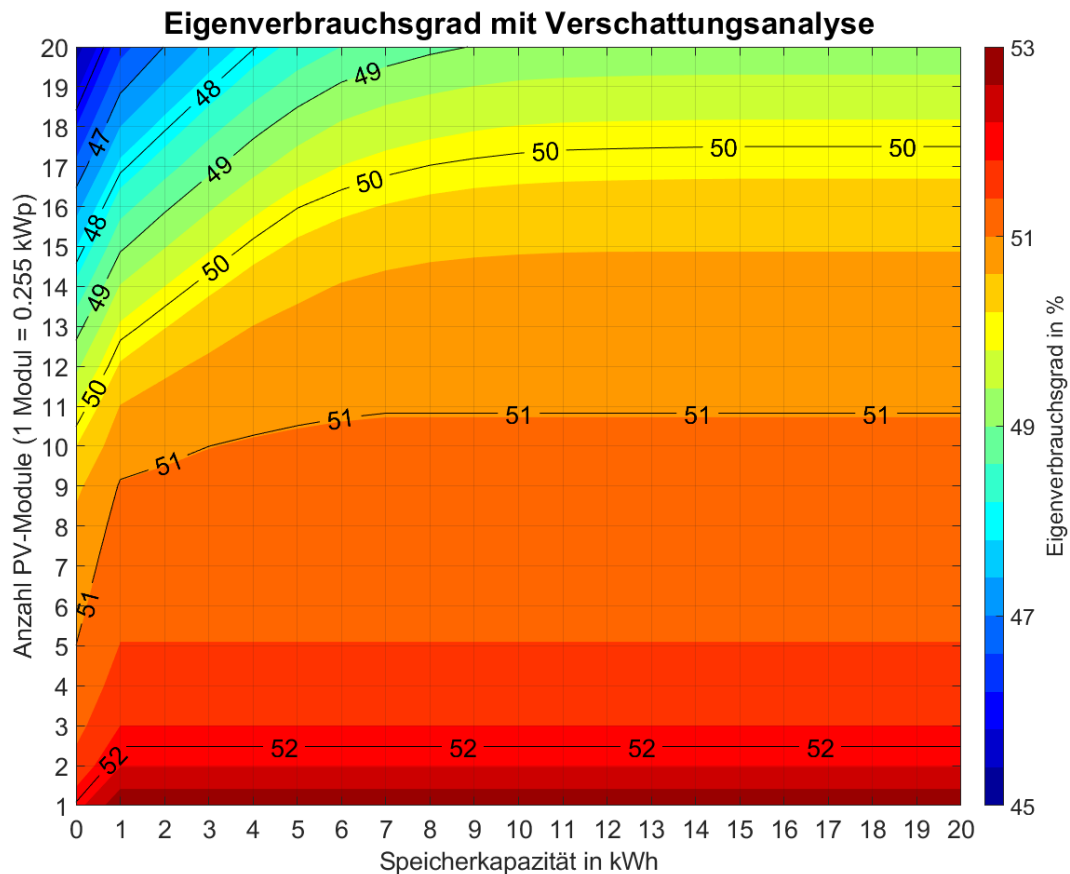


Abbildung 7-17: Eigenverbrauchsgrad mit Verschattungsanalyse, Szenario 2

Die Verschattung hat ebenfalls wie in Szenario 1 keinen Einfluss auf den Eigenverbrauchsgrad. Die Gründe hierfür sind ebenfalls dieselben, da sich die Lage der umliegenden Gebäude und das Prosumergebäude im Vergleich zu Szenario 1 nicht verändert haben. Dadurch tritt die Verschattung in Szenario 2 auch wieder nur in den Wintermonaten auf, in denen keine Einspeisung erfolgt, weshalb der EVG in diesen Zeiten 1 ist.

7.2.2.2 Autonomiegrad

Der Autonomiegrad für Szenario 2 ohne Verschattungsanalyse ist in Abbildung 7-18 dargestellt.

