

Bernburg  
Dessau  
Köthen



**Hochschule Anhalt**  
Anhalt University of Applied Sciences

**emw**

Fachbereich  
Elektrotechnik, Maschinenbau  
und Wirtschaftsingenieurwesen

## Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
Master of Engineering (M. Eng.)

Willy Müller

---

**Vorname Name**

Elektro- und Informationstechnik, 2020, [REDACTED]

---

**Studiengang, Matrikel, Matrikelnummer**

Thema:

**Analyse von Methoden zur Wärmeerzeugung in  
Einfamilienhäusern mit Strom aus Photovoltaik**

Prof. Dr. Stefan Twieg

---

**1. Prüfer / 1. Prüferin**

Prof. Dr. Michael Brutscheck

---

**2. Prüfer / 2. Prüferin**

27.04.2023

---

**Datum der Abgabe**



# Selbstständigkeitserklärung

---

Willy Müller, Matrikel Nr. 

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit mit dem Titel:  
**Analyse von Methoden zur Wärmeerzeugung in Einfamilienhäusern mit Strom aus Photovoltaik**  
selbstständig verfasst, in gleicher oder ähnlicher Fassung noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt wurde und keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel und Quellen, einschließlich der angegebenen und beschriebenen Software, verwendet wurden.

Köthen, 27.04.2023  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

## Sperrvermerk

Sperrvermerk Ja  Nein

Köthen, 27.04.2023  
Ort, Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift des/der betrieblichen Betreuers/-in

---

## Kurzfassung

---

Diese Arbeit dient als Leitfaden zur Auswahl von Maßnahmen bei der Installation von Photovoltaikanlagen, Nachhaltungen, Heizungsunterstützungen und Gebäudeautomatationen. Für alle Betrachtungen wird ein nicht real existierendes Modellhaus anhand von üblichen Parametern erstellt. Innerhalb einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die optimale Dimensionierung für Photovoltaikanlage und Nachhaltung gefunden und anhand ihrer Amortisationszeit bewertet. Für bestimmte Anwendungsfälle werden die besten Maßnahmen und eventuelle Kombinationen genannt.

Für ein Energiemanagementsystem werden vorgefertigte und eigenerstellte Systeme beleuchtet und verglichen. Auch hier werden die gezeigten Maßnahmen den zu ihnen passenden Anwendungsfällen zugeordnet.

Abschließend werden für das betrachtete Modellhaus verschiedene Photovoltaikanlagen, Nachhaltungen und Heizungsunterstützungen ausgelegt und mit Hilfe von Simulationen verglichen.

Diese Arbeit trägt relevante Informationen rund um Photovoltaik, Nachhaltung, Heizungsunterstützung und Gebäudeautomation zusammen. Sie soll auch Fachfremden einen Einstieg in die Thematik gewähren und ihnen näher bringen, sodass sie zum Bau einer privaten Photovoltaikanlage bewegt werden können um den Energiewandel voranzutreiben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>iii</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>v</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>vi</b>
<b>1 Motivation und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung in die Thematik . . . . .	2
1.1.1 Beschreibung des Modellhauses . . . . .	2
1.1.2 Aufschlüsselung des Ölverbrauchs über ein Jahr . . . . .	3
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Stand von Wissenschaft und Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Gebäudeautomationssysteme . . . . .	5
2.1.1 HomeMatic . . . . .	5
2.1.2 Bosch Smart Home . . . . .	6
2.1.3 Loxone . . . . .	6
2.2 offene Hardware . . . . .	6
2.2.1 Raspberry Pi . . . . .	6
2.2.2 Arduino . . . . .	7
2.2.3 ESP . . . . .	8
2.3 Freie oder Open Source Softwaresysteme und Übertragungsprotokolle für Gebäudeautomation . . . . .	9
2.3.1 MQTT-Protokoll . . . . .	9
2.3.2 Zigbee . . . . .	10
2.3.3 Node-Red . . . . .	11
2.3.4 IOBroker . . . . .	12
2.4 Photovoltaik . . . . .	13
2.5 Wärmepumpen . . . . .	14
<b>3 Photovoltaikanlage: Bestandteile, Montage, optimale Ausrichtung und   Dimensionierung</b>	<b>15</b>
3.1 Photovoltaikmodule . . . . .	15
3.1.1 Montagearten einer Photovoltaikanlage . . . . .	15
3.1.2 Optimale Ausrichtung . . . . .	21
3.1.3 Dimensionierung . . . . .	23
3.2 Nachhaltigkeit . . . . .	31
3.2.1 Montagearten . . . . .	32
3.2.2 Dimensionierung . . . . .	34
3.2.3 Anbindung an Gebäudeautomation . . . . .	38

3.3	Wechselrichter . . . . .	38
3.3.1	Bauart . . . . .	39
3.3.2	Kompatibilität zu Herstellerfremden Speichern . . . . .	40
3.3.3	Dimensionierung . . . . .	40
3.3.4	Anbindung an die Gebäudeautomation . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Einbringung der Photovoltaikenergie in den Heizkreislauf</b>	<b>45</b>
4.1	Heizpatrone . . . . .	45
4.1.1	Wirtschaftlichkeit . . . . .	46
4.1.2	Steuerung über eine Automation . . . . .	47
4.2	Brauchwasserwärmepumpe . . . . .	49
4.3	Luft/Luft Wärmepumpe . . . . .	50
4.4	Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser Wärmepumpe . . . . .	52
<b>5</b>	<b>Steuerung und Monitoring</b>	<b>55</b>
5.1	Schlüsselfertiges Energiemanagementsystem . . . . .	57
5.2	Do-It-Yourself System . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Simulation für das Modellhaus</b>	<b>59</b>
6.1	Simulationsparameter . . . . .	59
6.2	Durchführung . . . . .	62
6.3	Auswertung . . . . .	70
<b>7</b>	<b>Heizungsbooster</b>	<b>73</b>
7.1	Konzept . . . . .	73
7.2	Umsetzung und Funktionsprüfung . . . . .	75
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Stufenlos steuerbarer Heizstab Schaltplan, vergrößerte Darstellung</b>	<b>a</b>
<b>B</b>	<b>Konzept des Heizungsbooster, Schaltplan, vergrößerte Darstellung</b>	<b>c</b>
<b>C</b>	<b>Simulationsergebnisse, größere Darstellung</b>	<b>e</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>q</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>s</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>u</b>

---

## Kapitel 1: Motivation und Zielsetzung

---

Durch den fortschreitenden Klimawandel sieht sich unsere Gesellschaft immer stärker dazu gezwungen auf Energie aus fossilen Brennstoffen zu verzichten um den daraus resultierenden Ausstoß von Treibhausgasen einzudämmen. Die Bundesregierung hat zu diesem Zweck das Erneuerbare-Energien-Gesetz kurz EEG erlassen. Dieses Gesetz unterstützt den Ausbau erneuerbarer Energien durch Vergütungen und sanktioniert die Verwendung fossiler Brennstoffe durch Abgaben. Durch den unaufhaltsam steigenden weltweiten Energiebedarf und die im EEG festgelegten Abgaben steigen die Preise für Strom, Heizöl und Erdgas immer weiter an. Um unabhängiger von globalen Energiepreisen zu werden, entschließen sich daher immer mehr private Hausbesitzer für die Installation einer Photovoltaikanlage. Doch die Installation einer solchen Anlage ist oft mit hohen Investitionskosten verbunden und ein möglicher Nutzen kann im Vorfeld nur abgeschätzt werden. Deshalb scheuen noch immer viele vor dieser Investition zurück. Welche Maßnahmen und entsprechende Dimensionierungen einen positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage haben, ist oft nur schwer einzuschätzen und bedarf einer aufwendigen Recherche.

Um die so erzeugte Energie auch im Bereich der Wärmegewinnung einsetzen zu können, wird in der Regel zur Installation einer Wärmepumpe geraten. Diese sind mit hohen Anschaffungskosten und weiteren zum Teil weitreichenden Veränderungen an der bestehenden Heizungsanlage verbunden. Andere, weniger tiefgreifende Methoden um eine vorhandene Heizung mit selbst erzeugtem Strom zu unterstützen, stammen meist aus dem Do-It-Yourself Bereich und sind für Laien daher schwer umzusetzen.

Des Weiteren sollten Photovoltaikanlage, Nachhaltigkeit und Heizungsunterstützung mit einer Gebäudeautomation kombiniert werden, um die Energieflüsse im Haus zu steuern, aufzuzeichnen und zu präsentieren. Durch die Verknüpfung von Erzeugern und Verbrauchern wird erst das volle Potential einer Photovoltaikanlage erreicht. Zu diesem Zweck werden eine Vielzahl dieser Energiemanagementsysteme angeboten, meistens von Herstellern anderer Komponenten der Photovoltaikanlage. Auch hier ist es sehr aufwendig sich einen Überblick über die unterschiedlichen Systeme, ihre Vor- und Nachteile sowie mögliche Kombinationen untereinander zu verschaffen. Auch dafür sind umfassende Recherche und Vorkenntnisse im Bereich der Gebäudeautomation notwendig um die Systeme sachgerecht zu bewerten.

Darüber hinaus können mit offener Hard- und Software eigene Automationen geschaffen und betrieben werden. Diese bieten viele Vorteile gegenüber schon vorhandenen Systemen, müssen jedoch von Grund auf selbst erstellt werden. Das Wissen um schon vorhandene Werkzeuge und deren Verwendung muss ebenfalls erst mühsam zusammengetragen und erlernt werden.

### 1.1 Einleitung in die Thematik

#### 1.1.1 Beschreibung des Modellhauses

Für diese Arbeit steht kein reales Haus zur Verfügung. Deshalb wird ein Modell als Grundlage aller Betrachtungen eingesetzt. Das Modell beschreibt ein Einfamilienhaus mit  $160\text{m}^2$  Wohnfläche auf zwei Vollgeschossen, welches von einer vierköpfigen Familie bewohnt wird. Die Geometrie, Dachneigung sowie deren Ausrichtung wurde, an üblichen Werten angelehnt, frei gewählt. Das Modellhaus besitzt ein Satteldach mit einer Neigung von  $40^\circ$  und einer Ausrichtung nach Süd-West / Nord-Ost. In einer Erhebung aus dem Jahr 2010 wurde der durchschnittliche Heizwärme- und Strombedarf ermittelt (FR12). Der Strombedarf für Einfamilienhäuser mit einer Wohnfläche von  $160\text{m}^2$  lag demnach durchschnittlich bei  $4.500\text{ kWh}$ , der Heizwärmebedarf bei durchschnittlich  $22.000\text{ kWh}$ . Für die bessere Lesbarkeit wurden beide Werte gerundet.

Die Annahmen für Heizwärme- und Strombedarf wurden auf der Grundlage von Durchschnittswerten getroffen. Tatsächliche Verbrauchsdaten sind erheblich von Witterung, Nutzung und Gebäudetyp abhängig und können somit stark abweichen.

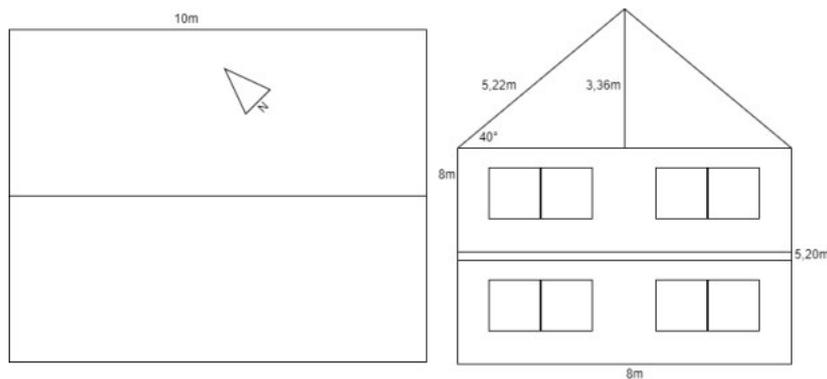


Abbildung 1.1: Grundriss des zu Grunde liegenden Modellhauses

Tabelle 1.1: Angenommene Kenngrößen des Modellhauses

Kenngröße	Wert
Abmessungen (L x B x H)	10m x 8m x 8,56m
Dachneigung	$40^\circ$
Dachfläche	$104,4\text{ m}^2$
Ausrichtung	Süd-West / Nord-Ost
Heizwärmebedarf	$22.000\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}$
Strombedarf	$4.500\frac{\text{kWh}}{\text{Jahr}}$

### 1.1.2 Aufschlüsselung des Ölverbrauchs über ein Jahr

Der Heizwärmebedarf ist sehr stark von der Jahreszeit sowie der Witterung abhängig, weshalb er innerhalb des Jahres stark schwankt. Um einen späteren Vergleich zwischen Heizbedarf und der Energieerzeugung einer Photovoltaikanlage zu ermöglichen, ist es sinnvoll, den Energiebedarf monatlich darzustellen. Dazu muss erneut auf Durchschnittswerte zurückgegriffen werden(Staa):

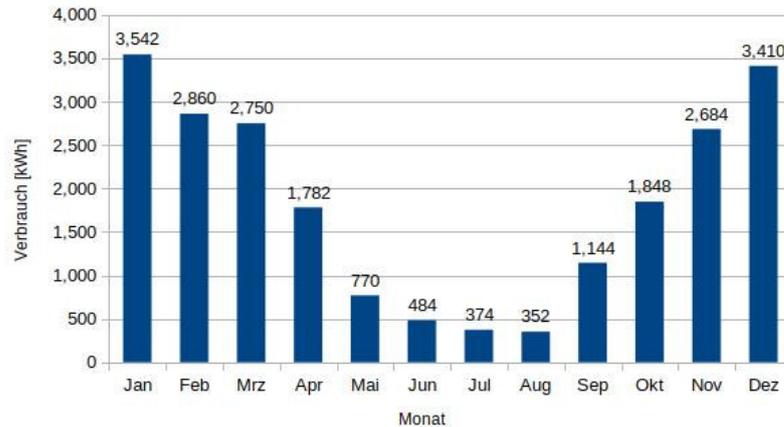


Abbildung 1.2: Monatlicher Heizwärmebedarf

In einem Bericht des Statistischen Bundesamtes wird der Energieverbrauch von Haushalten in fünf Kategorien unterteilt(Stad, p. 10). Eine dieser Kategorien ist der Strombedarf. Dieser wird in sonstige Prozesswärme, Betrieb von Elektrogeräten und Beleuchtung aufgeteilt, wobei die Beleuchtung nur zehn Prozent ausmacht. Daher kann der Strombedarf über ein Jahr als konstant angenommen werden. Das deckt sich mit dem in Hager und Valentin-Software erstellten Planungstool angegebenen jährlichen Stromverbrauch(hag).

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

In dieser Arbeit werden Möglichkeiten betrachtet, die den Energiebedarf von privaten Haushalten teilweise aus selbsterzeugten erneuerbaren Energien decken. Möglichkeiten zur generellen Verringerung des Energiebedarfs werden nicht betrachtet. Zur Erzeugung dieser erneuerbaren Energien wird eine Photovoltaikanlage installiert und betrieben. Dazu wird ein Leitfaden erstellt, welcher verschiedene Maßnahmen hierzu aufgreift und diese anhand von wirtschaftlichen Aspekten vergleicht und geeigneten Anwendungsfällen zuordnet. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden die Amortisationszeiträume der gezeigten Maßnahmen verglichen und anhand derer bewertet. Diese Maßnahmen umfassen die Installation der Photovoltaikanlage, eine mögliche Nachhaltung der Energie und eine sinnvolle Unterstützung der vorhandenen Heizungsanlage mit elektrischer Energie. Für diese Kombination werden Lösungen aus dem *Smart-Home* Bereich vorgestellt und ebenfalls anhand wirtschaftlicher Gesichtspunkte verglichen.

Bei allen Maßnahmen werden auch Lösungen aus dem Do-It-Yourself, kurz DIY, Bereich

betrachtet und mit konventionellen Methoden verglichen. Von diesen DIY-Lösungen werden sich niedrigere Investitionskosten und bessere Kompatibilität zu fremden Systemen erhofft. Jedoch sind Vorkenntnisse im Bereich der Elektro- und Automatisierungstechnik nötig um diese Lösungen erfolgreich einsetzen zu können. Für Photovoltaik, Nachhaltigkeit und Einbringung der Energie in den Heizwärmebedarf werden die gezeigten Maßnahmen zusätzlich in ihrer Selbstdurchführbarkeit bewertet.

Als Grundlage kann kein real existierendes Haus verwendet werden. Daher wurde im Zuge dieser Arbeit ein Modellhaus mit typischen Parametern für Einfamilienhäuser erstellt und für die Betrachtungen verwendet. Zum Abschluss der Arbeit sollen die effizientesten und wirtschaftlichsten Methoden passend für dieses Modellhaus ausgewählt und theoretisch umgesetzt werden. In verschiedenen Ausbaustufen werden Photovoltaik, Nachhaltigkeit und Heizungsunterstützung miteinander kombiniert und deren Einfluss auf die Energieflüsse des Modellhauses in einer Simulation überprüft.

## Kapitel 2: Stand von Wissenschaft und Technik

---

### 2.1 Gebäudeautomationssysteme

Eine Gebäudeautomation setzt sich aus einem Monitoring der wichtigsten Parameter, wie zum Beispiel Energieflüssen und der Steuerung der wichtigen Komponenten innerhalb des Gebäudes zusammen. Einige Hersteller bieten eigene Produkte und Produktreihen zur Realisierung einer Automation an. Diese Unternehmen kann man grob in *industrielle Gebäudeautomation* und *private Gebäudeautomation* bzw. *Smart-Home* unterteilen. Die industrielle Gebäudeautomation richtet sich an Großkunden und bietet Lösungen für große gewerbliche oder öffentliche Gebäude an. Da sich diese Masterarbeit mit Privathaushalten auseinandersetzt, werden industrielle Produktreihen nicht betrachtet.

Smart-Home Produkte richten sich primär an private Kunden. Sie bieten dem Kunden vorkonfigurierte und sehr einfach zu installierende Lösungen an, welche auch ohne Fachkompetenz in Betrieb genommen werden können. Dadurch ist es jedem Nutzer im Prinzip möglich eine Automation mit einfachen Funktionen zu installieren ohne dafür zwingend einen Fachmann zu Rate ziehen zu müssen. Im Gegenzug sind die Produkte meist nur innerhalb der eigenen Produktreihen standardisiert und kompatibel und in Individualität und Funktionsumfang eingeschränkt.

#### 2.1.1 HomeMatic

HomeMatic ist eine Produktreihe des Unternehmens eQ-3 welches 2005 als Schwesterunternehmen der ELV Elektronik AG gegründet wurde(eQ-). Von 2007 bis heute wurden über 200 HomeMatic Geräte für den Smart-Home Bereich entwickelt. Seitdem führt HomeMatic den Markt für Smart-Home Geräte an und konnte schon viele wichtige Partnerschaften eingehen(eQ-). Dadurch sind HomeMatic Produkte auch teilweise mit Systemen dieser Partner kompatibel.

Ein Homematic System besteht immer aus einer zentralen Steuereinheit, dem CCU, sowie den verbauten Sensoren und Aktoren. Neben kabelgebundenen Lösungen bietet eQ-3 mit HomeMatic IP auch eine funkbasierte Lösung an. Der HomeMatic IP CCU enthält einen eigenen Access-Point mit welchem sich die Sensoren und Aktoren verbinden. Für die Programmierung und den Betrieb muss der CCU jedoch mit dem Internet verbunden sein um auf die HomeMatic-Cloud zugreifen zu können. Mit Hilfe von Gateways können auch kabelgebundene Geräte in ein funkbasiertes System integriert werden und umge-

kehrt.

HomeMatic kann zudem auch als Energiemanagementsystem eingesetzt werden indem die relevanten Komponenten wie Wechselrichter oder Energiespeicher mit der CCU verbunden werden.

### 2.1.2 Bosch Smart Home

Seit 2016 produziert die Bosch Smart Home GmbH, ein Tochterunternehmen der Robert Bosch GmbH, Produkte für den Smart Home Bereich (Robb). Durch Partnerschaften zu anderen Herstellern der Branche wird die eigene Produktpalette erweitert. Außerdem können viele Bosch Haushaltsgeräte direkt in ein Bosch Smart Home integriert werden.

Das Herzstück dieses Systems besteht aus einem Bosch Smart Home Controller. Dieser verbindet sich über eine eigene 868 MHz Funkverbindung mit kompatiblen Endgeräten. Durch Anbindung an ein vorhandenes LAN-Netzwerk kann der Nutzer auf gesammelten Daten der Endgeräte zugreifen oder diese steuern.

Durch eine softwareseitige Erweiterung des Controllers kann dieser auch mit Wechselrichtern, Wärmepumpen, Energiespeichern oder Wallboxen verbunden werden. Dadurch kann auch ein Energiemanagementsystem aufgebaut werden.

### 2.1.3 Loxone

Die Loxone Electronic GmbH ist ein 2009 gegründetes österreichisches Unternehmen, welches sich auf Gesamtsysteme in der Gebäudeautomation spezialisiert hat (Lox). Ihre Systeme vereinen Smart Home Anwendung und Energiemanagementsystem. Führende Hersteller von Produkten beider Bereiche sind mit Loxone Systemen kompatibel.

Genau wie bei den vorher vorgestellten Systemen besteht auch diese Automatisierung aus einer Zentralen Steuereinheit, dem Miniserver, und den verbundenen Endgeräten. Dieser wird kabelgebunden mit den Sensoren und Aktoren verbunden. Um auch funkbasierte Endgeräte verwenden zu können, muss der Miniserver mit einer Loxone Air Extension erweitert werden.

## 2.2 offene Hardware

### 2.2.1 Raspberry Pi

Die Raspberry Pi Foundation ist eine Wohltätigkeitsorganisation aus Großbritannien mit dem Ziel kostengünstige Elektronik herzustellen, die vor allem jungen Menschen zur Verfügung gestellt werden soll, um ihre Fähigkeiten im Bereich der Elektronik und Programmierung zu fördern (Ras). Bis heute wurden vier Generationen der Einplatinencomputer entwickelt, hergestellt und verkauft. Beim Raspberry Pi handelt es sich um einen Einplatinencomputer auf welchem ein Betriebssystem installiert werden kann. Anschließend können auf dem Raspberry Pi, wie auch auf einem handelsüblichen PC,

viele Programme parallel ausgeführt werden. Zusätzlich ist er mit den wichtigsten Hardwareschnittstellen ausgestattet, wodurch sehr viele unterschiedliche Projekte umgesetzt werden können. Dadurch ist der Raspberry Pi eine perfekte Steuer- und Monitoringbasis der Gebäudeautomation.

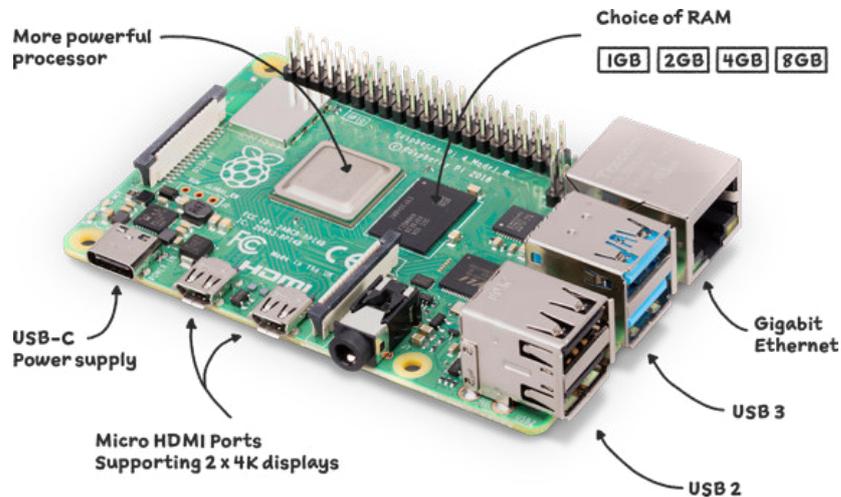


Abbildung 2.1: Raspberry Pi 4 Model B Quelle: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b>

In Abbildung 2.1 ist das neueste und leistungsstärkste Modell dargestellt. Auf der Größe einer Kreditkarte bringt dieses Modell alle Schnittstellen für eine Gebäudeautomation mit. Neben dem in der Abbildung dargestellten Modell besitzt der Raspberry eine drahtlose 2.4 und 5 GHz Schnittstelle sowie Ein- und Ausgabepins für digitale und analoge Signale. Über diese Pins können zum Beispiel Sensoren direkt angeschlossen und ausgelesen oder elektronische Aktoren mit begrenzter Leistung gesteuert werden. Die im Raspberry Pi 4 Modell B verbaute Hardware ist mehr als ausreichend um auch aufwendige Steuerungsaufgaben sowie Visualisierungen in der Gebäudeautomation auszuführen. Dabei ist der Energiebedarf im Leerlauf mit 2,2W deutlich geringer als bei handelsüblichen PCs, weshalb sie ohne Probleme dauerhaft betrieben werden können (BS16). Daher ist er sehr gut als zentrale Steuerungseinheit der Gebäudeautomation geeignet.

Um den Raspberry Pi nutzen zu können, bietet die Raspberry Pi Foundation ein eigenes, auf Unix basierendes, Betriebssystem an. Damit kann der Raspberry Pi einfach eingerichtet werden und ist schnell und einfach einsetzbar. Anschließend kann die Installation je nach Anwendungsfall frei konfiguriert und mit weiterer Software ausgestattet werden. Neben dem offiziellen Betriebssystem können auch andere, von der Community entwickelten, Betriebssysteme eingesetzt werden, um die Hardware noch besser an den jeweiligen Anwendungsfall anzupassen.

### 2.2.2 Arduino

Arduino ist ein in Italien ansässiges Unternehmen welches elektronische Bauteile entwickelt, herstellt und verkauft, um eine nützliche Lernplattform für Schüler und Studenten bereitzustellen und somit ein Verständnis für Elektrotechnik, Steuerungstechnik und Programmierung zu vermitteln. Neben Controller-Boards bietet das Unternehmen auch Sensor- und Aktortechnik sowie eine eigene Softwarumgebung zur Einrich-

tung, Konfiguration und Programmierung der Controller an(Ardb). Dadurch ist die Verwendung der Arduino Produkte sehr einfach und ohne große Vorkenntnisse möglich. Mit Erweiterungen, so genannten Shields, kann der Funktionsumfang erweitert und auf den Anwendungsfall spezialisiert werden. Alle von Arduino bereitgestellten Hard- und Softwareprodukte sind open source. Bei den Arduino Boards handelt es sich im Gegensatz zum Raspberry Pi nicht um Einplattinencomputer sondern um Mikrocontroller. Daher wird kein Betriebssystem benötigt um ein Programm auszuführen. Jedoch ist es nicht möglich mehrere Programme parallel auszuführen. Vielmehr wird das gespeicherte Programm in einer Endlosschleife immer wieder ausgeführt.

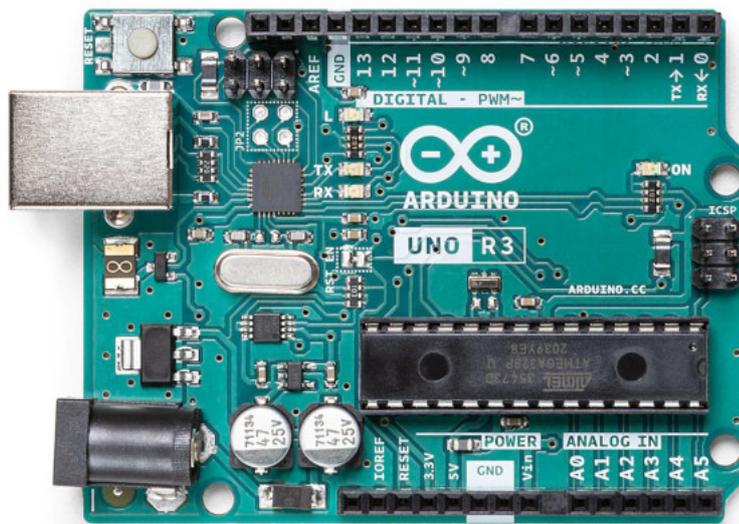


Abbildung 2.2: Arduino Uno Rev3 Quelle: <https://store.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-uno-rev3>

Das neueste Controller-Board von Arduino ist das Arduino Uno Rev3 welcher in Abbildung 2.2 abgebildet ist. Er ist mit 14 digitalen Ein- und Ausgängen ausgestattet, bei sechs davon kann der Ausgang mittels Pulsweitenmodulation, kurz PWM, moduliert werden. Zusätzlich besitzt der Arduino Uno sechs analoge Eingänge und einen USB-B Anschluss für eine Verbindung zu einem Computer(Arda). Um den Arduino drahtlos über Wifi verbinden zu können muss er mit einem Shield ausgestattet werden. Die Produkte von Arduino sind sehr gut für kleine kompakte Systeme geeignet, in denen Sensoren und Aktoren direkt an den Controller angeschlossen und gesteuert werden. Komplexere Anwendungen wie Datenbanken oder Webserver sind nicht möglich. Daher ist der Arduino weniger als zentrale Steuer- und Monitoring Einheit geeignet.

### 2.2.3 ESP

Bei einem ESP handelt es sich um Produkte des 2008 in China gegründeten und mittlerweile weltweit agierenden Unternehmens Espressif. Espressif entwickelt und produziert kompakte und leistungsarme Wifi fähige Chips. Alle von Espressif entwickelten Produkte sind open Source (Esp). Daher erfreuen sich die Produkte einer hohen Beliebtheit in der DIY Community was eine Vielzahl von Werkzeugen, Zusatzbibliotheken

und Hilfestellungen zur Folge hat. Zusätzlich zur Hardware bietet Espressif ein breites Spektrum an Softwarelösungen zur Programmierung ihrer Mikrochips an - ebenso open Source. Daher kommen ESP's in vielen Bereichen des Artificial intelligence of things kurz AIoT, wie z.B. steuerbaren Glühbirnen, intelligenten Lautsprechern, einer Vielzahl von Unterhaltungselektronik oder auch Bezahlssystemen zum Einsatz(Esp). Neben den Mikrochips werden auch anschlussfertige Module für viele Anwendungsgebiete angeboten.

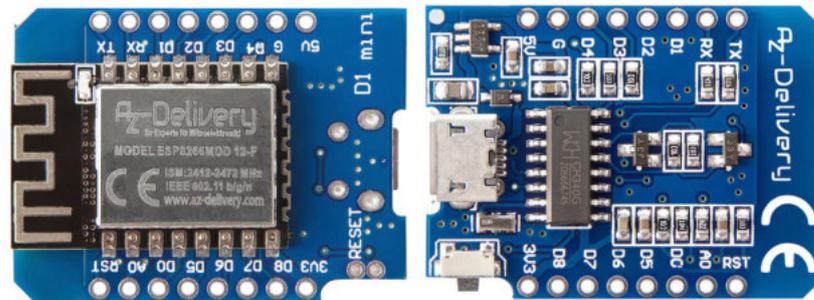


Abbildung 2.3: ESP D1 Mini Board mit ESP8266, Vor- und Rückseite Quelle: <https://www.az-delivery.de/products/d1-mini>

Diese vorgefertigten Module erleichtern den Umgang mit dem ESP. Auf ihnen sind alle für den Betrieb und die Programmierung des Chips benötigten elektronischen Bauteile bereits verbaut und der Chip sofort einsatzbereit. Es muss lediglich der gewünschte Sensoren / Aktoren an den Pins angeschlossen und der Mikrocontroller des Chips mit wenigen Handgriffen programmiert werden.

Das ESP-Board kann sowohl über den integrierten Mikro-USB Anschluss oder über eine direkte Verbindung an den Pins, zum Beispiel über eine Batterie versorgt werden. Mit vier 2.500 mAh Alkaline Batterien kann ein ESP8622, welcher in Abbildung 2.3 dargestellt ist, mit der richtigen Programmierung und Konfiguration bis zu sechs Monate betrieben werden(AYK<sup>+</sup> 19).

Zur Programmierung des Mikrocontrollers auf dem Chip kann entweder die von Espressif selbst zu Verfügung gestellte Entwicklungsumgebung zum Einsatz kommen, oder eines der vielen in der Community entwickelten Programme. Hier werden auch schon fertige Konfigurationsdateien für oft aufkommende Anwendungsfälle bereitgestellt, wodurch dem Anwender die Aufgabe der Programmierung ebenso abgenommen wird.

## 2.3 Freie oder Open Source Softwaresysteme und Übertragungsprotokolle für Gebäudeautomation

### 2.3.1 MQTT-Protokoll

Beim Message Queuing Telemetry Transport Protokoll, kurz MQTT, handelt es sich um ein 1999 von Andy Stanford-Clark und Arlen Nipper entwickeltes Maschine-to-Maschine

Übertragungsprotokoll. Es basiert auf TCP-IP und benötigt ein bestehendes Netzwerk zur Datenübertragung. MQTT stellt daher keine plug-and-play Lösung dar, sondern bedarf einer vorherigen Einbindung der Geräte in ein bestehendes Netzwerk. Jedoch ist jedes TCP-IP fähige Gerät in der Lage mit dem MQTT Protokoll Daten zu übertragen.

MQTT liegt eine Many-to-Many Kommunikation zugrunde bei der gleichberechtigte *Clients* über einen *Broker* miteinander kommunizieren. Jeder *Client* kann eine Nachricht mit einem bestimmten *Topic* an den *Broker* senden, welcher diese Nachricht an andere *Clients* weiterleitet. Damit eine Nachricht an einen *Client* weitergeleitet wird muss er sich vorher beim *Broker* mit dem entsprechenden *Topic* anmelden.

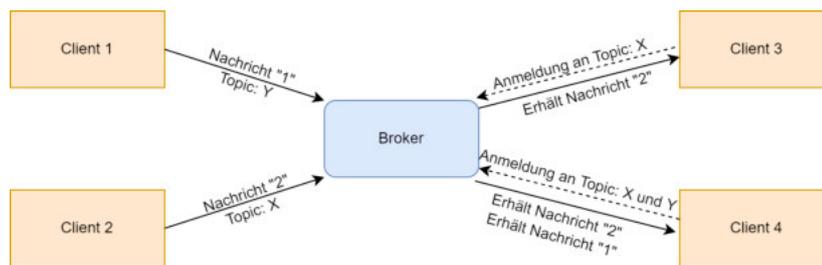


Abbildung 2.4: Skizze zur Funktionsweise des MQTT Protokolls

MQTT wurde von IBM für die Kommunikation über eine Satellitenverbindung entwickelt (YSAAH17). Das Protokoll ist daher so aufgebaut und ausgelegt, dass nur wenig Rechenleistung und ein kleiner Energiebedarf notwendig ist um eine Nachricht zu versenden. Außerdem ist die Datenübertragung auch bei instabilen Verbindungen sicher und korrekt. Heute werden die Standards des MQTT Protokolls von OASIS Open verwaltet und unter ihrer Schirmherrschaft weiterentwickelt(OAS). Seitdem ist das MQTT Protokoll ein offener Standard, die Dokumentation frei einsehbar und die Software frei nutzbar.

Durch alle diese Voraussetzungen ist MQTT das am meisten verwendete Übertragungsprotokoll im Smart-Home Bereich und viele Hersteller nutzen es oder bieten eine entsprechende Schnittstelle bei ihren Produkten an. Außerdem gibt es viele offizielle und inoffizielle Softwarelösungen zur Einrichtung eines MQTT *Brokers* weshalb auch Laien keine Probleme bei der Einrichtung und Verwendung dieser Technik haben.

### 2.3.2 Zigbee

Zigbee bezeichnet einen von der Connectivity Standards Alliance, ehemals Zigbee Alliance, entwickelten Funkstandard zur Energieeffizienten Datenübertragung kleiner Datenmengen über kurze Strecken(RSP11), ähnlich wie Bluetooth oder Wifi. Zigbee wurde speziell für funkbasierte Sensornetze, vor allen Dingen im Smart-Home Bereich entwickelt. Es zeichnet sich durch eine einfache Installation und Anwendung aus.

Bei der Connectivity Standards Alliance handelt es sich um einen Zusammenschluss verschiedener Unternehmen zur Entwicklung und Verwaltung verschiedener Technologiestandards wie Zigbee(Con) welches als offener Standard geführt wird. Bis zum heutigen Tag ist die Zahl der Mitglieder auf über 400 Unternehmen angestiegen. Jedes dieser Unternehmen stellt Produkte für den Internet-of-Things kurz IoT Bereich basierend auf dem Zigbee Standard her. Darüber können die verschiedensten Geräte im Smart-Home

Bereich vernetzt und zusammen betrieben werden.

Zigbee benötigt für den Betrieb kein externes Netzwerk sondern baut ein eigenständiges Netzwerk zwischen den einzelnen Geräten auf. Der Energiebedarf für die Datenübertragung ist so gering, dass Sensoren auch problemlos mit Batterien über Jahre hinweg versorgt werden können(RSP11). Um ein Zigbee Netzwerk aufzubauen ist nicht viel Expertise erforderlich. Ein Netzwerk benötigt immer eine zentrale Steuereinheit, welche die Verbindung zwischen den Endgeräten verwaltet. Die Endgeräte vernetzen sich untereinander und bilden dadurch ein Netz. Über dieses Netz kann sich die Reichweite eines Zigbee Netzwerkes über die maximale Funkreichweite hinaus erstrecken(RSP11). Unter idealen Bedingungen kann eine Reichweite von bis zu 150m erreicht werden, unter reellen Bedingungen liegt diese jedoch deutlich geringer bei 10-70m, abhängig von der Umgebung und dem Energieverbrauch (HX12).

### 2.3.3 Node-Red

Node-Red ist eine 2013 von IBM entwickelte Entwicklungsumgebung zur Erstellung von ereignisgesteuerten Programmen. Noch im gleichen Jahr wurde Node-Red als eigenständiges open source Projekt ausgegliedert und wird seit der Gründung der JS Foundation im Jahr 2016 von dieser verwaltet(Ope).

Node-Red Programme setzen sich aus Flows zusammen. In diesen Flows werden einzelne Blöcke, auch Nodes genannt, miteinander verknüpft um einen Ablauf zu erstellen.

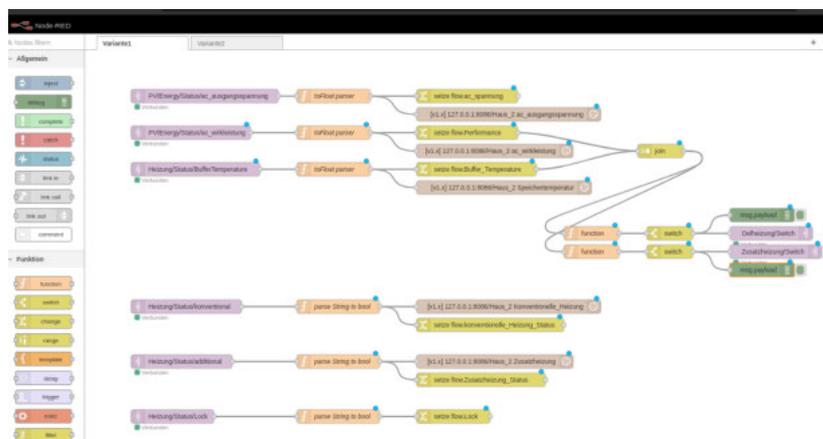


Abbildung 2.5: Beispiel eines Node-Red Flows

Dadurch sind auch umfangreiche Programme übersichtlich und die Funktionsweise einfacher zu verstehen. Außerdem ist die gesamte Entwicklungsumgebung webbasiert. Nachdem Node-Red auf einem Gerät im Netzwerk eingerichtet wurde, kann über einen Webbrowser darauf zugegriffen und eigene Programme erstellt werden.

Durch Addons können eine Vielzahl von Smart-Home Geräte direkt als Node in die Programmierung integriert und mit der datenstromorientierten Programmierung verbunden werden. Node Red eignet sich daher optimal auch für umfangreiche Anwendungen im Smart Home oder dem gesamten IoT Bereich.

Die Einrichtung und Programmierung sind aufwendiger als bei anderen gezeigten Werkzeugen, weshalb für einfachste Monitoring oder Steuerungsaufgaben Node-Red nicht die beste Wahl darstellt.

### 2.3.4 IOBroker

IOBroker ist ein einfaches Input Output Programm für den Smart Home Bereich. Es entwickelte sich aus der Idee eines in der Homatic Community geschaffenen Projekt zur Vernetzung unterschiedlicher Smart Home Geräte. Nach einer grundlegenden Neuprogrammierung wurde es im August 2014 erstmalig vorgestellt(Hei17). Mittlerweile bringt schon die Basisversion von IOBroker über 100 Adapter zur Anbindung von Smart Home Geräten mit. Über Erweiterungen können Adapter für fast alle Hersteller und Protokolle hinzugefügt werden um diese im IOBroker nutzbar zu machen. Die Installation neuer Adapter wird von dem integrierten Paketmanagementsystem übernommen.

Wie bei Node-Red besitzt auch IOBroker ein Webinterface zur Konfiguration des Programmes. Hier können neue Adapter installiert sowie einfache Steuerungen mit Logikbausteinen und eigenen Visualisierungen erstellt werden.

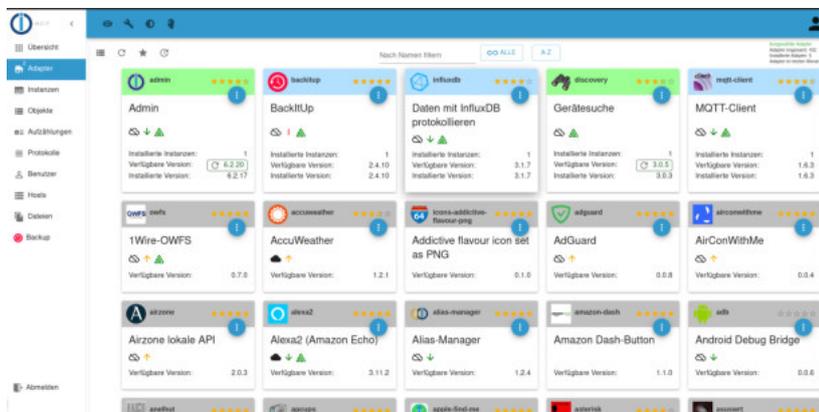


Abbildung 2.6: Webinterfaces von IOBroker

IOBroker ist ein einfaches und doch hoch performantes Programm zur Einrichtung einer Gebäudeautomation. Auch Geräte mit wenig Rechenleistung können als Basis genutzt werden. Es kann mit wenigen Handgriffen installiert und eingerichtet werden. Danach können ohne Probleme die passenden Adapter hinzugefügt werden um ein einfaches Monitoring zu erstellen. Zur Datenspeicherung bietet IOBroker auch Anbindungen an Datenbanken wie InfluxDB.