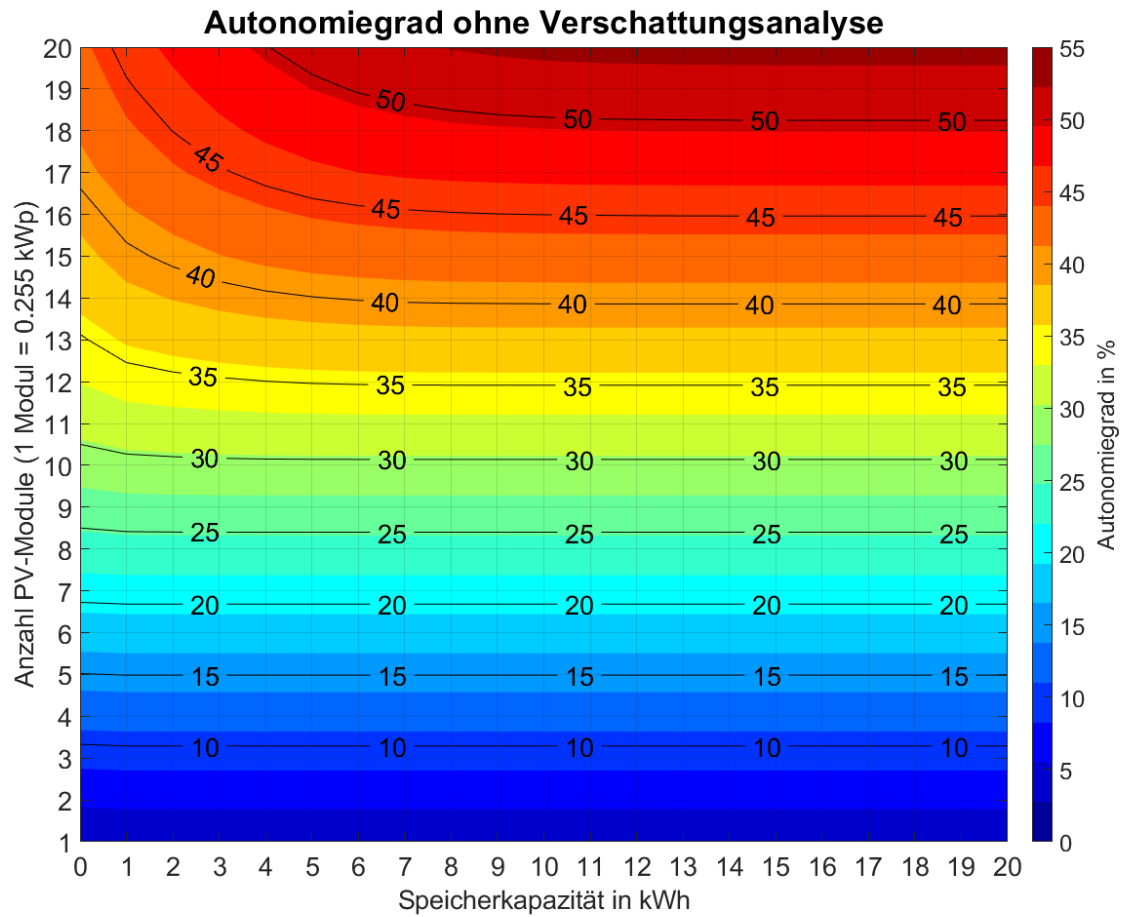


Abbildung 7-18: Autonomiegrad ohne Verschattungsanalyse, Szenario 2

Im Vergleich zu Szenario 1 verändert sicher der Autonomiegrad kaum, da der Optimierungsalgorithmus weiterhin versucht, die selbst erzeugte elektrische Energie möglichst im Prosumersystem zu verbrauchen.

Auch in den Ergebnissen mit integrierter Verschattungsanalyse zeigen sich kaum Unterschiede zu Szenario 1, wie in Abbildung 7-19 zu sehen ist.