IOBroker ist ein einfach zu bedienendes Werkzeug welches auch von Einsteigern erfolgreich genutzt werden kann. Es eignet sich hervorragend um typische Aufgaben des Smart Homes umzusetzen. Das Programmieren von umfangreichen Steuerungen ist jedoch umständlich und wird leicht unübersichtlich. Für diese Aufgaben sollte auf Node-Red zurückgegriffen werden.

Neben IOBroker können auch andere Programme genutzt werden. So sind OpenHAB oder Home Assistant ebenfalls freie und quelloffene Automatisierungswerkzeuge mit dem Ziel der Vernetzung unterschiedlicher Produkte verschiedener Hersteller. Jedes dieser Systeme hat Vor- und Nachteile gegenüber den Anderen, ihre Kernfunktionen sind jedoch so ähnlich, dass eine genaue Zuordnung bestimmter Anwendungsfälle nicht sinnvoll wäre.

## 2.4 Photovoltaik

Photovoltaikmodule wandeln die Energie des einfallenden Lichts in elektrische Energie um. Sie bestehen aus einem dotiertem Halbleiter, hier Silizium(WV12). Durch Sonneneinstrahlung werden Elektronen aus dem Silizium Kristallgitter geschlagen und wandern, getrieben durch ein elektrisches Feld zur Kathode. Über eine angeschlossene Leitung fließen diese zurück zur Anode.

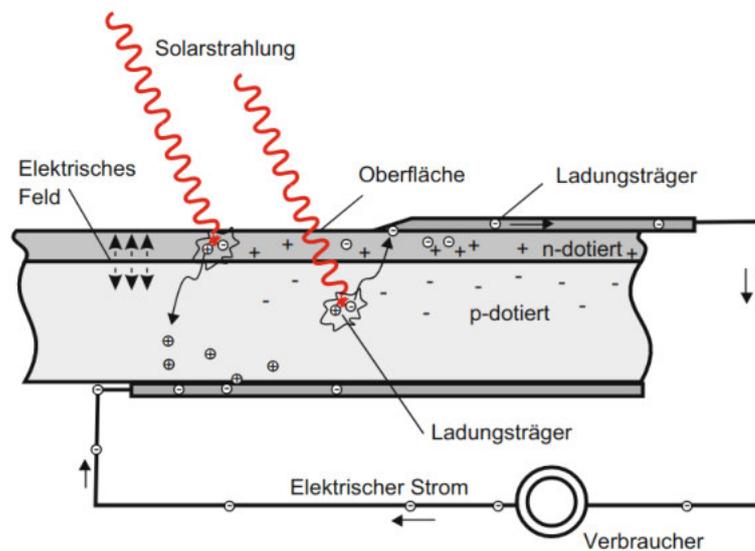


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau einer Solarzelle mit p-n-Übergang und Kontaktierung(WV12)

Aus diesem grundlegenden Prinzip kann schon ein wesentlicher Einfluss auf diese Reaktion abgeleitet werden. Schwingungen im Kristallgitter behindern die Elektronen während sich diese hindurch bewegen. Je höher die Temperatur des Halbleiters, desto stärker schwingen die Teilchen im Kristallgitter. Hohe Temperaturen stören demnach den Elektronenfluss und verringern den Wirkungsgrad(WV12).

Grundlegend werden Photovoltaikmodule in monokristallin und polykristallin unterschieden. Bei monokristallinen Modulen besteht das Silizium, wie der Name schon vermuten lässt, aus einem einzigen geordneten Kristall. Dadurch besitzen diese Module einen höheren Wirkungsgrad, sind jedoch aufwendiger in der Herstellung, was sich in höheren Investitionskosten niederschlägt. Polykristalline Module haben einen leicht geringeren Wirkungsgrad sind jedoch durch ihre einfachere Herstellung auch etwas günstiger. Bei polykristallinen Modulen kann ein Wirkungsgrad von bis zu 16% erwartet werden, bei monokristallinen Modulen steigt dieser auf bis zu 20% an(WV12).

Die Lebensdauer heutiger Photovoltaikmodule ist sehr hoch. Viele Hersteller geben 20 Jahre Garantie auf ihre Produkte, die erwartbare Lebensdauer liegt vermutlich noch darüber(WV12). Diese hohe Lebensdauer kann auf den relativ einfachen Aufbau und das Fehlen von beweglichen Teilen oder Hilfsenergie zurückgeführt werden(WV12).

## 2.5 Wärmepumpen

Bei einer Wärmepumpe handelt es sich im Prinzip um eine Wärmekraftmaschine, wie eine Dampfmaschine, mit umgekehrtem Prozessablauf. Durch verrichtete Arbeit am System wird Wärme vom kälteren zum heißeren Medium transportiert.

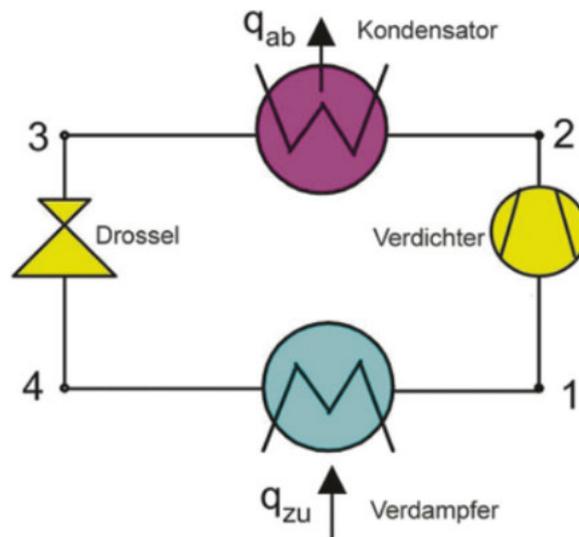


Abbildung 2.8: Schematischer Aufbau einer Wärmepumpe(Fre19)

Abbildung 2.8 zeigt einen grundlegenden Aufbau einer Wärmepumpe. Der Verdampfer befindet sich im kälteren Medium, aus welchem Wärme gepumpt, der Kondensator im heißeren Medium, in welches die Wärme eingebracht werden soll.

Das eingesetzte Kühlmittel befindet sich im Verdampfer. Da es dort expandiert wird, sinkt, dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik nach, seine Temperatur. Durch den natürlichen Ausgleich strömt nun Wärme aus der Umgebung in das expandierte Kühlmittel, die innere Energie steigt. Anschließend wird das Kühlmittel in den Kondensator gepumpt, wo es verdichtet wird. Dabei steigt die Temperatur des Kühlmittels an. Da es nun wärmer als seine Umgebung ist gibt es Wärme an diese ab, die innere Energie sinkt wieder. Zuletzt wird das Kühlmittel wieder zum Verdampfer gepumpt, wo es expandiert wird und der Prozess beginnt von vorn. Für Expansion und Kompression des Mediums muss Arbeit verrichtet, ergo Energie aufgewendet werden(Fre19).

Generell kann festgestellt werden: je größer die Temperaturdifferenz desto mehr Arbeit muss aufgewendet werden um weitere Wärme zu pumpen(Fre19). Außerdem gibt es Grenztemperaturen bei denen der Prozess vollkommen zum Erliegen kommt.

Sinkt die Umgebungstemperatur am Verdampfer unter die Temperatur des expandierten Kühlmittels nimmt es keine Wärme aus seiner Umgebung auf. Steigt die Temperatur am Kondensator über die des komprimierten Mediums wird keine Wärme abgegeben. Für Wärmepumpen wird deshalb in der Regel ein Temperatur Arbeitsbereich angegeben.

## Kapitel 3: Photovoltaikanlage: Bestandteile, Montage, optimale Ausrichtung und Dimensionierung

---

Zur Erzeugung regenerativer Energien bietet es sich an eine Photovoltaikanlage zu installieren. Eine solche Anlage setzt sich grundsätzlich aus drei Bestandteilen zusammen: den Photovoltaikmodulen an sich, einem Maximum-Power-Point Regler zur optimalen Nutzung der einzelnen Module und einem Wechselrichter, welcher den erzeugten Gleichstrom in nutzbaren Wechselstrom umwandelt. Optional kann die Anlage mit einer Nachhaltung erweitert werden um den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen.

### 3.1 Photovoltaikmodule

Das Kernstück einer Photovoltaikanlage besteht aus den Photovoltaikmodulen. Sie erzeugen elektrische Energie aus Sonnenlicht.

Aus einem Vergleich verschiedenster Photovoltaikmodule gingen die SOLARWATT Vision 60m Style 310 als Sieger hervor (Kai). Diese Module werden für folgende Betrachtungen zugrunde gelegt.

#### 3.1.1 Montagearten einer Photovoltaikanlage

In Kapitel 2.4 wurde kurz die Wirkungsweise einer Photovoltaikmodulen beschrieben. Hohe Umgebungstemperaturen behindern die Reaktion und verringern den Ertrag. Daher ist es, unabhängig davon an welchem Standort eine Anlage montiert wird, förderlich, für eine gute Luftzirkulation an den Module zu sorgen um die entstehende Prozesswärme abzutransportieren.

Generell können alle Module aufgeständert montiert werden. Von einer Aufständering spricht man, wenn die Module durch eine entsprechende Unterkonstruktion nicht parallel zum Untergrund liegen. Durch diese Aufständering werden sie einerseits besser hinterlüftet, andererseits kann so die Neigung der Module frei gewählt werden (mehr zur optimalen Neigung und Ausrichtung in 3.1.2).

Werden Module aufgeständert montiert, muss auf die dadurch entstehende Selbstverschattung der Module durch die davor liegende Reihe geachtet werden. Um diese zu verhindern, muss ein gewisser Abstand zwischen den einzelnen Reihen eingehalten werden. Die zur Verfügung stehende Grundfläche kann demnach nicht vollständig genutzt

werden.

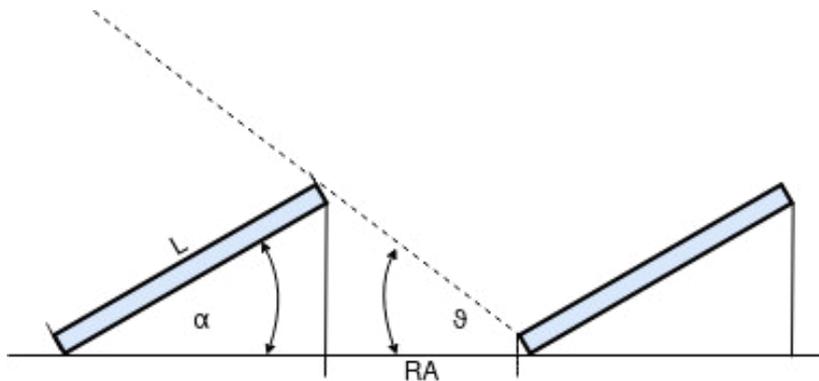


Abbildung 3.1: Prinzipdarstellung zum Reihenabstand bei aufgeständerten Photovoltaikanlagen Quelle: <https://echtsolar.de/photovoltaik-flachdach/> Abbildung angepasst

Der Reihenabstand kann grob mit der Formel  $RA = 3 \cdot \sin(\alpha) \cdot L$  berechnet werden. Die exakte Formel zur Berechnung des Reihenabstandes ermittelt den erforderlichen Abstand, bei dem die Module auch beim niedrigsten Mittagssonnenstand keinen Schatten auf ein anderes Modul werfen:

$$RA = \frac{\sin(\alpha) \cdot L}{\tan(\vartheta)}$$

Die Sonnenhöhe  $\vartheta$  für den 21.12. kann aus Sonnentabellen oder Sonnenstandsrechnern wie <https://www.sonnenverlauf.de> für den jeweiligen Standort abgelesen werden.

Wird eine Photovoltaikanlage verbaut ist es unbedingt nötig diese mit einem Not-Aus zu versehen, um die Module im Stör- oder Brandfall vom Netz und auch untereinander zu trennen. Im Betrieb können an den Modulen bis zu 1000V Gleichspannung anliegen. Können diese nicht vom Netz oder untereinander getrennt werden sind Lösch- und Rettungsarbeiten zu gefährlich.

Unabhängig davon, auf welche Weise und an welchem Standort eine Photovoltaikanlage montiert werden soll, müssen vorher bestimmte Gegebenheiten erfüllt und beachtet werden. Hierbei ist die zu erwartende Wind- und/oder Schneelast auf die Anlage am meisten hervorzuheben, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf die Auswahl der Bauteile hat oder einige Montagearten gänzlich ausschließt.

Sind hohe Schneelasten zu erwarten, müssen diese einerseits mit in die statische Berechnung der Anlage aufgenommen werden, andererseits sollte Schnee so schnell wie möglich von den Modulen entfernt werden, da dieser den Ertrag stark minimiert und eine unnötige Last auf die Unterkonstruktion bringt. Daher sind gut zugängliche Module hier von Vorteil.

Werden Anlagen nicht auf die zu erwartenden Windlasten ausgelegt, kann es zu schweren Sach- oder Personenschäden durch umherfliegenden Teile kommen. Durch das oben beschriebene Aufständern wird die Windlast an der Anlage deutlich erhöht, weshalb in Regionen mit hohen Windlasten generell davon abgesehen werden sollte.

Es ist daher ratsam im Vorfeld ein Gutachten über die Schnee- und Windlast am Standort von einem Fachunternehmen oder dem deutschen Wetterdienst erstellen zu lassen.

Manche Institutionen wie Banken, Versicherungen oder Energieversorger fordern ein solches Gutachten, bevor eine Anlage installiert und betrieben werden kann. DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12 und DIN EN 1991-1-3/NA:2019-04 teilen Deutschland in verschiedenen Schnee- und Windlastzonen auf, woraus sich ein ungefährender Überblick über die zu erwartenden Lasten ableiten lassen kann.

Außerdem muss eine Photovoltaikanlage regelmäßig gewartet und, falls Selbstreinigung durch Regen nicht erfolgt, von Verunreinigungen befreit werden um einen optimalen Ertrag zu erzielen. Daher sollten Anlagen immer zugänglich sein.

Anhand dieser Daten kann der optimale Standort und Montageart der Photovoltaikanlage ausgewählt werden.

#### **Freilandmontage**

Die einfachste Art der Montage ist eine Freilandmontage. Dabei werden die Module auf einer Freifläche in Reihen nebeneinander auf Unterkonstruktionen verbaut und fest an Fundamenten im Erdreich verankert. Zwischen den Reihen muss ein gewisser Abstand bleiben, damit sich die Module nicht gegenseitig verschatten. Die Freilandmontage kommt vor allen Dingen bei industriellen Großanlagen zum Einsatz - es spricht jedoch nichts dagegen auch kleinere private Anlagen im Freiland zu installieren.



Abbildung 3.2: Freilandmontage einer Photovoltaikanlage Quelle:<https://www.mini-solaranlagen.com/garten/>

Die Freilandmontage bietet den Vorteil, dass die Module optimal ausgerichtet und geneigt werden können, um so einen maximalen Ertrag zu gewährleisten. Zudem können sie so platziert werden, dass die Verschattung durch umliegende Gebäude oder Bäume minimiert wird. Unterkonstruktion und Module können ohne Hilfe von Fachpersonal aufgestellt werden. Daher ist die Freilandmontage eine der kostengünstigsten und sichersten Arten um eine Photovoltaikanlage zu installieren. Außerdem gestaltet sich die Wartung einer Freilandanlage einfacher da die Module ebenerdig verbaut und so

ohne Weiteres zugänglich sind. Wird die Anlage durch Verunreinigungen oder Schnee bedeckt können diese ebenso einfach entfernt werden.

Dem entgegen steht der hohe Platzbedarf für eine solche Anlage. Die von der Photovoltaikanlage verdeckte Fläche kann keiner weiteren Nutzung zugeführt werden und die Pflege dieser Flächen ist durch die Unterkonstruktionen erschwert. Die Freilandmontage sollte deshalb nur in Erwägung gezogen werden, wenn eine entsprechend große ungenutzte Fläche zur Verfügung steht, welche sich obendrein durch starke und lange Sonneneinstrahlung als Aufstellort für eine Photovoltaikanlage eignet. Außerdem sind Freilandanlagen anfällig für starken Wind weshalb sie für Regionen mit hohen Windlasten weniger geeignet sind.

### Flachdach- oder Fassadenmontage

Da die für die Freilandmontage benötigten Flächen oft nicht zur Verfügung stehen, müssen andere Flächen gefunden werden, auf denen die Module installiert werden können. Dabei bietet es sich an, unnutzbare Flächen wie Dächer oder Fassaden ins Auge zu fassen. Das bietet den Vorteil, dass diese Fläche so einer Nutzung zugeführt, und eine Photovoltaikanlage ohne Umnutzung anderer Flächen betrieben werden kann. Die am besten zugänglichen Flächen sind hierfür Flachdächer oder Hausfassaden. Bevor eine Photovoltaikanlage an diesen Flächen montiert wird, ist es unbedingt erforderlich, sich über die maximalen Traglasten zu informieren. Danach können auch hier die Unterkonstruktion sowie die Module selbst installiert werden. Während die Montage an der Fassade die Ausrichtung der Module vorgibt kann diese bei einem Flachdach im Rahmen der Dachfläche frei gewählt werden. Über die Unterkonstruktion wird die gewünschte Modulneigung eingestellt. In Regionen mit hohen Windlasten sollten die Module jedoch parallel zum Untergrund verbaut werden. Dadurch verringert sich zwar der Ertrag der Anlage jedoch ist die Windlast der Anlage deutlich geringer.

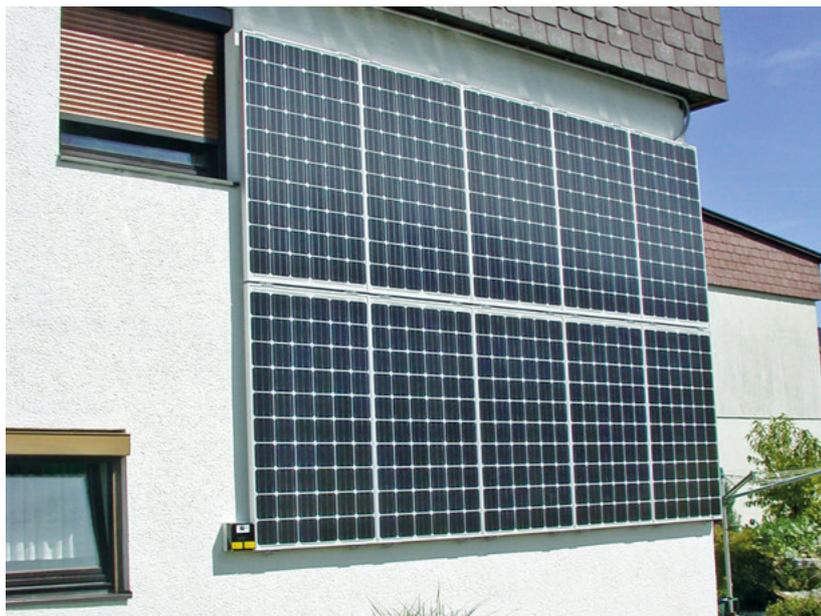


Abbildung 3.3: Montage einer Photovoltaikanlage an einer Fassade Quelle: <https://www.gwtelfs.at/anlageninstallation.html>



Abbildung 3.4: Montage einer Photovoltaikanlage auf einem Flachdach Quelle: <https://blog.photovoltaik-power.com/2020/07/installation-der-selbst-geplanten.html>

Der Nachteil bei dieser Art besteht in den meist ungünstigen Lagen dieser Flächen und dem begrenzten Flächenangebot, wodurch meistens nur kleine bis mittelgroße Anlagen installiert werden können. Außerdem sind solche Flächen, gerade Fassadenflächen, oft durch umstehende Gebäude teilweise oder ganz verschattet, was die Effizienz deutlich verringert. Zusätzlich muss, genau wie bei der Freilandmontage, darauf geachtet werden, dass der Abstand zwischen den einzelnen Reihen aufgeständerter Module groß genug ist damit sie sich nicht gegenseitig verschatten.

#### **Schrägdachmontage**

Sind weder große Freiflächen noch geeignete Flachdächer oder Fassadenflächen vorhanden um eine Photovoltaikanlage zu montieren kann diese auch auf einem Schrägdach installiert werden. Diese Montageart ist in Deutschland weit verbreitet, da viele Einfamilienhäuser ein Satteldach besitzen und diese in der Regel eine Dachneigung zwischen  $38^\circ$  und  $45^\circ$  aufweisen. Diese Neigung liegt innerhalb der optimalen Ausrichtung einer Photovoltaikanlage (siehe Abschnitt 3.1.2). Bei der Schrägdachmontage unterscheidet man grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen. Bei der so genannten Aufdachmontage werden die Module mittels einer Unterkonstruktion auf dem bestehenden Dach montiert. Die Dachhaut bleibt dabei intakt, lediglich für die Halterungen müssen kleine Eingriffe in die vorhandene Konstruktion vorgenommen werden.



Abbildung 3.5: Aufdachmontage einer Photovoltaikanlage auf einem Schrägdach  
Quelle: <https://elektro-plaggenborg.de/eine-frage-der-statik-traegt-jedes-dach-eine-photovoltaikanlage/>

Dementgegen steht die Indachmontage. Hier werden die Photovoltaikmodule in das Dach integriert und ersetzen somit ein Teil der Dachhaut. Sie müssen neben ihrer eigentlichen Aufgabe, der Erzeugung von elektrischer Energie, auch die Aufgaben der Dachhaut wie Witterungsdichtigkeit und Wärmedämmung mit übernehmen.

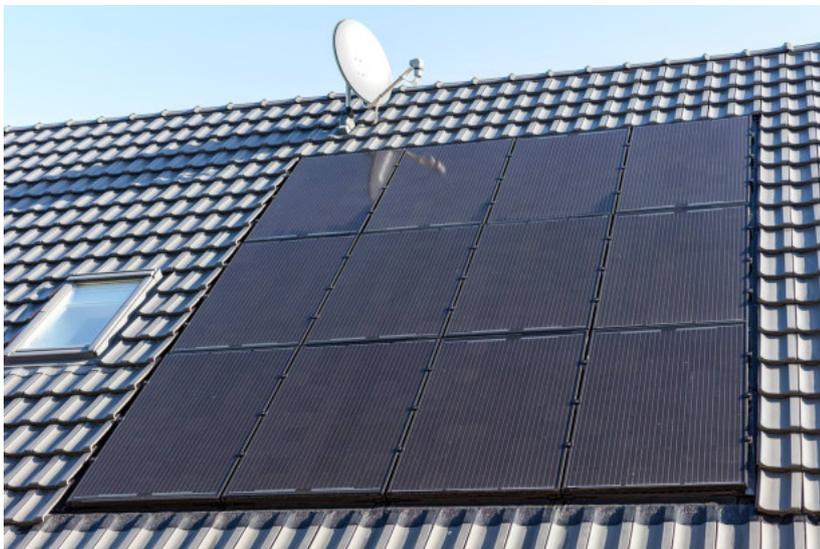


Abbildung 3.6: Indachmontage einer Photovoltaikanlage auf einem Schrägdach  
Quelle: <https://www.baulinks.de/webplugin/2021/1232.php4>

Für ein bestehendes Dach bietet die Aufdachmontage viele unübersehbare Vorteile. Der Aufwand um eine solche Anlage zu installieren ist deutlich geringer als bei einer Indachanlage. Außerdem wird die bestehende Dachhaut nicht verletzt, weshalb bei der Montage keine Ansprüche auf Dichtheit oder Isolation bestehen. Durch die Montage auf dem Dach werden die Module besser hinterlüftet was generell einen höheren Wirkungsgrad zur Folge hat.

Die Inndachmontage bietet ihrerseits auch einige Vorteile. So wird das Gewicht der Photovoltaikmodule bei der Inndachmontage besser auf die bestehende Dachkonstruktion verteilt, bei der Aufdachmontage liegt das gesamte Gewicht punktuell auf den Halterungen im Dach. Außerdem bietet eine im Dach verbaute Photovoltaikanlage keinerlei Angriffsfläche für Wind, weshalb sie in Regionen mit hohen Windlasten öfter gewählt wird. Inndachanlagen werden oft auch aus ästhetischen oder architektonischen Gründen eingesetzt.

### 3.1.2 Optimale Ausrichtung

Damit sich eine Photovoltaikanlage möglichst schnell amortisiert sollte sie optimal ausgerichtet und geneigt sein um somit den bestmöglichen Ertrag zu erzielen. Die Ausrichtung der Anlage wird durch Azimutwinkel und Neigungswinkel beschrieben. Der Azimutwinkel gibt die Abweichung des Blickwinkels von einer Südausrichtung an und kann daher Werte zwischen  $-180^\circ$  und  $180^\circ$  annehmen.

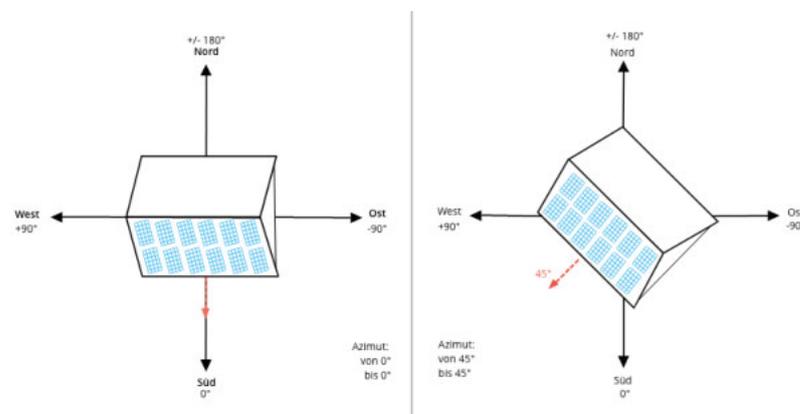


Abbildung 3.7: Beispiel Azimutwinkel Quelle: <https://www.memodo.de/photovoltaik-wiki/azimutwinkel/>

Der Neigungswinkel beschreibt die Abweichung von einer horizontalen Lage. Ein Neigungswinkel von  $0^\circ$  beschreibt eine horizontale Lage, ein Winkel von  $90^\circ$  eine vertikale Lage.

Der Ertrag wird maximiert, wenn der Einstrahlwinkel des Sonnenlichts  $90^\circ$  beträgt. Um die Energieausbeute pro Modul zu maximieren müssten diese durch eine so genannte Nachführung entsprechend dem Sonnenstand automatisch mitgedreht und geneigt werden. Gegenüber von starr montierten Modulen kann eine Ertragssteigerung von bis zu 30% erwartet werden (Gro12).

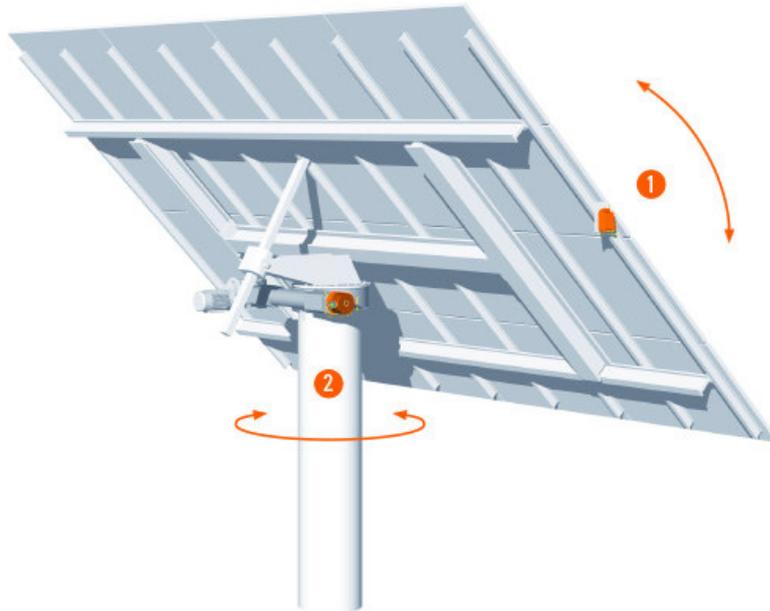


Abbildung 3.8: Zweiachsig nachgeführte Photovoltaikanlage Quelle: <https://solarenergie.de/photovoltaikanlage/arten-von-pv-anlagen/nachgefuehrte-pv-anlagen>

Damit sich Anlagen zur Sonne ausrichten können benötigen sie deutlich mehr Platz als statische Anlagen und können nicht auf Schrägdächern montiert werden. Außerdem sind die Nachführungen durch ihre beweglichen Teile teurer und wartungsintensiver als starre Halterungen. Daher kommen Nachführungen in der Regel nur für größere Anlagen im Freiland in Frage

Bei privaten Anlagen kommen meistens starre Halterungen zum Einsatz. Ausrichtung und Neigung müssen bei der Montage optimal auf die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden. Wird eine Schrägdachmontage gewählt oder lassen erwartete Wind- und Schneelasten eine Aufständigung nicht zu, sind Azimutwinkel und Neigungswinkel durch die baulichen Gegebenheiten vorgegeben. Ob Anlagen unter den Bedingungen rentabel betrieben werden könnten, kann mittels Solarrechnern wie zum Beispiel dem PV-SOL von Hager und Valentin Software (hag) überprüft werden. Können Azimutwinkel und Neigung frei gewählt werden, können diese auf die Bedürfnisse des Betreibers eingestellt werden. In Abbildung 3.9 wird die zu erwartende jährliche Einstrahlung in Abhängigkeit von Azimut- und Neigungswinkel dargestellt. Die zu erwartende Leistung einer Photovoltaikanlage ist direkt proportional zur jährlichen Einstrahlung auf diese Anlage.

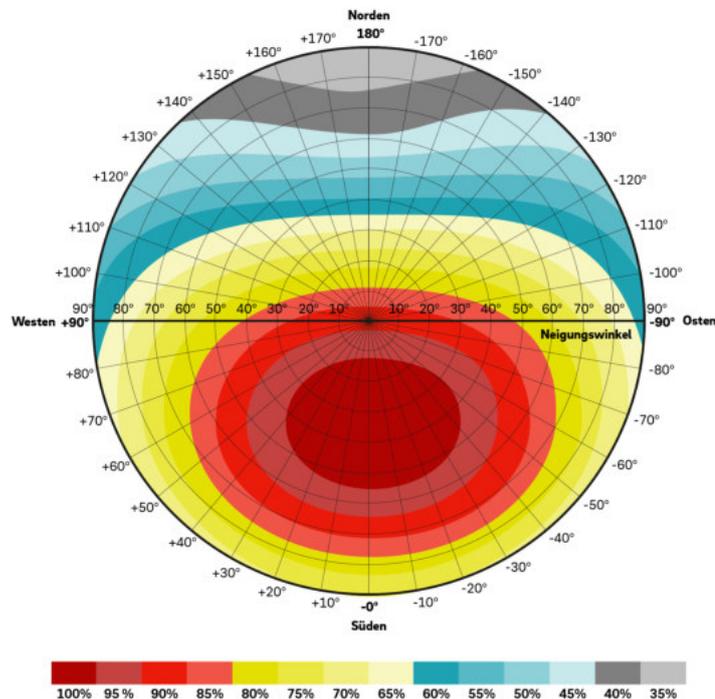


Abbildung 3.9: Jährliche Einstrahlung in Abhängigkeit des Azimut- und Neigungswinkels Quelle: <https://www.eon.de/content/dam/eon/eon-de-zwei/images/solar/solarrechner-teaser/einstrahlungsscheibe/eon-einstrahlungsscheibe-1080x1080.jpg>

Je geringer der Neigungswinkel der Anlage, desto besser kann Sonnenlicht aus verschiedenen Himmelsrichtungen aufgenommen werden. Anlagen mit geringen Neigungswinkeln generieren daher über einen längeren Zeitraum am Tag Energie. Abbildung 3.9 zeigt, dass selbst bei horizontaler Ausrichtung (Neigungswinkel  $0^\circ$ ) immer noch 90% der maximal möglichen Strahlungsenergie vorhanden ist. Jedoch sollte darauf geachtet werden, dass bei Anlagen mit geringen Neigungswinkeln die Selbstreinigung der Module durch Regen nicht mehr gewährleistet ist und sie demnach einem höheren Wartungsaufwand unterliegen. Zudem sind diese Anlagen anfälliger für Schneelasten, da der Schnee von Anlagen mit geringerem Neigungswinkel schlechter abrutschen kann und die Anlage somit länger verdeckt und, falls mit Wasser vermischt, zu Überlast der Module und Unterkonstruktion führen kann.

Aus Abbildung 3.9 kann auch der optimale Azimut- und Neigungswinkel für Anlagen abgelesen werden, bei denen die Ausrichtung nicht durch bauliche Gegebenheiten vorgegeben ist. Bei Anlagen mit einem Azimutwinkel zwischen  $-10^\circ$  und  $10^\circ$  und einem Neigungswinkel zwischen  $30^\circ$  und  $40^\circ$  wird die jährliche Einstrahlung und somit auch der zu erwartende Ertrag maximiert.

### 3.1.3 Dimensionierung

Die Dimension einer Anlage wird in der Regel nicht als Anzahl der Module oder bedeckte Fläche sondern als erwartete Ausgangsleistung angegeben. Um verschiedene Modulty-

pen von verschiedenen Herstellern vergleichen zu können, wird die Ausgangsleistung in Watt-Peak (Wp) angegeben. Dieser Wert beschreibt die maximal mögliche Ausgangsleistung eines Moduls unter optimalen Testbedingungen, den so genannten Standard Test Conditions(MPAS21):

- Zelltemperatur: 25°C
- Bestrahlungsstärke: 1000 W/m<sup>2</sup>

Um eine Anlage richtig zu dimensionieren wird eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Dazu werden verschiedene Herangehensweisen der Dimensionierung verglichen und unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten betrachtet. Photovoltaikanlagen können sich aus zwei Quellen refinanzieren. Zum Einen kann die erzeugte Energie in das öffentliche Netz eingespeist und vom Energieversorger vergütet werden. Zum Anderen kann mit der erzeugten Energie der eigene Bedarf gedeckt werden um Energiekosten zu verringern.

Die Vergütungen der Energieversorger wurden mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz 2023 erhöht und neu festgelegt um den Ausbau der Erneuerbaren Energien voranzutreiben. Die Vergütung unterscheidet zwischen Anlagen die Energie immer vollständig in das öffentliche Netz einspeisen und Anlagen die primär für den Eigenbedarf arbeiten und nur Überschüsse einspeisen.

Tabelle 3.1: Einspeisevergütungen nach EEG 2023 gültig ab Juli 2022 (Vera)

mit Eigenverbrauch		Volleinspeisung	
<10kWp	>10kWp	<10kWp	>10kWp
8,2 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	7,1 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	13,0 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$	10,9 $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$

Wie die erzeugte Energie mit den gezeigten Einspeisevergütungen verrechnet wird kann an einen Beispiel gut verdeutlicht werden:

Angenommen eine 15 kWp Photovoltaikanlage wird als Volleinspeiseanlage betrieben. In diesen Falle werden die ertsten 10 kWp mit 13  $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  vergütet, die übrigen 5 kWp mit 10,9  $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  (Vera)

Für eine Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von Eigenverbrauchsanlagen wird der durchschnittliche Strompreis in Deutschland mit 32,87  $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  verwendet(Stab). Für alle folgenden Berechnungen wird dieser Wert als konstant angenommen. Des Weiteren muss der finanzielle Aufwand einer Photovoltaikanlage für diese Betrachtung abgeschätzt werden. Aus einer Studie, welche die HTW Berlin im Auftrag der Verbraucherzentrale NRW unternommen hat, wurden Angebote für Photovoltaikanlagen im Jahre 2019 erfasst und ausgewertet(BQ18). Es wir eine Formel zur Berechnung der zu erwartenden Investitionskosten angegeben welche für nachstehende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verwendet wird.

$$I_{pv} = (I_0 \cdot P_{pv,r}^{-p}) \cdot P_{pv,r} \cdot (1 + MwSt) \tag{3.1}$$

mit  $I_{pv}$  = Investitionskosten,  $P_{pv,r}$  = Anlagenleistung sowie  $I_0$  und  $p$  als ortsgebundene Parameter

Für den Bundesdurchschnitt werden  $I_0 = 1.923 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  und  $p = 0,16$  angegeben.

Die so bestimmten Investitionskosten sind inklusive Wechselrichter und Maximum-Power-Point Regler, da eine Photovoltaikanlage nicht ohne diese betrieben werden kann.

Die Studie befasst sich auch mit den entstehenden laufenden Kosten einer bestehenden Photovoltaikanlage. Sie setzen sich wie in Tabelle 3.2 dargestellt zusammen:

Tabelle 3.2: Angenommene Zusammensetzung laufender Kosten einer Photovoltaikanlage (BQ18)

Punkt	Kosten $\frac{\text{€}}{a}$
Zählermiete (ab 8kWp)	21
Fixkosten	87
relative Kosten $[\frac{1}{kWp}]$	8

Um die Wirtschaftlichkeit einer Anlage festzustellen wird die Amortisationszeit berechnet. Die Amortisationszeit gibt den Zeitraum an, in dem eine Anlage betrieben werden muss bis der erwirtschaftete Gewinn die Investitions- und Wartungskosten übersteigt und die Gesamtbilanz der Anlage positiv ist. Sie kann mit der Formel 3.2 berechnet werden.

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{jhrl. Gewinn} - \text{jhrl. Wartungskosten}} \quad (3.2)$$

## Volleinspeisung

Für volleinspeisende Anlagen wird die Amortisationszeit in Abhängigkeit der Anlagengröße überprüft. Die Parameter der Simulation werden auf das in 1.1.1 erstellte Modellhaus zugeschnitten. Jedoch werden auch Anlagen betrachtet welche über die zur Verfügung stehende Dachfläche hinaus gehen. Angenommen werden auch dieses Mal die Module von SOLARWATT (Vision 60m STYLE, 310).

G	H	I	J	K	L	M
Größe [kWp]	Baukosten gestaffelt	Baukosten ungestaffelt	jrl. Erzeugung[kwh]	Vergütung [€/a]	Amortisation mit Staffelung	Amortisation ohne Staffelung
1	2288.37	1900	963	125.19	75.80	62.93
2	4096.30	3800	1926	250.38	27.79	25.78
3	5758.48	5700	2889	375.57	21.77	21.54
4	7332.58	7600	3852	500.76	19.21	19.91
5	8844.25	9500	4815	625.95	17.73	19.04
6	10307.97	11400	5778	751.14	16.73	18.50
7	11732.99	13300	6741	876.33	16.00	18.14
8	13125.68	15200	7704	1001.52	15.43	17.87
9	14490.72	17100	8667	1126.71	15.31	18.06
10	15831.65	19000	9630	1251.90	14.88	17.86
11	17151.26	20900	10593	1356.87	14.77	18.00
12	18451.79	22800	11556	1461.83	14.67	18.13
13	19735.07	24700	12519	1566.80	14.57	18.23
14	21002.64	26600	13482	1671.77	14.47	18.32
15	22255.78	28500	14445	1776.74	14.37	18.40
16	23495.63	30400	15408	1881.70	14.28	18.47
17	24723.12	32300	16371	1986.67	14.19	18.53
18	25939.11	34200	17334	2091.64	14.10	18.59
19	27144.34	36100	18297	2196.60	14.02	18.64
20	28339.45	38000	19260	2301.57	13.94	18.69

Abbildung 3.10: Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße als Wertetabelle

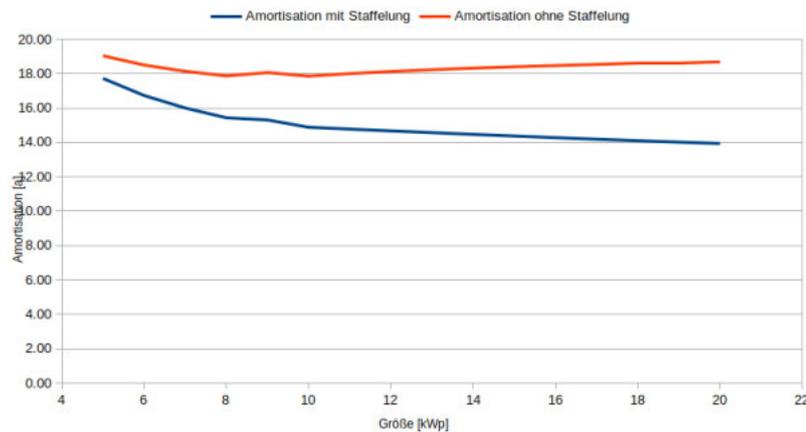


Abbildung 3.11: Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße als Graph

Da laufende Kosten teilweise unabhängig der Größe der Anlage angenommen wurden, liegen die Amortisationszeiträume sehr kleiner Anlagen deutlich höher. Sie wurden für eine bessere Übersicht nicht in die graphische Darstellung aufgenommen. Der Unterschied zwischen blauer und roter Kurve entsteht durch die verschiedene Betrachtung der Investitionskosten. Bei der roten Kurve wurden die Investitionskosten pro kWp konstant angenommen, bei der blauen Kurve wurde eine Staffelung, welche aus der oben genannten Studie hervorgehen, angewendet (BQ18). Dadurch soll der große Einfluss, welcher diese Investitionskosten auf den Amortisierungszeitraum und demnach auf die Wirtschaftlichkeit der Anlage haben, verdeutlicht werden.

Für die Dimensionierung von Anlagen zur Volleinspeisung, lässt sich demnach folgendes feststellen. Verringern sich die relativen Investitionskosten der Anlage wie es in der Realität zu erwarten ist, sollte die Anlage so groß wie möglich dimensioniert werden, da die Wirtschaftlichkeit mit steigender Anlagengröße zunimmt. Bleiben relative Investitionskosten konstant, sinkt die Amortisationszeit bis zu einer Anlagengröße von 10 kWp. Steigt die Anlagengröße weiter, steigt auch die Amortisationszeit, durch die verringerte Vergütung wieder an. Bei Anlagen über 2 kWp liegen die Amortisationszeiträume unterhalb der durchschnittlichen Lebensdauer handelsüblicher Photovoltaikmodule. Der Gewinn, welchen diese Anlagen über ihre gesamte Lebensdauer erwirtschaften, sollte demnach die Investitions- und Wartungskosten übersteigen. Bei 1 kWp und 2 kWp Anlagen ist dies nicht gegeben.