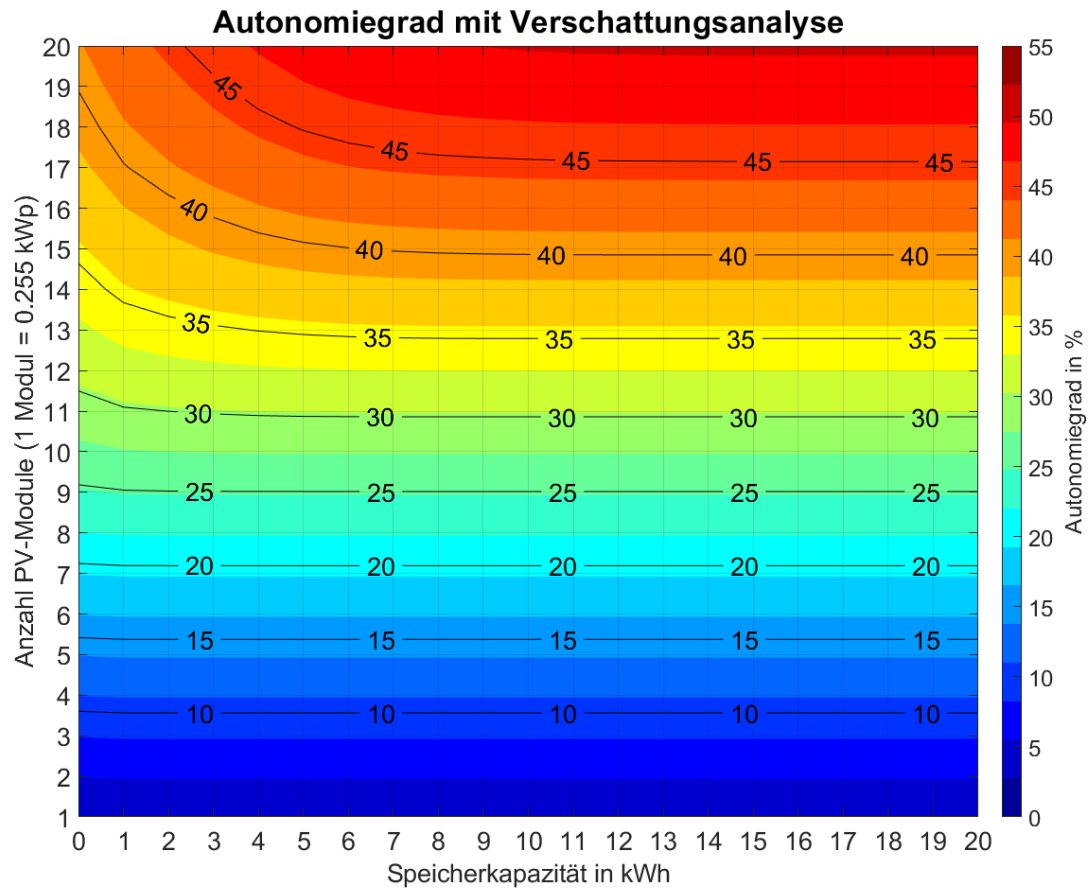


Abbildung 7-19: Autonomiegrad mit Verschattungsanalyse, Szenario 2

7.2.2.3 Jährliche Energiekosten

Die größte Auswirkung haben die niedrigeren Energiepreise auf die jährlichen Energiekosten. Durch den wesentlich geringeren Bezugstarif wird die Installation eines elektrischen Energiespeichers unattraktiver, da die Investitionskosten des Speichers im Vergleich zu den Bezugskosten zu hoch sind. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 7-20:

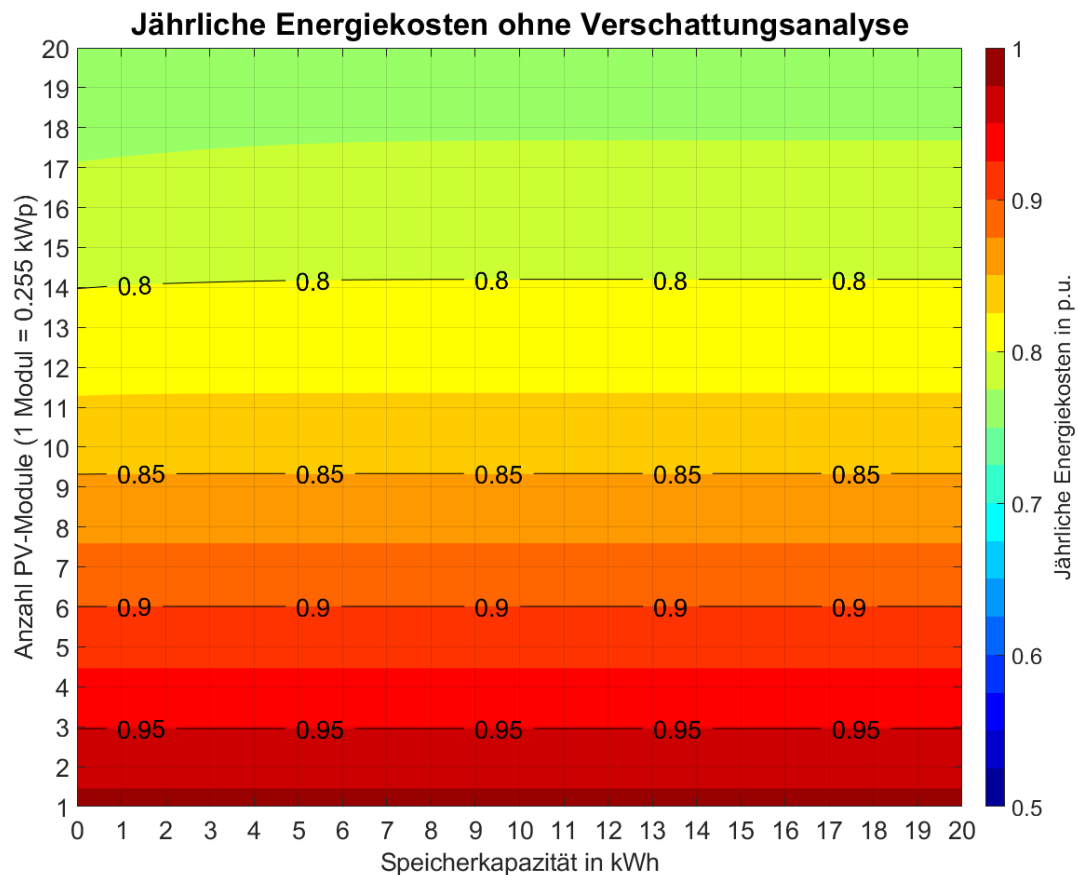


Abbildung 7-20: Jährliche Energiekosten ohne Verschattungsanalyse, Szenario 2

Das ist daran zu erkennen, dass die schwarzen Konturlinien in Abbildung 7-20 nahezu gerade verlaufen. Erst bei Anlagen ab 3,57 kWp ist ein Einfluss des elektrischen Energiespeichers sichtbar, allerdings ist dieser sehr gering. Im Vergleich zu Szenario 1 sinkt auch die maximale Speicherkapazität, die einen Einfluss auf die Energiekosten hat von 5 kWh auf 1 kWh. Zudem ist zu erkennen, dass die Energiekosten im Vergleich zu Szenario 1 nicht so stark reduziert werden können.