Abschließend wird eine Anlage betrachtet, welche in vollständiger Eigenverantwortung installiert wurde. Als Investitionskosten werden nur Materialkosten angenommen. Zu beachten ist hier, dass der elektrische Anschluss einer Photovoltaikanlage, sofern die Leistungsabgabe höher als 600 W ist, nur von einem Elektrofachbetrieb durchgeführt werden darf. Dieser muss die Anlage anschließend auch bei der Bundesnetzagentur und dem Energieversorger anmelden. Welche Montagearten sich für eine eigenverantwortliche Installation am ehesten eignen, wurde in Abschnitt 3.1.1 dargestellt. Die Kosten für Montagematerial und Kabel wurden grob mit 500 € abgeschätzt.

<sup>1</sup><https://www.shop-muenchner-solarmarkt.de/solarwatt-60m-style-310-glas-glas-solar-modul.htm>

Tabelle 3.3: Materialkosten bei einer eigenverantwortlichen Installation einer Photovoltaikanlage

Punkt	Kosten
PV-Module	725,81 $\frac{\text{€}}{\text{kWp}}$ <sup>1</sup>
Wechselrichter (siehe Abschnitt 3.3)	1000 €
Montagematerial und Kabel	500€

Größe [kWp]	Baukosten fremd	Baukosten Selbstm.	Erzeugung[kwh]	Vergütung [€/a]	Amortisation Fremdmontage	Amortisation Selbstmontage
1	2288.37	2425.81	963	125.19	44.70	47.39
2	4096.30	3151.62	1926	250.38	24.33	18.72
3	5758.48	3877.43	2889	375.57	20.16	13.58
4	7322.58	4603.24	3852	500.76	18.21	11.43
5	8844.25	5329.05	4815	625.95	17.01	10.25
6	10307.97	6054.86	5778	751.14	16.18	9.50
7	11732.99	6780.67	6741	876.33	15.55	8.99
8	13125.68	7506.48	7704	1001.52	15.06	8.61
9	14490.72	8232.29	8667	1126.71	14.97	8.51
10	15831.65	8958.1	9630	1251.90	14.59	8.26
11	17151.26	9683.91	10593	1356.87	14.51	8.19
12	18451.79	10409.72	11556	1461.83	14.43	8.14
13	19735.07	11135.53	12519	1566.80	14.34	8.09
14	21002.64	11861.34	13482	1671.77	14.26	8.05
15	22255.78	12587.15	14445	1776.74	14.18	8.02
16	23495.63	13312.96	15408	1881.70	14.10	7.99
17	24723.12	14038.77	16371	1986.67	14.02	7.96
18	25939.11	14764.58	17334	2091.64	13.94	7.94
19	27144.34	15490.39	18297	2196.60	13.87	7.91
20	28339.45	16216.2	19260	2301.57	13.79	7.89

Abbildung 3.12: Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße Vergleich zwischen Fremd- und Selbstmontage, Tabelle

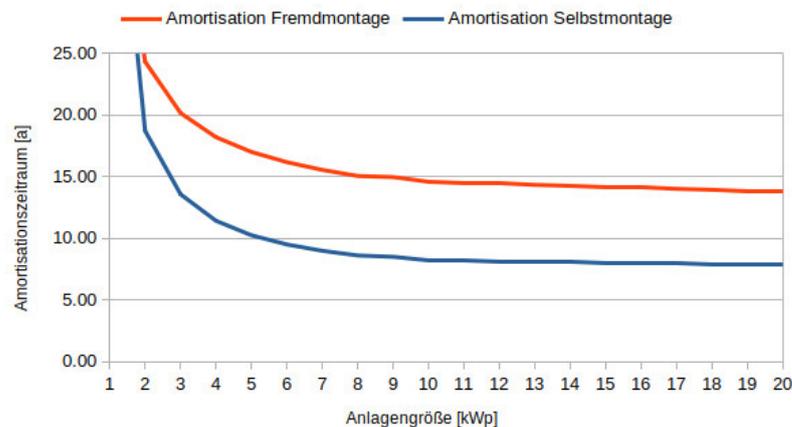


Abbildung 3.13: Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße Vergleich zwischen Fremd- und Selbstmontage, Graph

Wie erwartet sind die Amortisationszeiträume durch die geringeren Investitionskosten bei einer eigenverantwortlichen Montage deutlich kleiner. Hier zeigt sich wieder der große Einfluss der Investitionskosten auf die Amortisationszeit und damit die Wirtschaftlichkeit einer Anlage. Diese Aussage gilt ebenso für die im folgenden Abschnitt gezeigten Eigenverbrauchsanlagen.

### Eigenverbrauch

Für den Eigenverbrauch vorgesehene Anlagen sollen sich vor allen Dingen durch geminderten Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz refinanzieren. Überschüssige Energie wird nach wie vor eingespeist jedoch, wie in Tabelle 3.1 dargestellt, mit einer deutlich geringeren Vergütung.

Zuerst wird der nötige Eigenverbrauchsanteil berechnet, ab welchem die Anlage wirtschaftlicher arbeitet als eine vergleichbare, volleinspeisende Anlage.

$$E_{min} = \frac{V_V - V_E}{P_S - V_E} \tag{3.3}$$

Mit  $E_{min}$  = minimalem Eigenverbrauchsanteil,  $V_V$  = Vergütung bei Volleinspeisung,  $V_E$  = Vergütung bei Eigenverbrauch und  $P_S$  = Strompreis.

T	U	V	W	X	Y
Größe [kWp]	Baukosten gestaffelt	Baukosten ungestaffelt	jrl. Erzeugung[kWh]	min Eigenverbrauch	jrl min Eigenverbrauch [kWh]
1	2288.37	1900	963	0.19457	187.37
2	4096.30	3800	1926	0.19457	374.74
3	5758.48	5700	2889	0.19457	562.11
4	7332.58	7600	3852	0.19457	749.48
5	8844.25	9500	4815	0.19457	936.85
6	10307.97	11400	5778	0.19457	1124.22
7	11732.99	13300	6741	0.19457	1311.58
8	13125.68	15200	7704	0.19457	1498.95
9	14490.72	17100	8667	0.19457	1686.32
10	15831.65	19000	9630	0.19457	1873.69
11	17151.26	20900	10593	0.19011	2013.86
12	18451.79	22800	11556	0.18643	2154.35
13	19735.07	24700	12519	0.18333	2295.08
14	21002.64	26600	13482	0.18069	2436.00
15	22255.78	28500	14445	0.17841	2577.06
16	23495.63	30400	15408	0.17642	2718.25
17	24723.12	32300	16371	0.17467	2859.53
18	25939.11	34200	17334	0.17312	3000.90
19	27144.34	36100	18297	0.17174	3142.33
20	28339.45	38000	19260	0.17050	3283.82

Abbildung 3.14: Berechnung des minimalen Eigenverbrauchsanteils abhängig von der Anlagengröße, Tabelle

Bei Anlagen bis zu einer Größe von 10 kWp müssen mindestens 19,5% der erzeugten Energie in den Eigenverbrauch fließen, damit diese Anlagen wirtschaftlicher arbeiten als bei einer Volleinspeisung. Bei Anlagen über 10kWp sinkt der minimale Eigenverbrauchswert stetig ab. Dies kann mit der Veränderung der Einspeisevergütungen ab Anlagengrößen von 10kWp begründet werden. Der absolute minimale Eigenverbrauch steigt hingegen mit größer werdenden Anlagen immer weiter an. Bei einer Anlagengröße von 15 kWp liegt dieser bei  $2.577 \frac{kWh}{a}$ . In Abschnitt 1.1.1 wurde der durchschnittliche Stromverbrauch einer vierköpfigen Familie mit  $4.500 \frac{kWh}{a}$  angegeben. Bei Anlagen dieser Größe ohne Speicher liegt der Autarkiegrad in der Regel zwischen 30% und 40% (BQ18). In diesem Szenario können demnach maximal  $1.800 \frac{kWh}{a}$  durch den Eigenverbrauch gedeckt werden, wodurch Anlagen über 9kWp bereits schon als Volleinspeisung betrieben werden sollten. Alle diese Betrachtungen setzen einen konstant bleibenden Strompreis voraus. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dieser in den kommenden Jahren ansteigen wird. Dadurch verringert sich der minimale Eigenverbrauch und der Schwellwert für eine wirtschaftlichere Eigenverbrauchsanlage steigt an.

Um auch für Eigenverbrauchsanlagen eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchführen zu können, muss zuerst festgestellt werden wie hoch der Eigenverbrauchsanteil von Anlagen verschiedener Größen ist. In der Studie der HTW Berlin stellt ein Graph den Zusammenhang zwischen spezifischer Anlagengröße, spezifischer Speicherkapazität und Eigenverbrauchsanteil dar (BQ18). Anhand dieses Graphen kann der Eigenverbrauchsanteil bezogen auf den Verbrauch des Modellhauses, für Anlagen verschiedener Größen

abgeschätzt werden. Alternativ stellt die HTW Berlin eine Website zur Verfügung, welche den zu erwartenden Eigenverbrauchswert abhängig von Anlagen- und Speichergröße angibt (Ber).

Der Gewinn einer Eigenverbrauchsanlage setzt sich aus dem durch Eigenverbrauch eingesparten Netzstrom und der Einspeisung der überschüssigen Energie zusammen. Er lässt wie folgt berechnen:

$$G_E = E \cdot (A_{EV} \cdot P_S + V_E - A_{EV} * V_E) \quad (3.4)$$

Mit  $G_E$  = Gewinn,  $E$  = Erzeugte Energie,  $A_{EV}$  = Eigenverbrauchsanteil,  $P_S$  = Strompreis,  $V_E$  = Vergütung bei Eigenverbrauch  $[\frac{1}{kWh}]$ .

Da in der vorherigen Betrachtung festgestellt wurde, dass größere Anlagen effektiver mit Volleinspeisung betrieben werden können, werden für die folgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, nur Anlagen bis 10kWp betrachtet.

T	U	V	W	X	Y	Z	AA
Größe [kWp]	Baukosten gestaffelt	Baukosten ungestaffelt	jrl. Erzeugung[kwh]	Eigenverbrauchswert real	Gewinn [€/a]	Amortisation gestaffelt	Amortisation ungestaffelt
1	2288.37	2288.37	963	0.7	245.27	15.23	15.23
2	4096.30	4576.74	1926	0.5	395.50	14.00	15.65
3	5758.48	6865.11	2889	0.42	536.24	13.54	16.14
4	7332.58	9153.48	3852	0.35	648.46	13.85	17.29
5	8844.25	11441.85	4815	0.3	751.19	14.17	18.33
6	10307.97	13730.22	5778	0.25	830.15	14.83	19.75
7	11732.99	16018.59	6741	0.22	918.62	15.13	20.65
8	13125.68	18306.96	7704	0.2	1011.84	15.25	21.27
9	14490.72	20595.33	8667	0.18	1095.56	15.83	22.49
10	15831.65	22883.7	9630	0.16	1169.78	16.13	23.31

Abbildung 3.15: Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße als Tabelle

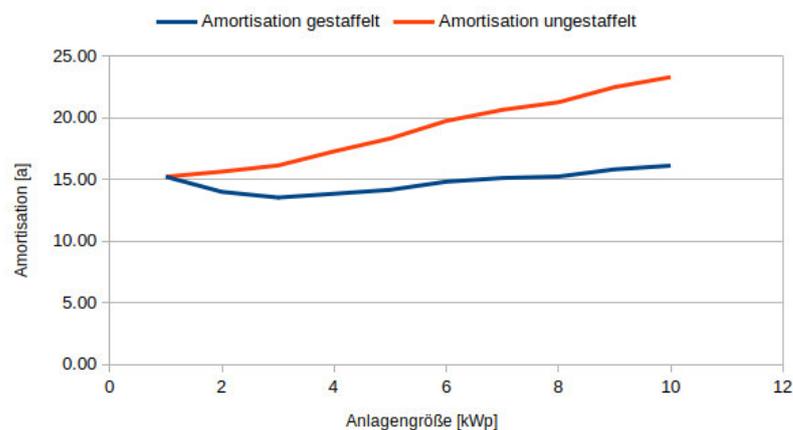


Abbildung 3.16: Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße als Graph

Es werden realistisch gestaffelte Investitionskosten und konstante Investitionskosten pro kWp angenommen und miteinander verglichen. Für Eigenverbrauchsanlagen ohne Speicher beträgt die Anlagengröße mit der kürzesten Amortisationszeit 3kWp. Auch dieser Wert ist stark vom verwendeten Strompreis abhängig.

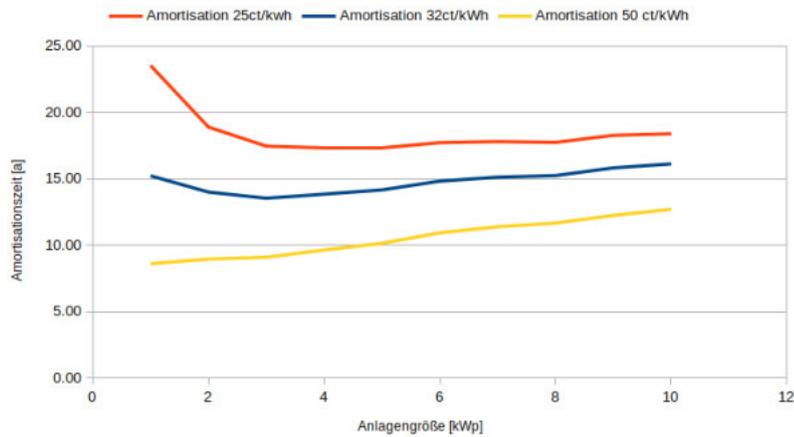


Abbildung 3.17: Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße und Strompreis als Graph

Abbildung 3.17 zeigt die Amortisationszeiträume in Abhängigkeit der Anlagengröße bei verschiedenen Strompreisen. Mit steigendem Strompreis werden Eigenverbrauchsanlagen generell immer wirtschaftlicher. Kleinere Anlagen profitieren durch ihren hohen Eigenverbrauchsanteil besonders stark von dieser Entwicklung.

Das Ergebnis zeigt, dass sich kleinere Anlagen schneller amortisieren jedoch haben diese einen geringeren absoluten Gewinn (Siehe Abbildung 3.15). Dies sollte für eine Dimensionierung der Anlage mit in Betracht gezogen werden. Eine Verbesserung des Eigenverbrauchsanteils größerer Anlagen, kann zum Beispiel durch eine Nachhaltung der Energie in einem Speicher erfolgen.

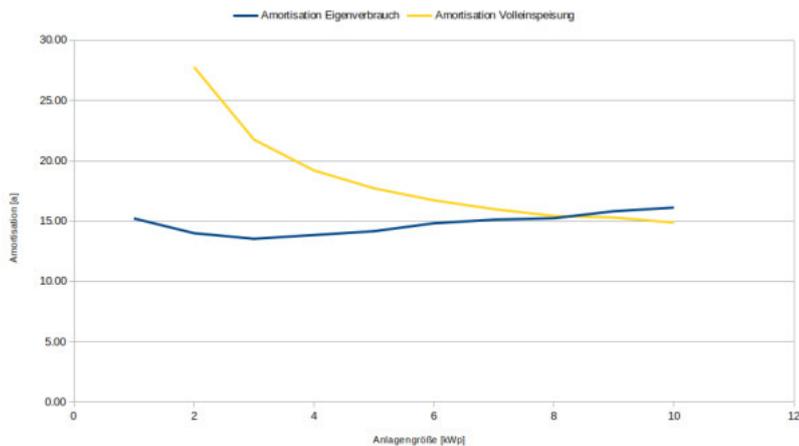


Abbildung 3.18: Vergleich der Amortisationszeiten von Eigenverbrauchsanlagen und Volleinspeiseanlagen abhängig von Anlagengröße

Der Vergleich zwischen Volleinspeiseanlagen und Eigenverbrauchsanlagen zeigt, dass kleinere Anlagen, wirtschaftlicher als Eigenverbrauchsanlagen betrieben werden. Erst ab einer Anlagengröße von 9kWp, amortisieren sich Volleinspeiseanlagen schneller. Bei beiden Kurven liegen realistisch gestaffelte Investitionskosten, eine Anlage ohne Nachhaltung und ein Strompreis von 32,87  $\frac{\text{Cent}}{\text{kWh}}$  zugrunde.

### Kombination mit Nachhaltigkeit

Eine Kombination mit einer Nachhaltigkeit, ist nur bei Eigenverbrauchsanlagen sinnvoll. Ziel der Nachhaltigkeit ist es, den Eigenverbrauchsanteil zu erhöhen, indem die erzeugte Energie zwischengespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verwendet werden kann. Soll eine Anlage auf möglichst hohen Eigenverbrauch ausgelegt werden, gilt als Faustregel: 1 kWp pro MWh Jahresverbrauch. Für das Modellhaus wäre nach dieser Regel eine Anlage mit 4,5 kWp optimal, wenn sie mit einer Nachhaltigkeit kombiniert wird. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für eine Anlage mit Speicher befindet sich in Abschnitt 3.2.2.

### Zusammenfassung

Durch die angehobene Einspeisevergütung von Volleinspeiseanlagen, werden diese wieder lukrativer. Stehen große Dachflächen zur Verfügung sollten diese maximal ausgenutzt und die erzeugte Energie voll eingespeist werden, da die Wirtschaftlichkeit mit der Anlagengröße ansteigt.

Stehen nur kleine Flächen(bis 10kWp) zur Verfügung, sollte eine Eigenverbrauchsanlage in Betracht gezogen werden. Wird diese nicht mit einer Nachhaltigkeit kombiniert so ist eine Anlage mit 3kWp am wirtschaftlichsten (Betrachtung für das Modellhaus und konstanter Strompreis). Unter den Gegebenheiten des Modellhauses und dem derzeitigen Strompreis, sind Eigenverbrauchsanlagen bis zu einer Anlagengröße von 8kWp wirtschaftlicher als Volleinspeiseanlagen.

## 3.2 Nachhaltigkeit

Zusätzlich kann die Anlage mit einem Speicher erweitert werden, um die erzeugte Energie zwischenzuspeichern. Durch eine geeignete Speicherung der Energie, soll der Eigenverbrauchsanteil einer Photovoltaikanlage erhöht und somit die Wirtschaftlichkeit verbessert werden. In der Regel wird die erzeugte elektrische Energie ohne weitere Umwandlung in einer Batterie, heutzutage oft eine Lithium-Ionen-Batterie, für den späteren Gebrauch gespeichert. Lithium-Ionen-Batterien zeichnen sich durch den hohen Wirkungsgrad beim Laden und Entladen sowie eine große spezifische Energie und eine geringe Selbstentladung aus. Außerdem besitzen sie eine vergleichsweise lange Lebensdauer von ca. 10 Jahren, auch bei einer intensiven Nutzung(Leu13). Durch die hohe Leistungs- und Energiedichte benötigen Lithium-Ionen-Batterien weniger Platz für eine gleiche Kapazität und Leistungsabgabe als andere Batterien. Außerdem kann bei einer Lithium-Ionen-Batterie fast die gesamte Kapazität genutzt werden, ohne das sie dadurch Schaden nimmt oder sich die Gesamtkapazität merklich verringert.

Die Leistungsabgabe und -aufnahme eines Speichers wird als c-Wert angegeben. Aus dem c-Wert und der Gesamtkapazität des Speichers kann die maximale Leistungsabgabe berechnet werden.

$$P_{max} = C_{max} \cdot c - Wert \quad (3.5)$$

Ein Speicher mit eine Kapazität von 10 kWh und einem C-Wert von 0,8 kann demnach maximal 8kW abgeben oder aufnehmen. Durch häufiges Laden und Entladen mit maximal möglicher Leistung sinkt die Lebensdauer des Speichers. Je nach Anwendungsfall

kann es daher sinnvoll sein Lade- und Entladeleistung weiter zu begrenzen.

Batteriespeicher werden entweder als Hochvolt- oder Niedervoltspeicher ausgeführt. Hochvoltspeicher versprechen generell einen leicht höheren Wirkungsgrad, da die Spannungsdifferenz zwischen Speicherspannung und Netzspannung geringer ist als bei Niedervoltspeichern. Von einem Hochvoltspeicher spricht man bei einer Batteriespannung größer 60V. Speicher mit niedrigeren Spannungen werden als Niedervoltspeicher bezeichnet.

Jeder Speicher verfügt über ein Batteriemanagementsystem, kurz BMS, welches die Batterien im Speicher vor Überladung, Tiefenentladung oder zu hohen Temperaturen schützt. Manche BMS sind neben diesen Grundfunktionen noch mit einem Balancer ausgestattet. Dieser sorgt dafür, dass sich alle Zellen der Batterie gleichmäßig laden beziehungsweise entladen, wodurch die Lebensdauer gesteigert und die Gesamtkapazität besser ausgenutzt wird.