Durch die Verschattung ergeben sich bezogen auf das Ausgangsszenario nach Abbildung 7-21 höhere jährliche Energiekosten:

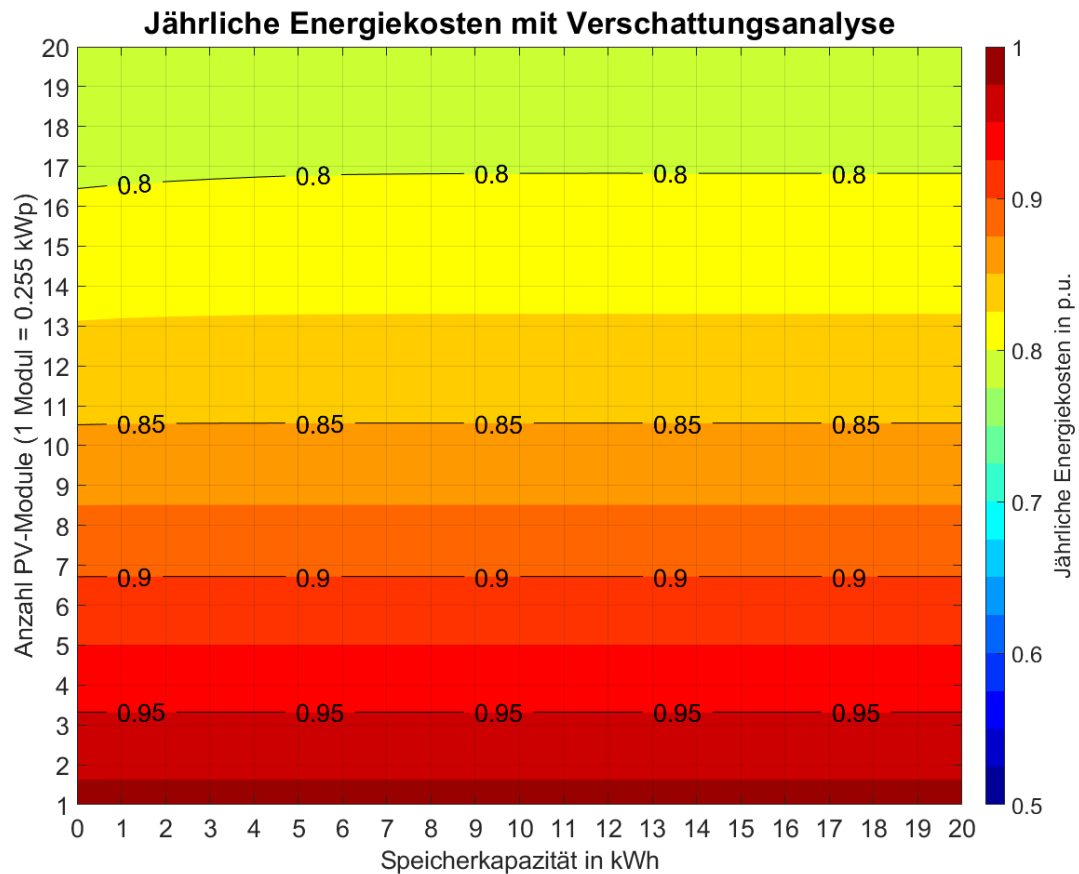


Abbildung 7-21: Jährliche Energiekosten mit Verschattungsanalyse, Szenario 2

Wie in Szenario 1 sind die Energiekosten höher, da der Ertrag der PV-Anlage geringer ist. Auf die optimale Speicherkapazität hat die Verschattung wie in Szenario 1 ebenso keinen Einfluss.

7.3 Zusammenfassung

Zur Veranschaulichung zeigen die nachfolgenden Tabellen einige Vergleichspunkte aus Szenario 1 und 2.