### 3.2.1 Montagearten

Bei der Montage von Batterie-Speichersystemen für Einfamilienhäuser wird grundlegend zwischen zwei Varianten unterschieden:

#### DC-gekoppeltes System

Da sowohl Photovoltaikanlage als auch Batteriespeicher mit Gleichstrom arbeiten, bietet es sich an beide mit einem Wechselrichter zu betreiben. Dadurch sind die Verluste der Anlage generell geringer. Jedoch muss darauf geachtet werden, dass Photovoltaikmodule, Wechselrichter, Laderegler und Speicher aufeinander abgestimmt und zueinander kompatibel sind.

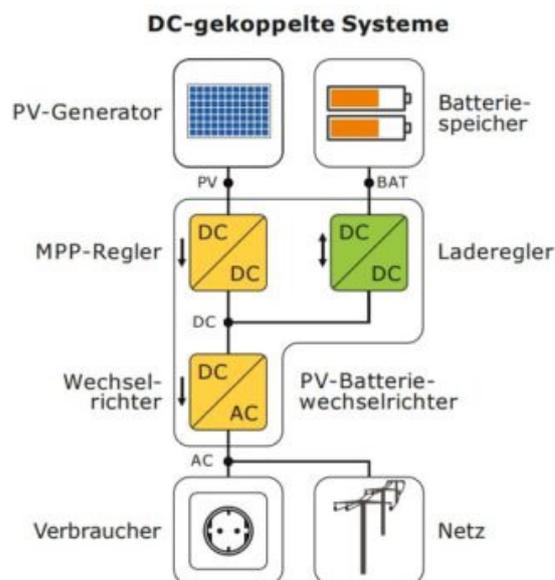


Abbildung 3.19: DC gekoppeltes System Quelle: <https://selecta-solar.de/stromspeicher/>

DC-gekoppelte Anlagen werden in der Regel als Komplettpaket angeboten, verkauft und installiert. Zu diesem Zweck bietet die Industrie Kombinationsgeräte zwischen Wech-

selrichter und Laderegler an, um Photovoltaikanlage und Batteriespeicher zu verbinden. Diese so genannten Hybridwechselrichter sind in der Regel teurer als vergleichbare Photovoltaikwechselrichter und es muss auf die Kompatibilität zum Batteriespeicher geachtet werden. Ist eine bestehende Photovoltaikanlage mit einem nicht kompatiblen Wechselrichter ausgestattet, kann diese Anlage nicht mit einem DC-gekoppelten Batteriespeicher erweitert werden ohne den Wechselrichter auszutauschen. In diesem Fall ist es oft sinnvoller ein AC-gekoppeltes System zu verwenden. Außerdem kann ein DC-gekoppelter Speicher nur Energie aus der Photovoltaikanlage speichern. Für Energie aus anderen Quellen, wie etwa eine private Windkernanlage, müsste ein weiterer Speicher installiert werden.

### AC-gekoppeltes System

Eine andere Möglichkeit besteht darin den Speicher unabhängig von der Photovoltaikanlage im Wechselstromnetz des Gebäudes anzuschließen. Bei dieser Variante können Photovoltaikanlage und Speicher unabhängig voneinander installiert werden, sodass nicht alle Teile zueinander kompatibel sein müssen. Dadurch kann auf eine größere Auswahl an Herstellern und Modellen der verschiedenen Bestandteile zurückgegriffen werden. Dafür sind die Verluste insgesamt höher als bei einer integrierten Lösung. Außerdem ist ein größerer finanzieller Aufwand nötig, da ein zusätzlicher Wechselrichter installiert werden muss.

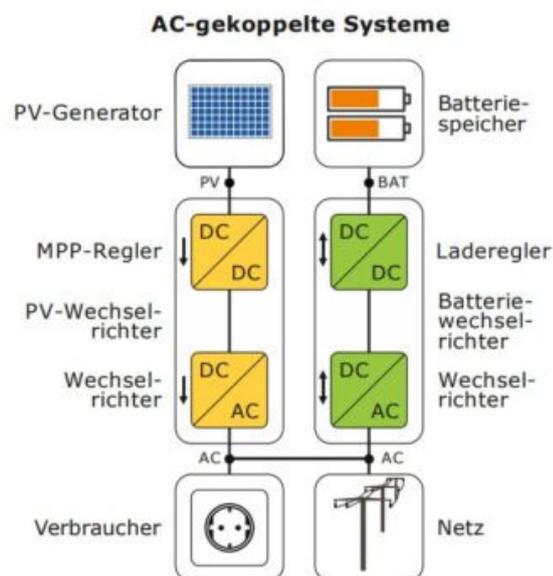


Abbildung 3.20: AC gekoppeltes System Quelle: <https://selecta-solar.de/stromspeicher/>

Da das AC-gekoppelte System unabhängig von der Photovoltaikanlage agiert, kann es auch Energie aus anderen Quellen speichern. Es kann sogar so programmiert werden, dass es Strom aus dem öffentlichen Netz speichert.

### 3.2.2 Dimensionierung

Die Hauptaufgabe der Nachhaltung besteht darin die am Tag erzeugte Energie zu speichern und für die Nacht nutzbar zu machen. Eine Speicherung der Energie über mehrere Wochen oder gar Monate hinweg ist mit einem Batteriespeicher, durch die auftretende Selbstentladung, nicht möglich. Außerdem sinkt die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien wenn sich diese lange in einem voll geladenen Zustand befinden(Leu13).

Die Investitionskosten werden in einem Artikel der Aachener Universität aus dem Jahre 2019 angegeben. Speicher bis 5kWh haben mittlere Investitionskosten von  $1.747 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ , bei Systemen zwischen 5kWh und 10kWh liegen die mittleren Investitionskosten bei  $1.348 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$  (FHK+19). Der für die Bestimmung der Amortisationszeit nötige Eigenverbrauchsanteil, welcher vom jährlichen Stromverbrauch, der Anlagengröße und der Speichergröße abhängig ist, wird wieder aus der Studie der HTW Berlin (BQ18) oder der Website der HTW Berlin (Ber) entnommen. Um den Effekt, den eine Nachhaltung auf die Wirtschaftlichkeit einer Anlage hat, festzustellen, wird der zusätzliche Gewinn, welcher durch die Nachhaltung entsteht, den nötigen Investitionskosten gegenübergestellt, um anschließend die Amortisationszeit zu berechnen. Die Gewinndifferenz lässt sich folgendermaßen bestimmen:

$$G_d = G_S - G_O \tag{3.6}$$

Mit  $G_d$  = Gewinndifferenz durch Nachhaltung,  $G_S$  = Gewinn mit Nachhaltung,  $G_O$  = Gewinn ohne Nachhaltung.

Durch einsetzen von Formel 3.4 ergibt sich daraus:

$$G_d = E \cdot [P_S \cdot (A_{EVS} - A_{EVO}) + V_E \cdot (A_{EVS} - A_{EVO})] \tag{3.7}$$

Mit  $G_d$  = Gewinndifferenz durch Speicher,  $E$  = erzeugte Energie,  $A_{EVS}$  = Eigenverbrauchsanteil mit Speicher,  $A_{EVO}$  = Eigenverbrauchsanteil ohne Speicher.

		N	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
		Speicher										
	Amortisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PV	1	29.4	49.0	68.9	91.9	114.9	106.4	124.1	141.9	159.6	177.3	
	2	17.5	23.7	29.0	34.2	39.1	34.7	39.7	44.5	50.1	55.6	
	3	17.5	21.3	24.5	27.2	29.9	25.2	27.6	30.3	33.4	36.4	
	4	16.7	20.4	23.0	24.5	26.3	21.8	24.2	25.8	28.4	30.8	
	5	18.4	21.0	23.2	24.5	26.3	21.3	22.7	24.5	26.9	29.1	
	6	17.5	20.4	21.6	23.3	24.5	20.3	22.1	23.6	25.8	27.8	
	7	17.5	19.1	21.0	22.1	23.9	19.5	21.0	23.2	24.3	27.0	
	8	18.4	20.4	21.2	23.0	24.2	19.3	20.7	22.7	24.6	26.3	
	9	16.3	18.2	20.4	21.8	22.7	18.9	20.1	21.9	23.6	25.2	
	10	18.4	21.0	22.1	22.6	23.0	18.9	20.9	21.6	24.3	25.8	

Abbildung 3.21: Amortisationszeitraum für Anlagen mit Nachhaltung abhängig von Anlagengröße und Speichergröße in Jahren als Tabelle

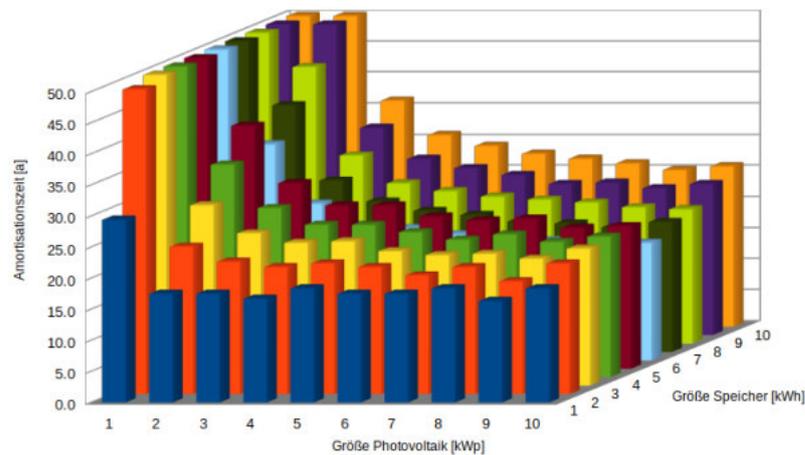


Abbildung 3.22: Amortisationszeitraum für Anlagen mit Nachhaltigkeit abhängig von Anlagengröße und Speichergöße als Graph

Für die bessere Lesbarkeit wurde die Amortisationszeit in Abbildung 3.22 auf 50 Jahre begrenzt. Diese Grenze liegt weit über der erwartbaren Lebenszeit von Batteriespeichern.

Aus Graph und Tabelle geht hervor, dass die Amortisationszeit proportional zur Speichergöße ansteigt. Daraus lässt sich schließen, dass ein Speicher generell die Wirtschaftlichkeit der Anlage verschlechtert. Um dies zu überprüfen wird die Amortisationszeit einer Anlage mit einem  $1\text{kWh}$  Speicher mit einer Anlage ohne Speicher verglichen.

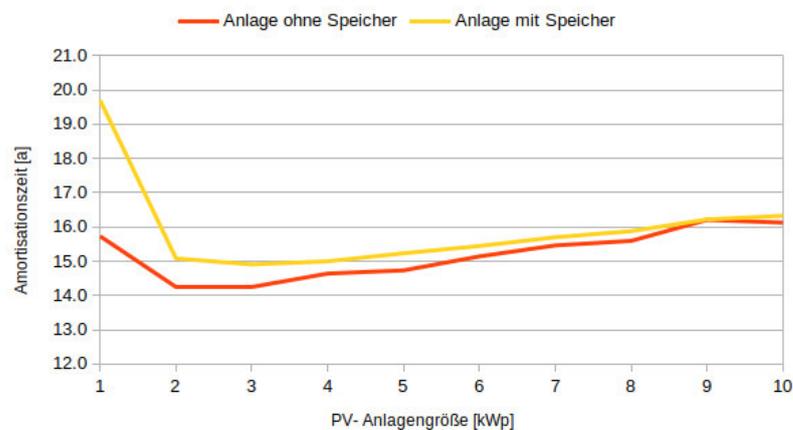


Abbildung 3.23: Vergleich zwischen Anlagen mit und ohne Speicher Amortisationszeit abhängig von PV Anlagengröße

Der Graph zeigt, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Anlage weiter verbessert, wenn keine Nachhaltigkeit vorgesehen ist.

Dieses Phänomen deckt sich mit Aussagen der Verbraucherzentrale und der HTW Berlin über Nachhaltigkeiten bei Photovoltaikanlagen(Verb)(NO22). Beide kommen zu dem Schluss, dass sich Nachhaltigkeiten im Moment für private Haushalte aus wirtschaftlicher Sicht nicht lohnen. Auch die hier durchgeführte Betrachtung zeigt, dass alle Amortisationszeiträume größer als die erwartbare Lebensdauer eines Batteriespeichers sind. Es kann demnach nicht davon ausgegangen werden, dass die Gewinne, welche durch die

Nachhaltung erwirtschaftet werden, die getätigten Investitionen übersteigen. Dies begründet sich mit den immer noch hohen Investitionskosten für Batteriespeicher.

Auch hier wird abschließend eine Betrachtung einer in reiner Eigenverantwortung installierten Anlage durchgeführt. Als Speicher werden Lithium-Eisen-Phosphor Zellen angenommen. Sie stellen eine schwermetallfreie Version der Lithium-Ionen-Batterien dar, welche sich auszeichnet für den stationären Einsatz eigenen. Die Investitionskosten für eine Nachhaltung werden, wie in Tabelle 3.4 dargestellt, abgeschätzt.

Tabelle 3.4: Materialkosten bei einer eigenverantwortlichen Installation einer Nachhaltung

Punkt	Kosten
Speicherzellen	207,53 $\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ <sup>2</sup>
Wechselrichter (siehe Abschnitt 3.3)	1.000 €
BMS	100€
Montagematerial und Kabel	700€

Zum Vergleich mit den oben gezeigten, fremdinstallierten Speichern wird eine Photovoltaikanlage mit 4,5 kWp angenommen.

Speichergröße [kWh]	Baukosten Fremdmontage	Baukosten Eigenmontage	Amortisation Fremdmontage	Amortisation Eigenmontage	Gewinn [€]
1	1747	2107.53	32.682	39.427	53.45
2	3494	2315.06	36.314	24.061	96.22
3	5241	2522.59	40.853	19.663	128.29
4	6988	2730.12	43.577	17.025	160.36
5	8735	2937.65	45.392	15.266	192.43
6	10482	3145.18	46.026	14.009	224.51
7	12229	3352.71	46.776	13.067	256.58
8	13976	3560.24	47.797	12.808	277.96
9	15723	3767.77	48.731	12.153	310.03
10	17470	3975.3	49.674	11.995	331.41

Abbildung 3.24: Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Tabelle

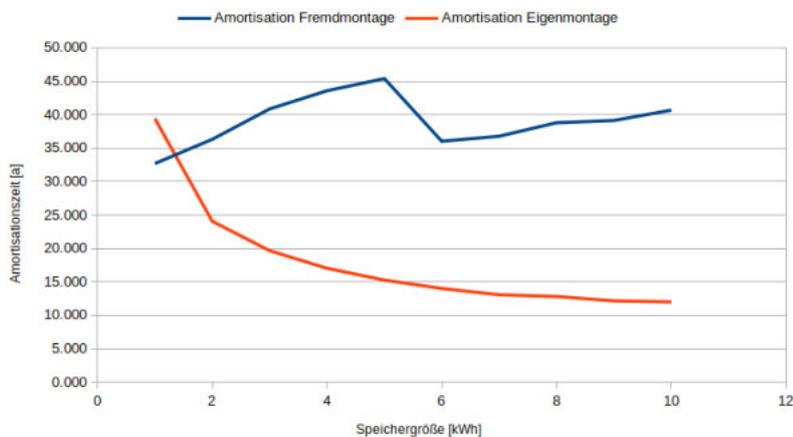


Abbildung 3.25: Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Graph

<sup>2</sup><https://www.nkon.nl/de/eve-lf280-prismatic-280ah-280a-lifepo4.html>

Der Vergleich zeigt, dass durch die Verringerung der Montagekosten ebenfalls die Amortisationszeit verringert wird. Jedoch sinkt diese auch bei Eigenmontage nicht unter 10 Jahre ab, sodass auch dieser Speicher die getätigten Investitionen wahrscheinlich nicht erwirtschaften kann.

Um die Wirtschaftlichkeit des Speichers weiter zu verbessern, muss der Strombedarf des Modellhauses erhöht werden. Dazu kann zum Beispiel die vorhandene Heiztechnik durch eine Wärmepumpe ersetzt werden. Dadurch würde sich der Strombedarf pro Jahr um ca. 4.500 kWh erhöhen. Mit diesem neuen Strombedarf wird eine weitere Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Wiederum werden Fremd- und Eigeninstallierte Systeme verglichen, jedoch wird eine 9kWp Photovoltaikanlage angenommen:

Speichergröße [kWh]	Baukosten	Fremdmontage	Baukosten	Eigenmontage	Amortisation	Fremdmontage	Amortisation	Eigenmontage	Gewinn [€]
1	1747		2107.53		16.341		19.714	106.91	
2	3494		2315.06		18.157		12.030	192.43	
3	5241		2522.59		20.427		9.832	256.58	
4	6988		2730.12		21.788		8.512	320.72	
5	8735		2937.65		22.696		7.633	384.87	
6	10482		3145.18		18.013		7.005	449.01	
7	12229		3352.71		18.388		6.534	513.16	
8	13976		3560.24		19.399		6.404	555.92	
9	15723		3767.77		19.566		6.076	620.06	
10	17470		3975.3		20.337		5.998	662.83	
11	19217		4182.83		21.015		5.928	705.59	
12	20964		4390.36		21.615		5.867	748.35	
13	22711		4597.89		22.766		5.973	769.73	
14	24458		4805.42		23.227		5.914	812.50	
15	26205		5012.95		24.248		6.012	833.88	
16	27952		5220.48		25.218		6.104	855.26	
17	29699		5428.01		26.794		6.347	855.26	
18	31446		5635.54		27.678		6.429	876.64	
19	33193		5843.07		29.216		6.665	876.64	
20	34940		6050.6		30.022		6.738	898.02	

Abbildung 3.26: Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstantion und Eigeninstallion bei erhöhtem Strombedarf, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Tabelle

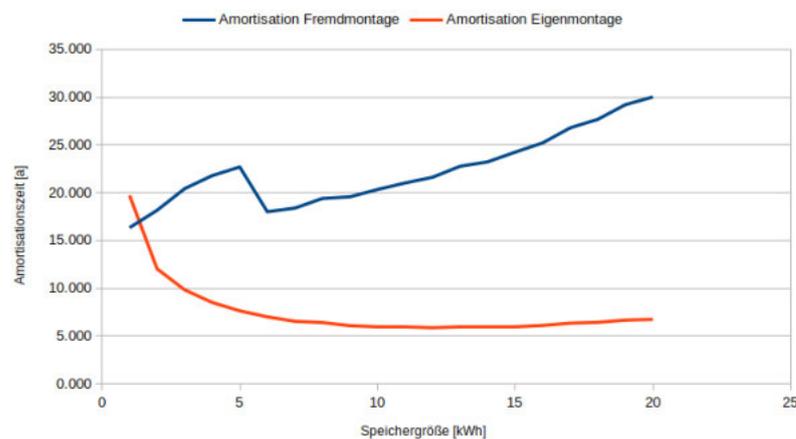


Abbildung 3.27: Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstantion und Eigeninstallion bei erhöhtem Strombedarf, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Graph

Da es sich hier um einen größeren Strombedarf und eine größere Photovoltaikanlage handelt, wurden in dieser Betrachtung Speicher bis zu einer Kapazität von 20 kWh betrachtet. Erst mit einem erhöhten Strombedarf und einer vollständigen Eigeninstallion der Nachhaltigkeit, konnte eine positive Wirtschaftlichkeit der Anlage festgestellt werden. Durch diese vielen Annahmen konnte bei Speichern größer 3 kWh eine Amortisationszeit kleiner zehn Jahre berechnet werden. Der optimale Speicher für dieses Szenario

hat eine Kapazität von 12 kWh.

### Zusammenfassung

Die Betrachtungen haben gezeigt, dass sich Nachhaltungen aus rein wirtschaftlicher Sicht zum jetzigen Zeitpunkt nicht lohnen. Durch einen steigenden Strompreis können Nachhaltungen jedoch wieder attraktiv werden. Erst als ein deutlich höherer Stromverbrauch und verminderte Investitionskosten durch eine vollständige Eigenmontage angenommen wurden, konnte eine wirtschaftliche Anlage berechnet werden. Sind diese Gegebenheiten nicht vorhanden ist eine Nachhaltigkeit nicht wirtschaftlich. Wird von der Wirtschaftlichkeit der Anlage abgesehen, bringt eine Nachhaltigkeit durchaus einige Vorteile mit sich. Durch sie wird der Eigenverbrauch der Photovoltaikanlage sowie der Autarkiegrad des Stromverbrauches erhöht. Dadurch ist der Nutzer der Anlage unabhängiger vom öffentlichen Stromnetz und den Schwankungen des Energiepreises.

### 3.2.3 Anbindung an Gebäudeautomation

Durch eine Anbindung der Nachhaltigkeit an eine Gebäudeautomation kann zum Einen ein Monitoring der Anlage durchgeführt werden, zum Anderen können über diesen Weg zeitunkritische Verbraucher wie zum Beispiel Waschmaschine, Wäschetrockner oder wenn vorhanden eine Wärmepumpe abgestimmt zu- oder abgeschaltet werden. Über Wettervorhersagen und daraus folgende Ertragsprognosen, kann die über den Tag zur Verfügung stehende Energie durch eine Gebäudeautomation im Vorfeld abgeschätzt und optimal verteilt werden.