Tabelle 4: Vergleich Eigenverbrauchsgrad

Größe der PV-Anlage in kWp	Speicherkapazität in kWh	Eigenverbrauchsgrad für Szenario 1 in %	Eigenverbrauchsgrad für Szenario 2 in %
0	0	0	0
1,275	0	51	51
1,275	2	51,42	51,42
2,55	2	51,01	50,94
3,825	3	50,09	49,76
5,1	5	48,73	48,34
5,1	10	49,13	49,07

Tabelle 5: Vergleich Autonomiegrad

Größe der PV-Anlage in kWp	Speicherkapazität in kWh	Autonomiegrad für Szenario 1 in %	Autonomiegrad für Szenario 2 in %
0	0	0	0
1,275	0	13,85	13,85
1,275	2	13,96	13,96
2,55	2	27,64	27,53
3,825	3	39,41	38,73
5,1	5	48,99	47,89
5,1	10	49,96	49,71

Tabelle 6: Vergleich der jährlichen Energiekosten

Größe der PV-Anlage in kWp	Speicherkapazität in kWh	Jährliche Energiekosten für Szenario 1 in €	Jährliche Energiekosten für Szenario 2 in €
0	0	3987	2203
1,275	0	3573	2038
1,275	2	3572	2039
2,55	2	3176	1887
3,825	3	2861	1788
5,1	5	2610	1723
5,1	10	2596	1725

Wie in Tabelle 6 deutlich zu erkennen ist, haben die niedrigeren Tarife in Szenario 2 einen deutlichen Einfluss auf die jährlichen Energiekosten.

Um die Auswirkungen verschiedener Preisänderungen deutlicher zu zeigen, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Bei dieser Analyse werden für Szenario 1 mit einer PV-Anlage von 4,59 kWp und einem elektrischen Energiespeicher mit 5 kWh Kapazität, die Auswirkungen von Preisänderungen für unterschiedliche Technologien und Tarife berechnet und die Ergebnisse in Abbildung 7-22 dargestellt.

Die Wertebereiche, für welche die Sensitivitätsanalyse durchgeführt wird, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Berechnungsbereich für die Sensitivitätsanalyse

Technologie	Kostenminimum in €/kWh	Kostenmaximum in €/kWh
Bezugstarif	0,15	0,60
Einspeisetarif	-0,20	0
Wärmepumpe	0,05	0,35
Klimaanlage	0,05	0,35
Photovoltaik	0,01	0,12
Elektrischer Energiespeicher	0,05	0,35

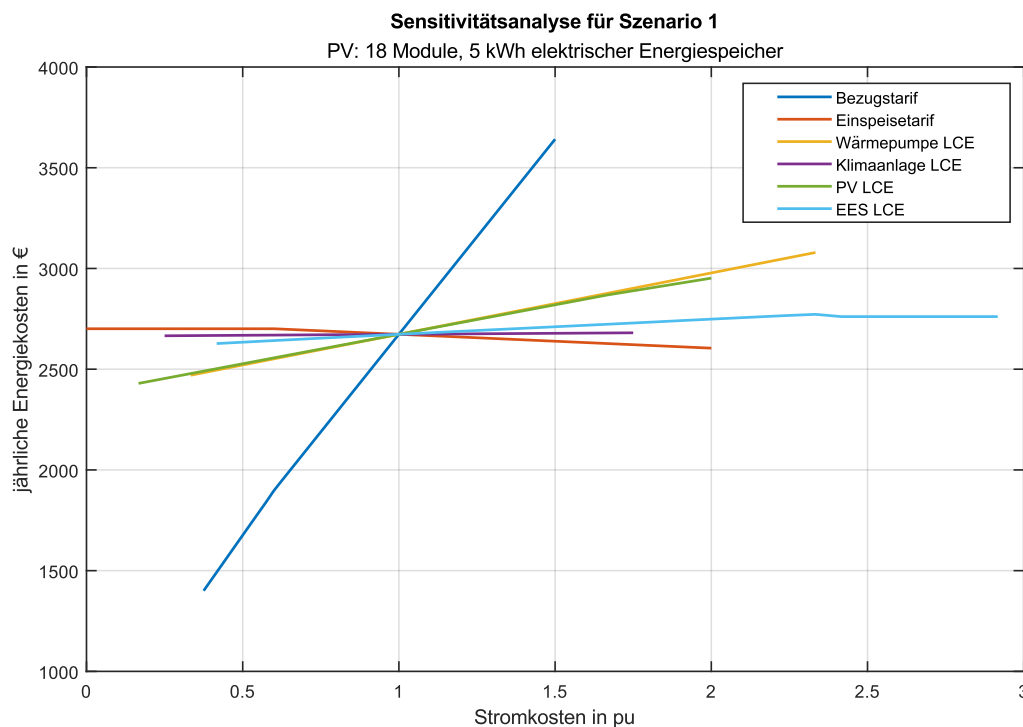


Abbildung 7-22: Sensitivitätsanalyse für Szenario 1

Auf der Abszisse ist die relative Preisänderung zu den Preisen von Szenario 1 aufgetragen. Auf der Ordinate sind die jährlichen Energiepreise in Euro aufgetragen. Das Diagramm zeigt, dass die jährlichen Energiekosten für das gewählte Szenario sehr stark vom Bezugstarif abhängen. Das liegt daran, dass ein Großteil der benötigten elektrischen Energie für diesen Haushalt aus dem öffentlichen Stromnetz bezogen wird.