Da das BMS alle Parameter des Speichers überwacht, laufen hier alle Informationen zusammen. Daher wird an dieser Stelle die Brücke zwischen Batteriespeicher und Automatisierung geschlagen. In der Regel besitzen alle BMS eine serielle Schnittstelle, über die Informationen geteilt werden können. Diese können, falls es die Kompatibilität zulässt, direkt an den Wechselrichter oder an eine externe Steuereinheit angeschlossen werden. Zusätzlich stellen manche Hersteller App- oder Webbasierte Monitoringprogramme für ihre BMS zur Verfügung. Damit lassen sich alle Parameter überwachen und gewisse Einstellungen am BMS vornehmen.

## 3.3 Wechselrichter

Sowohl Photovoltaikanlage als auch Batteriespeicher arbeiten mit Gleichstrom. Das öffentliche und private Stromnetz ist hingegen als Wechselstromnetz ausgeführt. Um die als Gleichstrom erzeugte oder gespeicherte Energie im Wechselstromnetz verfügbar zu machen, muss diese vorher von einem Wechselrichter umgewandelt und transformiert werden. Der Wechselrichter bildet demnach den Zugangspunkt der gesamten Anlage zum hauseigenen und öffentlichen Stromnetz. Alle Bestimmungen, welche die Ausgangsleistung einer Photovoltaikanlage betreffen, beziehen sich immer auf die maximale Ausgangsleistung des Wechselrichters.

Neben der Nutzbarmachung der Energie erfüllt der Wechselrichter noch weitere Aufgaben, wie das Überwachen und Steuern der Photovoltaikanlage. Photovoltaikwechselrichter sind mit einem Maximum-Power-Point Regler, kurz MPP-Regler, ausgerüstet.

Dieser passt die Spannung der angeschlossenen Module so an, dass eine optimale Energieausbeute entsteht. In einem AC-gekoppelten Speichersystem eingesetzte Wechselrichter, auch Batteriewechselrichter genannt, besitzen einen MPP-Laderegler. Dieser unterscheidet sich von einem Photovoltaik MPP-Regler unter anderem in der Ausgangsspannung und Leistung. Photovoltaik- und Batteriewechselrichter sind daher nicht austauschbar.

### 3.3.1 Bauart

Wechselrichter für Photovoltaikanlagen und Batteriespeicher in privaten Haushalten können grundsätzlich in zwei verschiedene Kategorien unterschieden werden: einphasig einspeisende und dreiphasig einspeisende Wechselrichter. Dreiphasige Wechselrichter sind aufwendiger in ihrem Aufbau und daher meist teurer als ihre einphasigen counterparts. Jedoch legte die VDE-AR-N 4105:2018-11 fest, dass eine maximale Schieflast von 4,6 KVA bei der Einspeisung nicht überschritten werden darf. Das bedeutet, dass einphasige Wechselrichter mit einer Ausgangsleistung größer 4,6 kVA nicht alleine betrieben werden dürfen. Werden drei einphasige und untereinander gekoppelte Wechselrichter betrieben, können diese die Leistungsgrenze überschreiten.

Für DC-gekoppelte Speichersysteme bieten manche Hersteller so genannte Hybridgeräte an. Diese verbinden die Aufgaben des Photovoltaikwechselrichters mit einem Laderegler. An diese Hybridgeräte kann sowohl eine Photovoltaikanlage, als auch ein Batteriespeicher angeschlossen werden. Außerdem sind meistens schon Steuerungen für den Batterieladeregler integriert, welche Laden und Entladen abhängig von der vorhandenen Photovoltaikleistung selbstständig regeln.

Für AC-gekoppelte Speichersysteme kommen Batteriewechselrichter zum Einsatz. Diese unterscheiden sich von Photovoltaik- und Hybridwechselrichtern da diese Energie sowohl aus dem Netz entnehmen als auch in das Netz einspeisen können. Außerdem ist die Spannungsebene auf der Gleichstromseite der Batterie angepasst. Für den Betrieb eines AC-gekoppelten Speichers kann demnach kein Photovoltaikwechselrichter verwendet werden.

Hybrid- und Batteriewechselrichter können zudem als Notstromversorgung genutzt werden. Hier ist darauf zu achten, dass nicht alle Modelle diese Funktion unterstützen. Bei der Notstromfunktion kann der Wechselrichter das Hausnetz aus der Photovoltaikanlage oder der Batterie speisen. So können elektrische Geräte auch im Falle eines Ausfalls der öffentlichen Stromversorgung weiter betrieben werden. Durch diese Funktion wird nur die Versorgungssicherheit verbessert. Die Wirtschaftlichkeit wird durch die höheren Investitionskosten negativ beeinflusst.

Tabelle 3.5: geschätzte Investitionskosten für Wechselrichter nach Marktrecherche

Kategorie	Preis
Einphasig bis 5kVA	500€ - 1.000€
Dreiphasig >5kVA	1.500€ - 2.500€
Hybridwechselrichter	10% Aufpreis

Die Investitionskosten für einen Wechselrichter schwanken sehr stark abhängig vom

Hersteller, ihrer Ausgangsleistung und weiteren Faktoren. Ein genereller Preis pro kVA Ausgangsleistung kann daher nicht festgelegt werden. Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen werden Investitionskosten wie in Tabelle 3.5 angenommen.

### 3.3.2 Kompatibilität zu Herstellerfremden Speichern

Bei der Kombination zwischen einem Batterie- oder Hybridwechselrichter mit einem Speicher muss auf die Kompatibilität zwischen beiden geachtet werden. Generell gilt, dass für Hochvolt-Speicher andere Wechselrichter benötigt werden als für Niedervolt-Speicher. Ob ein Wechselrichter mit einem Batteriespeicher kompatibel ist, wird in der Regel vom Hersteller angegeben. Stammen sowohl Wechselrichter als auch Batteriespeicher vom gleichen Hersteller, sind diese in der Regel auch kompatibel.

Tabelle 3.6: Kompatibilität zwischen führenden Wechselrichter Herstellern und Batteriespeicher Herstellern

Wechselrichter Hersteller	kompatible Batteriehersteller
SMA	alle führenden Batteriespeicherhersteller
Fronius	BYD
SolarEdge	BYD und LG Chem
Kostal	BYD und BMZ

### 3.3.3 Dimensionierung

Die Dimension des Wechselrichters wird durch dessen Ausgangsleistung und die Anzahl der eingespeisten Phasen bestimmt. Im Normalfall sollte die Ausgangsleistung des Wechselrichters mindestens so groß sein wie die Maximalleistung der Photovoltaikanlage. Ist dies nicht der Fall, wird der Ertrag der Photovoltaikanlage gemindert. Eine Überdimensionierung des Wechselrichters ist wiederum auch nicht empfehlenswert, da dadurch zum Einen unnötige Kosten entstehen und zum Anderen der Wirkungsgrad des Wechselrichters bei geringer Erzeugung absinkt.

Wechselrichter mit einer Ausgangsleistung von mehr als 4,6 KVA müssen dreiphasig ausgeführt werden. Bei kleineren Anlagen bis 4,6 KVA Ausgangsleistung können einphasige Wechselrichter zum Einsatz kommen. Aus wirtschaftlicher Sicht sind einphasige Wechselrichter durch ihre geringeren Investitionskosten immer zu bevorzugen.

Für Batteriewechselrichter gelten die gleiche Einspeisebestimmungen wie für Photovoltaikwechselrichter. Auch diese dürfen nicht mehr als 4,6 kVA einphasig einspeisen. Zudem sollte die Ausgangsleistung des Wechselrichters nicht über der maximalen Leistungsabgabe des Speichers liegen.

Je nachdem wofür der Batteriewechselrichter eingesetzt wird, kann die maximale Leistungsabgabe auch unterhalb der maximalen Leistungsabgabe des Batteriespeichers liegen. Soll der Speicher nur den Eigenbedarfsanteil verbessern, so kann die maximale Lade- und Entladeleistung grob abgeschätzt werden. In diesem Fall soll die Anlage in

der Lage sein, den Speicher über die erste Tageshälfte vollständig zu laden und über die zweite Tageshälfte vollständig zu entladen.

$$P_{Lmax} = P_{Emax} = \frac{C_{Speicher}}{12h}$$

mit  $P_{Lmax}$  = maximale Ladeleistung und  $P_{Emax}$  = maximale Entladeleistung.

Diese Annahme ist nur ein grober Schätzwert und sollte für jeden Anwendungsfall neu bestimmt werden.

### 3.3.4 Anbindung an die Gebäudeautomation

Beim Wechselrichter laufen alle Informationen der Anlage zusammen und er übernimmt alle Steuer und Regelaufgaben. Daher ist es nur logisch, die Gebäudeautomation hier anzuknüpfen. Wechselrichter bieten zu diesem Zweck eine Vielzahl unterschiedlichster Kommunikationsschnittstellen. Viele Hersteller bieten eigene Geräte an, um ihre Wechselrichter mit einer Automation zu verbinden. Zudem wird eine Vielzahl von App- und Webanwendungen zur Verfügung gestellt, um die vom Monitoring gesammelten Daten darzustellen. Einige Wechselrichter besitzen ein integriertes Monitoring, auf welches direkt mit besagten App- oder Webanwendungen zugegriffen werden kann.

Viktron stellt ein kostenfreies open Source Betriebssystem für Raspberry Pi zur Verfügung, welches zur Kommunikation mit allen Wechselrichtern aus ihrem Haus eingesetzt werden kann. Ursprünglich wurde das Betriebssystem für die Victron GX Produktreihe, welche Monitoring Produkte ihrerseits beinhaltet, entwickelt. Später wurde ein Ableger für unter anderem dem Raspberry Pi geschaffen und frei zur Verfügung gestellt. Mithilfe dieses Betriebssystems kann sehr einfach und schnell ein Monitoring der Anlage erstellt werden. Zusätzlich dazu wurden in der Community viele Zusatzprogramme entwickelt, welche das Funktionsspektrum des Betriebssystems erweitern und die Kompatibilität zu mehreren Geräten ermöglicht. So kann zum Beispiel auch das BMS über die serielle Schnittstelle an den Raspberry Pi angeschlossen und ausgelesen werden.

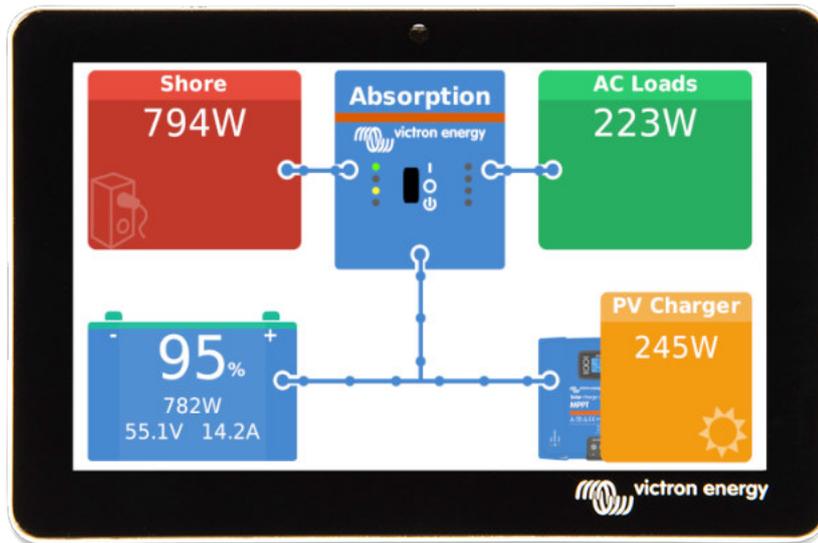


Abbildung 3.28: Voreingestelltes Nutzerinterface beim Venus OS Quelle: [https://www.victronenergy.com/blog/wp-content/uploads/sites/10/2020/01/GX-Touch\\_123434913-newmppt\\_156631612.png](https://www.victronenergy.com/blog/wp-content/uploads/sites/10/2020/01/GX-Touch_123434913-newmppt_156631612.png)

Mit diesem Betriebssystem kann im Baukastenprinzip ein eigenes Nutzerinterface erstellt werden um alle wichtigen Informationen anzuzeigen. Dieses wird auf einem, am Raspberry Pi angeschlossenen, Bildschirm dargestellt. Über dieses Interface können auch Befehle an Wechselrichter und, falls angeschlossen, BMS übermittelt werden.

Wechselrichter von Fronius sind in der Regel mit einem Monitoring ausgestattet oder können einfach mit einem nachgerüstet werden. Der Wechselrichter wird über eine Wifi Schnittstelle mit dem Netzwerk verbunden und sammelt auf diesem Weg auch weitere Daten von, zum Beispiel, Smartmetern. Jedoch können nur Fronius Smartmeter auf diesem Weg mit dem Wechselrichter kommunizieren. Die Daten können über eine eigene Webanwendung angezeigt werden. Fronius hat in ihren Produkten auch offene Hard- und Softwareschnittstellen zur Anbindung an Drittanbieter Systemen geschaffen. So können Daten über Modbus oder kabellos über das Fronius Solar API ausgelesen werden. Über diese Schnittstellen können die Daten zum Beispiel an eine HOMATIC Automation übertragen werden.

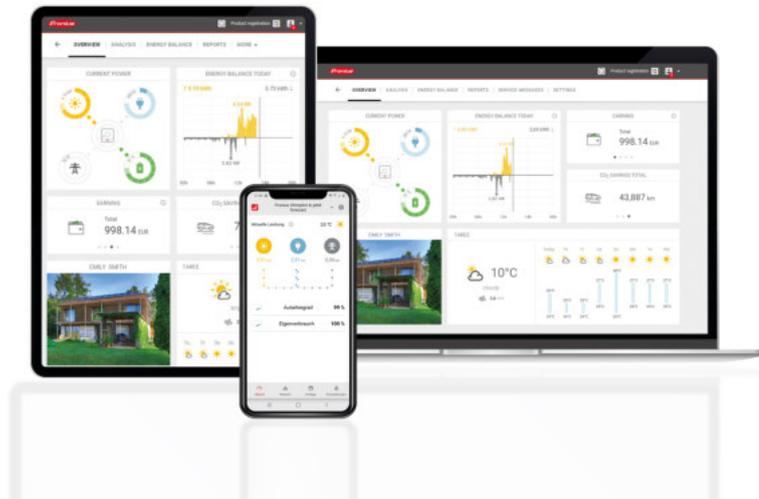


Abbildung 3.29: Fronius eigenes Monitoring für Hauseigene Produkte Quelle: <https://www.fronius.com/protected-media/international/se/press/solarweb-devices-169.jpg>

Auch bei Wechselrichtern der Marke SMA, SolarEdge und Kostal Solar ist ein Monitoring integriert. Genau wie die Produkte von Fronius können die Wechselrichter über Wifi mit dem Netzwerk verbunden und über eine Webanwendung ausgelesen werden. Im Gegensatz zu Fronius bieten diese Hersteller nur eine Modbuschnittstelle zur Anbindung an Drittanbieter Systemen an.

Zudem können Wechselrichter fast aller Marken mit *Solaranzeige* überwacht werden. Bei *Solaranzeige* handelt es sich um ein open-Source Betriebssystem für den Raspberry Pi. Er wird in der Regel über eine Modbus Schnittstelle mit dem Wechselrichter verbunden um anschließend Daten auszulesen oder Befehle zu senden. Die Daten werden auf dem Raspberry Pi in einer InfluxDB Datenbank gespeichert und mit Grafana visualisiert. Beides sind freie, open-Source Lösungen für ihren Bereich. *Solaranzeige* kann durch Erweiterungen mit zusätzlichen Funktionen und Kompatibilitäten zu weiteren Geräten, wie einem BMS, optimiert werden. Zusätzlich steht eine MQTT Schnittstelle zur Anbindung an eine übergeordnete Automatisierung bereit.

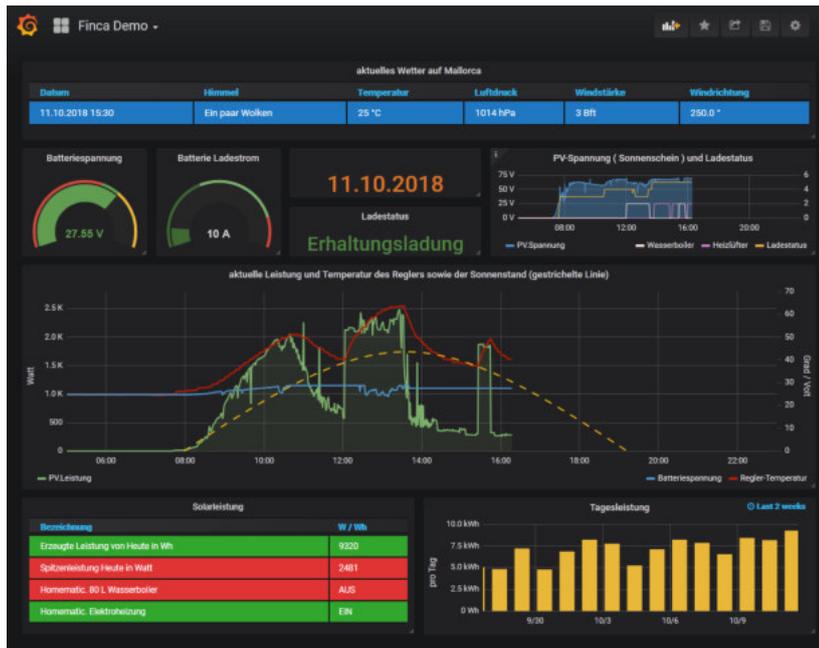


Abbildung 3.30: Voreingestelltes Nutzerinterface der Solaranzeige Quelle: <https://solaranzeige.de/wordpress/wp-content/uploads/2018/10/Victron-Solarregler.png>

Herstellerfreie Smart Home Software, wie die in Abschnitt 2.3.4 genannten IOBroker, openHAB und Home Assistant, bringen eigene Erweiterungen zur Anbindung eines Wechselrichters. Alle drei unterstützen die gängigsten Hersteller und Modelle. Ist bereits eines dieser Smart Home Systeme im Einsatz, kann ein neuer Wechselrichter, falls eine passende Erweiterung vorhanden ist, problemlos in das bestehende System integriert werden.

## Kapitel 4: Einbringung der Photovoltaikenergie in den Heizkreislauf

---

Die in den vorhergegangenen Abschnitten gezeigten Lösungen zielen alle darauf ab die im Modellhaus verwendete elektrische Energie zu kompensieren. Jedoch stellt diese nur einen kleinen Teil der insgesamt verbrauchten Energie dar. Aus Tabelle 1.1 geht hervor, dass der jährliche Heizwärmebedarf mit 22.000 kWh deutlich größer als der jährliche Strombedarf mit 4.500 kWh ist. Werden nun Möglichkeiten geschaffen um die erzeugte Energie ebenso zur Deckung des Heizwärmebedarfs einzusetzen, kann dadurch der Eigenverbrauchsanteil und die Autarkie des Gebäudes weiter erhöht werden.

### 4.1 Heizpatrone

Die einfachste und schnellste Möglichkeit um die erzeugte elektrische Energie in den Heizkreislauf einzubringen ist eine Heizpatrone, auch Heizstab genannt. Diese wird zur Unterstützung der konventionellen Heizung in den Warmwasserspeicher eingesetzt. Besteht keine Möglichkeit um eine Heizpatrone zu integrieren, kann äquivalent auch ein Durchlauferhitzer zum Einsatz kommen.

Ziel ist es, überschüssige Photovoltaikenergie als Wärme zu speichern und dem Heizkreislauf zur Verfügung zu stellen. Es kann davon ausgegangen werden, dass die so eingebrachte Energie den gleichen Betrag an konventioneller Energie kompensiert. Diese Einsparungen sind finanziell deutlich geringer als jene beim Bezug aus dem öffentlichen Stromnetz. Daher sollten nur Überschüsse, welcher andernfalls in das öffentliche Netz gegen eine geringe Vergütung eingespeist würden, für diese Methode verwendet werden. Damit überhaupt ein wirtschaftlicher Vorteil durch diese Erweiterung entstehen kann, muss der Preis für den konventionellen Energieträger höher als die Einspeisevergütung für Eigenverbraucher sein.

Neben der Erhöhung des Eigenverbrauchsanteil kann eine Heizpatrone als generelle Unterstützung der Heizungsanlage verwendet werden.



Abbildung 4.1: Heizpatrone in einem Pufferspeicher Quelle: <https://www.enbw.com/blog/energiewende/solarenergie/heizen-mit-photovoltaik-und-heizstab-so-funktioniert/>

### 4.1.1 Wirtschaftlichkeit

Die Investitionskosten sind von der Leistungsaufnahme und der verwendeten Steuerung abhängig. Kleine Systeme ohne Steuerung können für weniger als 100€ erworben werden. Für Systeme mit mehr Leistung und aufwendiger Steuerung können sich die Investitionskosten auf über 2.000€ ausweiten.

Aus Berichten des Statistischen Bundesamtes kann der aktuell in Deutschland durchschnittliche Gaspreis für Haushalte mit  $6,83 \frac{ct}{kWh}$  und der aktuell durchschnittliche Heizölpreis mit  $123,90 \frac{€}{hl}$ , beziehungsweise  $11,69 \frac{ct}{kWh}$  entnommen werden (Stab) (Stac).