Zudem ist zu erkennen, wie sich die Stromkosten der einzelnen Technologien auf die jährlichen Energiekosten auswirken. Wärmepumpe und PV-Anlage zeigen hier den größten Einfluss. Elektrische Energiespeicher haben keinen großen Einfluss auf die jährlichen Energiekosten. Das ist auch in den Konturdiagrammen in Szenario 1 zu erkennen.

Wird eine Technologie zu teuer, so wird sie vom Optimierungsalgorithmus nicht mehr eingesetzt. Ein Beispiel hierfür ist in der obigen Sensitivitätsanalyse zu sehen. Ab einem LCE-Wert von 0,29 €/kWh wird der elektrische Energiespeicher vom Optimierungsalgorithmus nicht mehr benutzt. Die überschüssige elektrische Energie wird dann entweder ins Netz eingespeist oder durch das Einschalten zusätzlicher Verbraucher genutzt.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Mit steigenden Energiepreisen steigt die Nachfrage der dezentralen Erzeugung aus erneuerbaren Energiequellen, da mit ihnen die Erzeugungskosten reduziert werden können. Weiters führt die eigenständige Erzeugung zu einem gewissen Grad an Unabhängigkeit von klassischen Energiebereitstellern. Durch die Installation von dezentralen Erzeugungsanlagen, oftmals kombiniert mit Energiespeichern, werden die Konsumenten auch zu Produzenten, sind aber nach wie vor mit dem Energieversorgungsnetz verbunden; man spricht hierbei von Prosumern. Die Installation von dezentralen Erzeugungs- und Speicheranlagen für zB Elektrizität, Wärme oder Kälte bringt auch hohe Investitionskosten, aber auch laufende Kosten mit sich, weshalb die Dimensionierung und der Betrieb solcher Anlagen zu Herausforderungen führt, um für Prosumer das optimale Ergebnis zu erzielen. Die gesetzten Ziele können unterschiedlicher Natur sein: von minimalen jährlichen Energiekosten über maximale Nutzung der selbst erzeugten Energie bis hin zur maximalen Unabhängigkeit vom Energieversorgungsnetz. Erschwerend kommt hinzu, dass man je nach Standort und Art der Anlage oftmals technisch nicht aus dem vollen Portfolio der dezentralen Erzeugungsanlagen schöpfen kann, so muss zB für eine PV- oder Solarthermieanlage eine gewisse Grundfläche zur Verfügung stehen. Zusammenfassend ergibt sich somit eine Optimierungsaufgabe, deren Ziel zB die minimalen Energiekosten mit standortspezifischen Nebenbedingungen sind.

Bereits in der Planungsphase eines Prosumersystems können mit geeigneten Optimierungsalgorithmen Erkenntnisse über die optimale Größe der einzelnen Komponenten erlangt werden. Der optimale Betrieb des Systems kann ebenso durch den optimalen Einsatz der Einzelkomponenten ermittelt werden, um zB das Ziel der maximalen ökonomischen Entlastung zu erreichen. Am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz ist ein Optimierungsprogramm namens ProsOpt für Prosumerhaushalte entwickelt worden. Mittels gemischt ganzzahliger linearer Optimierung kann ProsOpt verschiedene Szenarien berechnen. Der Benutzer des Programms kann dabei die einzelnen Parameter für die jeweiligen Technologien, sowie das Ziel der Optimierung konfigurieren. Allerdings liegt das Programm in seiner ursprünglichen Form nur als MATLAB-Code vor, weshalb Benutzer des Programms eine Lizenz für MATLAB benötigen. In dieser Arbeit wird eine Weboberfläche für ProsOpt erstellt. Die Vorteile einer Weboberfläche liegen darin, dass die Benutzer keine MATLAB Lizenz benötigen. Zusätzlich kann das Programm damit auch auf mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets genutzt werden, die keine Möglichkeit besitzen MATLAB-Code auszuführen.

Die Integration des existierenden MATLAB Programms in die Webapplikation wird mit dem MATLAB Production Server umgesetzt. Dieses Produkt von MathWorks erlaubt es, Drittprogrammen über eine moderne Programmierschnittstelle existierende MATLAB Programme auszuführen und die Ergebnisse der Berechnungen zu erhalten. Damit können Berechnungen mittels MATLAB ohne großen Programmieraufwand in anderen Programmiersprachen verwendet werden. Dadurch kann der existierende Programmcode von ProsOpt mit nur wenigen Änderungen übernommen werden.

Zusätzlich zur Weboberfläche wird eine Verschattungsanalyse für die PV-Anlage in ProsOpt integriert. Verschattung entsteht durch Objekte, die sich in der Nähe von PV-Modulen befinden. Die Schatten dieser Objekte können die direkte Sonneneinstrahlung auf die Module blockieren und so den Ertrag der PV-Anlage deutlich reduzieren. Ein Programm zur Berechnung der Verschattungsverluste ist ebenfalls am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der TU Graz entwickelt worden. Teile dieses Programms werden im Zuge dieser Arbeit in ProsOpt integriert.

Mit der Verschattungsanalyse werden zwei Szenarien mit ProsOpt berechnet und miteinander verglichen. Szenario 1 stellt einen Haushalt dar, der mittels einer Wärmepumpe und einem thermischen Energiespeicher, sowie einer Klimaanlage ausgestattet ist. Mit der Installation einer PV-Anlage sowie einem elektrischen Energiespeicher soll der Prosumerhaushalt erweitert werden. Das Ziel der Optimierung hierbei ist die Minimierung der jährlichen Energiekosten. Zur Berechnung werden aktuelle Energietarife herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei aktuellen Energiepreisen (Stand 25.07.2022) eine Installation einer PV-Anlage mit elektrischem Energiespeicher eine deutliche Senkung der jährlichen Energiekosten erreichen lässt. Die Ergebnisse zeigen auch, dass elektrische Energiespeicher nur bis zu einer gewissen Kapazität eine ökonomische Entlastung bringen. Bei Anlagen bis 5,1 kWp bringen elektrische Energiespeicher, die eine Kapazität von mehr als 5 kWh besitzen keine Senkung der jährlichen Energiekosten mehr mit sich.

Das zweite Szenario stellt den gleichen Haushalt dar, allerdings werden zur Berechnung Energiepreise verwendet, wie sie vor den aktuellen Steigerungen gängig waren. Die Ergebnisse dieses Szenarios machen deutlich, dass die Installation eines elektrischen Energiespeichers nicht immer eine ökonomische Entlastung bringt.

Szenario 2 zeigt auch deutlich, dass kleine Änderungen der Parameter für die Optimierung eine große Rolle spielen können. Das Ergebnis der Optimierung ist sehr stark von den Bedingungen, denen das Szenario unterliegt, abhängig. Jedes System ist daher individuell zu betrachten und zu berechnen.

ProsOpt bietet sehr viele Möglichkeiten zur Erweiterung. Die neu hinzugefügte Verschattungsanalyse kann um weitere Objekttypen erweitert werden, um die Einflüsse von zB Bäumen auf den Ertrag von PV-Anlagen zu ermitteln. Die Verschattungsanalyse kann auch für die Solarthermie berücksichtigt werden, da auch diese durch Verschattung beeinflusst werden kann. Eine weitere Funktion, die ProsOpt verbessern würde, wäre die Integration einer Möglichkeit zur automatischen Positionierung von PV-Modulen auf dem Gebäude, um die optimale Neigung und Ausrichtung der Module zu ermitteln.

9 Literatur

- [1] M. A. Lagler, Dissertation: Influence of Optimising Prosumers, IEAN, TU Graz, Österreich, 2021.
- [2] M. Fürnschuß, Masterarbeit: Prognose des elektrischen Energieertrages von Photovoltaikanlagen sowie dessen Integration in Stromversorgungsnetze, IEAN, TU Graz, Österreich, 2018.
- [3] P. Biermayr, C. Dißauer, M. Eberl, M. Enigl, H. Fechner, B. Fürnsinn, M. Jaksch-Fliegenschnee, K. Leonhartsberger, S. Moidl, E. Prem, S. Savic, C. Schmidl, C. Strasser, W. Weiss, M. Wittmann, P. Wonisch und E. Wopienka, Innovative Energietechnologien in Österreich: Marktentwicklung 2021, Österreich: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2021.
- [4] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme: Technologie - Berechnung - Klimaschutz, Hanser, 2021.
- [5] F. Wosnitza und H. G. Hilgers, Energieeffizienz und Energiemanagement, Springer Spektrum, 2012.
- [6] V. Wesselak, T. Schabbach, T. Link und J. Fischer, Regenerative Energietechnik, Springer Vieweg, 2013.
- [7] M. Sterner und I. Stadler, Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration, Springer Vieweg, 2017.
- [8] T. Wieland, E. Schmutzner, D. Buchauer und L. Fickert, Neuartiges Konzept zur Auslegung von Strom- sowie Warmwasserspeichern in Haushalten beim Einsatz fluktuierender Erzeugungsanlagen, IFEA, TU Graz, Österreich, 2014.
- [9] W. M. Willems, P. Häupl, G. Höfker, M. Homann, C. Kölzow, A. Maas, C. Nocke und O. Riese, Lehrbuch der Bauphysik: Schall – Wärme – Feuchte – Licht – Brand – Klima, Springer Vieweg, 2017.
- [10] Ö. B. 8110-6-1:2019-01-15, Thermal insulation in building construction: Principles and verification methods – Heating demand and cooling demand, 2019.
- [11] C. Grimme und J. Bossek, Einführung in die Optimierung – Konzepte, Methoden und Anwendungen, 2018: Springer Vieweg.
- [12] „Global Solar Atlas,“ [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>. [Zugriff am 13 08 2022].
- [13] N. Pflugradt, „LoadProfileGenerator,“ [Online]. Available: <https://www.loadprofilegenerator.de/>. [Zugriff am 03 08 2022].



- [14] E-Control, „Tarifkalkulator,“ [Online]. Available: <https://www.e-control.at/konsumenten/service-und-beratung/toolbox/tarifkalkulator#/>. [Zugriff am 03 08 2022].



10Anhang

10.1 ProsOpt-Konfiguration

Parameter Id	Wert
1	2
2	9
3	15
4	36
5	72
6	1
7	1
8	1
9	15.4395040000000
10	47.0707140000000
11	0.200000000000000
12	'Y'
13	'N'
14	'N'
15	'Y'
16	'N'
17	'N'
18	'Y'
19	'N'
20	'N'
21	'Y'
22	'Y'
23	'N'
24	'Y'
25	'N'
26	0
27	30
28	255
29	-0.450000000000000
30	45.7000000000000
31	24
32	0
33	0
34	30
35	255
36	-0.450000000000000
37	45.7000000000000
38	0
39	0
40	0
41	30
42	255
43	-0.450000000000000
44	45.7000000000000
45	0
46	0
47	0.999000000000000
48	[0.903 0.941 0.965 0.97 0.973 0.978 0.98 0.98;0.05 0.1 0.2 0.25 0.3 0.5 0.75 1]
49	2
50	[1,1,1,0,1]
51	[0,1,1,0,0]
52	0
53	[4,10]
54	[30,1]
55	[-100,22,22,-100,-100]



56	[-100,26,26,-100,-100]
57	0
58	[10,8,4,3.500000000000000,3.500000000000000,3.500000000000000]
59	0
60	30
61	[0.100000000000000,0.100000000000000,0.100000000000000,0.100000000000000,0.100000000000000,0.800000000000000,0.800000000000000]
62	[0.130000000000000,0.500000000000000,0.500000000000000,0.500000000000000,0.640000000000000]
63	0.040000000000000
64	[0.900000000000000,0.900000000000000,0.900000000000000]
65	[0.500000000000000,0.300000000000000,0.250000000000000]
66	10
67	0.700000000000000
68	0.420000000000000
69	0.070000000000000
70	0.800000000000000
71	45
72	2.400000000000000
73	2800000
74	[0 0 1 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 1 0 0 0;1 0 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 0 0.875 0 0 0.12 0.05;0 0 0.95 0 0 0 0.05;0 1 0 0 0 0;1 0 0 0 0 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 0 0.875 0 0 0.125 0;0 1 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 0 0 0;0 1 0 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0.95 0 0 0 0.05;0 0 1 0 0 0;0 0 1 0 0 0;0 0 0 0 1 0 0;1 0 0 0 0 0]
75	18
76	18
77	1
78	1.100000000000000
79	Variiert von 0-20
80	1
81	1.875000000000000
82	2.250000000000000
83	0.900000000000000
84	5
85	0
86	0
87	0.800000000000000
88	4.900000000000000
89	2.250000000000000
90	1
91	0
92	20
93	20
94	55
95	10
96	95
97	1000
98	4.184000000000000
99	0
100	30
101	3
102	0.860000000000000
103	6.100000000000000
104	0.025000000000000
105	2.360000000000000
106	2.700000000000000
107	0.970000000000000
108	0.890000000000000
109	1
110	3
111	2
112	2.300000000000000
113	2800000



114	1.5000000000000000
115	11.320000000000000
116	0.9300000000000000
117	10.100000000000000
118	13
119	0.9800000000000000
120	720
121	30
122	95
123	65
124	0.1465000000000000
125	300
126	0.2500000000000000
127	0.3700000000000000
128	2
129	2
130	0.9900000000000000
131	0.9900000000000000
132	20
133	65
134	0
135	20
136	55
137	0
138	200
139	0.2500000000000000
140	0.3700000000000000
141	-10
142	20
143	0
144	0
145	0.5000000000000000
146	0.5000000000000000
147	20
148	120
149	'N'
150	1
151	0.4000000000000000
152	-0.0700000000000000
153	-0.1200000000000000
154	0.0200000000000000
155	0.0200000000000000
156	0.1200000000000000
157	0.1500000000000000
158	0.1300000000000000
159	0.2500000000000000
160	0.0500000000000000
161	0.0500000000000000
162	0.0500000000000000
163	0.2000000000000000
164	0.0500000000000000
165	'N'
166	'N'
167	'Y'
168	'N'
169	0
170	1.6250000000000000
171	1.0190000000000000
172	0.0460000000000000
173	0.0100000000000000
174	0.0200000000000000
175	2
176	0.2500000000000000
177	8.890000000000000
178	37.800000000000000



179	Variiert von 0.255-5,1 in 0.255 Schritten
180	1.625000000000000
181	1.019000000000000
182	0.010000000000000
183	0.020000000000000
184	0.250000000000000
185	0.200000000000000
186	900
187	0.020000000000000
188	25
189	0.028000000000000
190	'N'