Tabelle 4.1: Preise Konventioneller Energieträger

Energieträger	Preis
Erdgas	$6,83 \frac{ct}{kWh}$
Heizöl	$11,69 \frac{ct}{kWh}$
Einspeisevergütung Eigenverbraucher	$8,2 \frac{ct}{kWh}$

Bei einer gasbasierten Heizungsanlage kann eine Heizpatrone durch den aktuellen Gaspreis nicht wirtschaftlich betrieben werden.

Bei einer Ölheizung hingegen kann eine Heizpatrone durchaus wirtschaftlich sein. Um auch nur grob abschätzen zu können wie viel Photovoltaikenergie die Heizpatrone in einem bestimmten Zeitraum tatsächlich in den Heizkreislauf einbringen kann, ist ein Praxistest oder eine detaillierte Simulation notwendig. Beides kann im Zuge dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Aus diesem Grund kann die Frage einer Wirtschaftlichkeit nicht abschließend beantwortet werden. Lediglich kann die erforderliche Energiemenge zur Amortisation mit Formel 4.1 ermittelt werden.

$$A_E = \frac{I}{P_{konv} - V_E} \quad (4.1)$$

mit  $A_E$  = Amortisierung nach Energiemenge,  $I$  = Investitionskosten,  $P_{konv}$  = Preis des Konventionellen Energieträgers pro kWh,  $V_E$  = Einspeisevergütung für Eigenverbraucher.

Für eine Beispielrechnung werden Investitionskosten von 200€ für einen selbst installierten Heizstab angenommen. Für den genannten Heizölpreis ergibt sich damit eine Energiemenge von 57,3 kWh. Sobald die eingesetzte Heizpatrone diese 57,3 kWh überschüssige Photovoltaikenergie in den Heizkreislauf eingebracht hat, wurden die Investitionskosten amortisiert. Bei einem Heizwärmebedarf von  $22.000 \frac{kWh}{a}$  sollte dieser Wert einfach erreicht werden.

#### 4.1.2 Steuerung über eine Automation

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung hat gezeigt, dass eine Heizpatrone nur dann Gewinne erzielt, wenn überschüssige Photovoltaikenergie eingesetzt werden kann. Daher ist eine Steuerung nötig um die Leistungsaufnahme der Heizpatrone dem Angebot an Energieüberschuss anzupassen.

Hierfür können entweder vorgefertigte Lösungen verschiedener Hersteller, allen voran MyPV, zum Einsatz kommen, oder eigene Steuerungen entworfen werden.

Vorgefertigte Steuerungen können als Plug & Play Lösungen angesehen werden. Hier muss lediglich der Heizstab installiert und mit einer Steuereinheit oder einem Energiemeter verbunden werden. Bei ATON und My PV Elwa AC ist die Steuerung bereits in die Heizstäbe integriert. Diese müssen demnach nur mit dem passenden Energiemeter verbunden werden. Beide nutzen einphasige 3 kW Heizstäbe zur Wärmeerzeugung. Systeme wie ACThor oder Fronius Ohmpilot stellen eine Steuereinheit für kompatible Heizstäbe zur Verfügung. Diese umfassen auch dreiphasige Systeme mit einer Ausgangsleistung von bis zu 9 kW. Die Steuereinheiten werden entweder mit einem Energiemeter oder einer vorhandenen Gebäudeautomation mit Energiemanagementsystem verbunden.

Tabelle 4.2: Investitionskosten für vorgefertigte Steuerbare Heizstäbe

ATON	600€
Elwa AC	1.300€
ACThor	1.700€
Fronius Ohmpilot (ohne Heizstab)	1.700€

Im Gegensatz zu vorgefertigten Lösungen sind die Investitionskosten für selbst erstellte Steuerungen deutlich geringer. Als einfachste Integration kann ein beliebiger Heizstab über eine steuerbare Steckdose zu- und abgeschaltet werden, ein so genannter Zweipunktregler.

## Einbringung der Photovoltaikenergie in den Heizkreislauf

Soll die Leistung des Heizstabes abhängig vom Überschuss stufenlos geregelt werden, muss mehr Aufwand betrieben werden. Dazu muss der Heizstab mit einem Leistungssteller ausgestattet sein oder mit diesem nachgerüstet werden. Dieser wird über ein analoges Signal, meistens 0-10V gesteuert. Das Ausgangssignal kann entweder von einem speziellen analogen Aktor, welcher über einen Bus mit der zentralen Steuerung verbunden wird, oder durch die zentrale Steuerung selbst erzeugt werden.

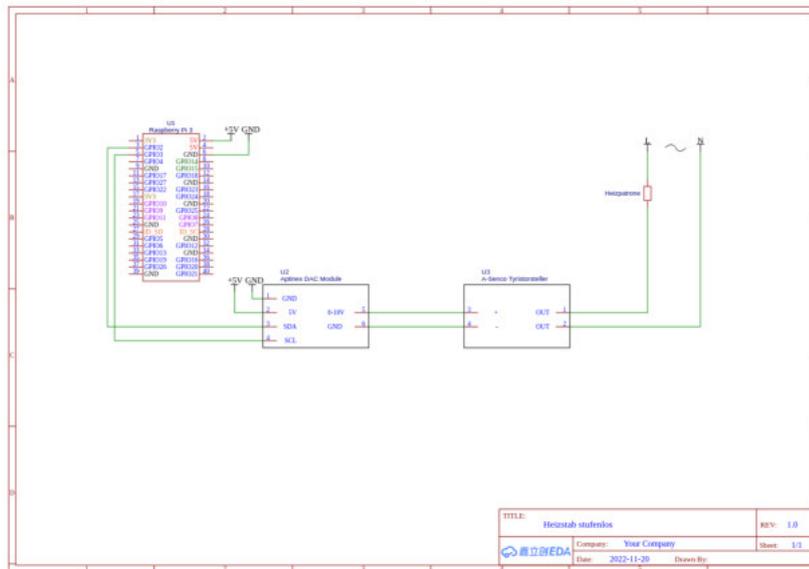


Abbildung 4.2: Schaltplan für einen stufenlos steuerbarer Heizstab (größere Abbildung in Anhang A)

Neben der deutlich aufwendigeren Installation müssen für den stufenlos regelbaren Heizstab auch höhere Investitionskosten in Kauf genommen werden. Wird angenommen, dass bereits eine zentrale Steuereinheit vorhanden ist, belaufen sich die Investitionskosten für den beschriebenen Zweipunktregler, je nach Leistungsabgabe des Heizstabes, auf 100€ bis 350€.

Für den stufenlos regelbaren Heizstab muss hingegen mit 350€ bis 550€ gerechnet werden.

Ist ein dreiphasiger Heizstab installiert, kann eine stufenweise Leistungsregelung des Heizstabes durch das getrennte Schalten der einzelnen Phasen erreicht werden. Diese stufenweise Regelung ist deutlich einfacher umzusetzen als eine stufenlose Regelung und meistens ausreichend um die Leistungsaufnahme des Heizstabes an den Überschuss der Photovoltaikanlage anzupassen. Auf diese Weise können auch Systeme mit bis zu sechs Leistungsstufen erstellt werden. Diese entstehen durch gezieltes Zu- und Abschalten verschieden dimensionierter Einzelphasen.

Tabelle 4.3: Leistungsstufen durch Zusammenschalten einzelner Phasen | Phase 1 = 500W, Phase 2 = 1.000 W und Phase 3 = 1.500 W:

Phase1	Phase 2	Phase 3	Leistungsaufnahme
			0W
x			500W
	x		1.000W
		x	1.500W
x		x	2.000W
	x	x	2.500W
x	x	x	3.000W

## 4.2 Brauchwasserwärmepumpe

Bei einer Brauchwasserwärmepumpe handelt es sich um eine Kombination aus einer kleinen Wärmepumpe und einem Pufferspeicher. Die Wärmepumpe ist direkt auf dem Pufferspeicher verbaut und bringt Wärmeenergie in ihn ein. Brauchwasserwärmepumpen profitieren durch die meist warme Umgebungsluft des Aufstellortes. Sie nutzen indirekt die Abwärme anderer Haushaltsgeräte und die Wärmeverluste der Heizung. Jedoch wird die Effizienz durch die hohe Zieltemperatur von 65°C verringert. Im Durchschnitt besitzen Brauchwasserwärmepumpen einen COP-Wert von 3. Je nach Leistung und Volumen des Pufferspeichers kann mit Investitionskosten von 1.500€ bis 2.500€ gerechnet werden.

Um eine Wirtschaftlichkeit abschätzen zu können muss zuerst der Energiebedarf für Brauchwasser beziffert werden. Dieser kann aus der monatlichen Aufschlüsselung des Heizwärembedarfs in Abbildung 1.2 abgelesen werden. Wird davon ausgegangen, dass in den Monaten Juli und August keine Energie für Raumwärme erbracht werden muss, kann dieser Bedarf mit dem Energiebedarf für Brauchwasser gleichgesetzt werden. Da sich der Energiebedarf für Brauchwasser saisonal nicht verändert, kann so der Jahresbedarf mit 4.200 kWh veranschlagt werden.

In der ersten Betrachtung wird eine Brauchwasserwärmepumpe isoliert von einer Photovoltaikanlage betrachtet. Die zugeführte Energie wird vollständig aus dem öffentlichen Netz bezogen.

$$A = \frac{I}{E \cdot \left( P_k - \frac{P_S}{COP} \right)} \quad (4.2)$$

mit  $A$  = Amortisationszeit,  $I$  = Investition,  $E$  = jährlicher Energiebedarf,  $P_k$  = Preis für konventionellen Energieträger und  $P_S$  = Strompreis

Für eine Erdgasheizung errechnet sich in diesem Beispiel eine negative Amortisationszeit. Die laufenden Kosten der Anlage übersteigen die Einnahmen und es kommt so nie zu einer Amortisation.

Wird eine Ölheizung betrachtet kann eine Amortisation nach rund 65 Jahren erwartet werden. Dieser Zeitraum übersteigt die erwartbare Lebensdauer von Brauchwasserwärmepumpen, welche von verschiedenen Herstellern mit 15 bis 20 Jahren angegeben wird, deutlich. Auch für dieses Szenario konnte keine Wirtschaftlichkeit festgestellt werden.

Das gezeigte Szenario tritt auch in Kraft, wenn eine Photovoltaikanlage vorhanden ist, diese jedoch nicht genug Energie produziert um den Strombedarf und den Bedarf der Brauchwasserwärmepumpe gleichzeitig zu decken. In beiden Fällen muss die zusätzliche Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen werden.

Die zweite Betrachtung setzt einen Überschuss aus einer Photovoltaikanlage voraus, welcher ohne das Vorhandensein der Brauchwasserwärmepumpe gegen Vergütung in das öffentliche Netz eingespeist werden würde.

$$A = \frac{I}{E \cdot (P_k - \frac{V_E}{COP})} \quad (4.3)$$

mit  $V_E$  = Einspeisevergütung

Es wird davon ausgegangen, dass die Brauchwasserwärmepumpe ausschließlich mit Überschuss aus einer Photovoltaikanlage betrieben werden kann. Für eine Erdgasheizung berechnet sich eine Amortisation nach 11,6 Jahren, für eine Ölheizung nach 5,3 Jahren. Die Annahme, dass die Brauchwasserwärmepumpe vollständig mit Überschuss aus einer Photovoltaikanlage betrieben werden kann, ist in der Realität schwer zu halten. Die Anlage müsste einen Autarkiegrad von 100% gewähren, was nur mit sehr großen Photovoltaikanlagen und Speichersystemen möglich ist.

Werden beide Formeln kombiniert, kann der Amortisationszeitraum bei einem Mix aus Überschuss und Netzstrom berechnet werden.

$$A = \frac{I}{E \cdot [P_k - \frac{1}{COP} \cdot (Ex_p \cdot V_E + (1 - Ex_p) \cdot P_S)]} \quad (4.4)$$

mit  $Ex_p$  = Prozentualer Anteil der Energieversorgung welcher aus Überschuss stammt

Für eine Anlage in einem Ölheizungssystem welche mit 60% Überschuss gespeist wird errechnet sich ein Amortisationszeitraum von 8,4 Jahren. Auch diese Anlage wird sich aller Voraussicht nach während ihrer Lebensdauer amortisieren und Gewinne erwirtschaften.

### 4.3 Luft/Luft Wärmepumpe

Die zuvor gezeigten Möglichkeiten zur Unterstützung des Heizungssystems mit Energie aus einer Photovoltaikanlage haben direkt in das Heizungssystem eingegriffen. Eine Luft-Luft Wärmepumpe wird unabhängig von der Heizungsanlage betrieben, wodurch das Heizungssystem nicht verändert werden muss.

Bei Neubauten werden sie oft zur Wärmerückgewinnung aus der Abluft eingesetzt. Dazu ist eine gewisse Luftdichtigkeit der Gebäudehülle notwendig um eine kontrollierte Wohnraumlüftung zu schaffen. Für Bestandsbauten ohne kontrollierte Lüftung stellen diese keine Alternative dar.

In diesem Abschnitt werden daher so genannte Klimasplitgeräte betrachtet. Sie bestehen aus einem Außen- und mindestens einem Innengerät. Ursprünglich wurden diese Geräte zur Kühlung der Raumluft entwickelt. Die entzogene Wärme wird nach Außen abgegeben. Jedoch kann der Prozess auch umgekehrt werden um Wärme der Umgebungsluft zu den Innenräumen zu pumpen.

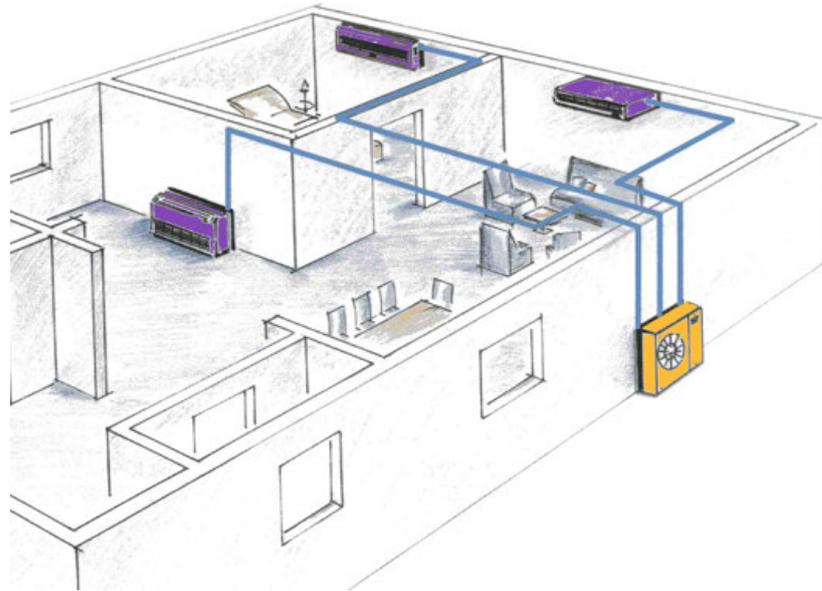


Abbildung 4.3: Skizze Aufbau eines Klimasplitgerätes Quelle: [https://www.novatherm.de/f5-edit/ups/www.novatherm.de/tb\\_artikel/bild/splitsystem3.jpg](https://www.novatherm.de/f5-edit/ups/www.novatherm.de/tb_artikel/bild/splitsystem3.jpg)

Je nach Hersteller und Modell können eines oder mehrere Innengeräte mit einem Außengerät betrieben werden. Bei einem Innengerät spricht man von Monosplit Geräten bei mehreren von Multisplit Geräten. Außen- und Innengeräte müssen mit evakuierten Kühlmittelleitungen verbunden werden. Die Installation eines Klimagerätes bedarf einiger Fachkenntnis und speziellem Werkzeug. Einerseits benötigen alle Teile der Anlage einen elektrischen Anschluss welcher nur von einer Elektrofachkraft vorgenommen werden darf. Außerdem müssen die Verbindungsleitungen nach der Montage evakuiert und mit Kühlmittel befüllt werden. Daher sollten Klimageräte von einem Fachmann montiert und in Betrieb genommen werden.

Die Innengeräte sind mit Elektrolüftungen ausgestattet um die Konvektion zu verbessern. Damit wird die klimatisierte Raumluft besser im Wohnraum verteilt. Jedoch entstehen durch sie störende Umgebungsgerausche und unangenehme Luftströmungen im Raum, Dadurch kann die Behaglichkeit der Wohnräume gemindert werden.

Um die Effektivität von Klimasplitgeräten besser einzuschätzen, können verschiedene Parameter zu Hilfe gezogen werden. Der SCOP Wert gibt den durchschnittlichen COP Wert bei Außentemperaturen von 12°C, 7°C, 2°C und -7°C an. Über diesen Wert kann abgeschätzt werden, wie effizient die Wärmepumpe auch bei niedrigeren Außentemperaturen arbeitet. Außerdem wird ein Temperaturbereich für den Betrieb der Wärmepumpe angegeben. In der Regel liegt dieser Arbeitsbereich für Klimasplitgeräten im Heizbetrieb zwischen -15°C und 20°C. Die Geräte sind zusätzlich mit Elektroheizungen ausgestattet, sodass sie auch bei niedrigeren Temperaturen außerhalb des Arbeitsbereiches Heizleistung erbringen können, jedoch ohne die energetischen Vorteile einer Wärmepumpe. Für Innen- und Außengeräte wird zudem ein maximaler Schalldruck-

pegel angegeben, über den die Lärmbelästigung abgeschätzt werden kann.

Für einfache Monosplitgeräte fallen Investitionskosten zwischen 300€ und 600€ an während für Multisplitgeräte je nach Anzahl der Innengeräte und Leistung 1.000€ bis 7.000€ investiert werden müssen.

Wie die Heizkörper bei einem wassergeführten Heizungssystem müssen die Innengeräte im Wohnraum verteilt platziert werden, um die Raumluft gleichmäßig zu klimatisieren. Dabei ist zu beachten, dass Wärme nur mithilfe der durch die eingesetzten Lüfter entstehende Konvektion verteilt werden kann. Investitionskosten für Anlagen mit ausreichenden Innengeräten um mehrere separate Wohnräume zu beheizen sind sehr hoch, sodass, falls ein wassergeführtes Heizsystem vorhanden ist, eher eine Luft/Wasser-Sole/Wasser oder Wasser/Wasser Wärmepumpe, wie im nächsten Abschnitt vorgestellt, zum Einsatz kommen sollte. Klimasplitgeräte eignen sich vor allen Dingen für Häuser mit wenigen zu klimatisierenden Räumen oder als Zusatz für einzelne Wohnräume mit erhöhtem Heizbedarf. Außerdem heizen sich kleine Gebäude im Sommer schneller auf und können daher zusätzlich von der Kühlung profitieren.

### 4.4 Luft/Wasser-, Sole/Wasser- und Wasser/Wasser Wärmepumpe

Luft/Wasser- Sole/Wasser- und Wasser/Wasser Wärmepumpen stellt die größte der hier gezeigten Investitionen dar. Alle drei erhitzen mit der erzeugten Wärmeenergie Wasser, welches anschließend im Heizkreislauf des Hauses zur Erwärmung der Raumluft oder als Brauchwasser verwendet werden kann. Sie unterscheiden sich im Ausgangsmedium, aus welchem sie mithilfe von elektrischer Energie Wärme pumpen.

Luft/Wasser Wärmepumpen stellen die einfachste und preiswerteste Form dar. Sie beziehen ihre benötigte Wärme aus der Umgebungsluft. Dadurch sind keine weiteren Arbeiten nötig um sie zu betreiben, jedoch ist ihr Wirkungsgrad von der Außentemperatur abhängig (siehe Abbildung 4.4).

Sole/Wasser Wärmepumpen, auch Erdwärmepumpe genannt, nutzen als Wärmereservoir die Geothermie. Durch tief ins Erdreich gebohrte Wärmesonden oder flach im Erdreich liegende Wärmekollektoren greifen sie auf diese zu. Um sie zu installieren sind aufwendige Bohrungen oder große Erdarbeiten nötig. Dafür sind sie nahezu unabhängig von der Außentemperatur und versprechen über das gesamte Jahr einen gleichbleibend hohen Wirkungsgrad.

Wasser/Wasser Wärmepumpen ziehen die benötigte Wärme aus vorhandenen Grundwasserreservoirs. Sie können nur eingesetzt werden, wenn entsprechende Grundwasservorkommen vorhanden sind und auch ihre Installation ist mit Erdbohrungen verbunden. Jedoch versprechen sie den höchsten Wirkungsgrad.

Beim Betrieb von Wärmepumpen sollte, wie im Abschnitt 2.5 aufgeführt, bedacht werden, dass hohe Zieltemperaturen den Wirkungsgrad schmälern. Daher ist es effizienter, wenn eine Heizung mit Wärmepumpe auf eine niedrige Vorlauftemperatur eingestellt wird. Um mit niedrigen Vorlauftemperaturen trotzdem ein angenehmes Raumklima zu schaffen werden Flächenheizungen in Boden oder Wänden notwendig. Um diese zu umgehen können vorhandene Konvektionsheizkörper mit so genannten Heizungsboostern ausgestattet werden. In Kapitel 7 wird der Aufbau eines Do-It-Yourself Heizungsboosters beschrieben. Dieser nutzt Gleichstrom Axiallüfter um die Konvektion an Heizkörpern zu erhöhen und die Wärmeabgabe auch bei niedrigen Vorlauftemperaturen zu er-

halten.

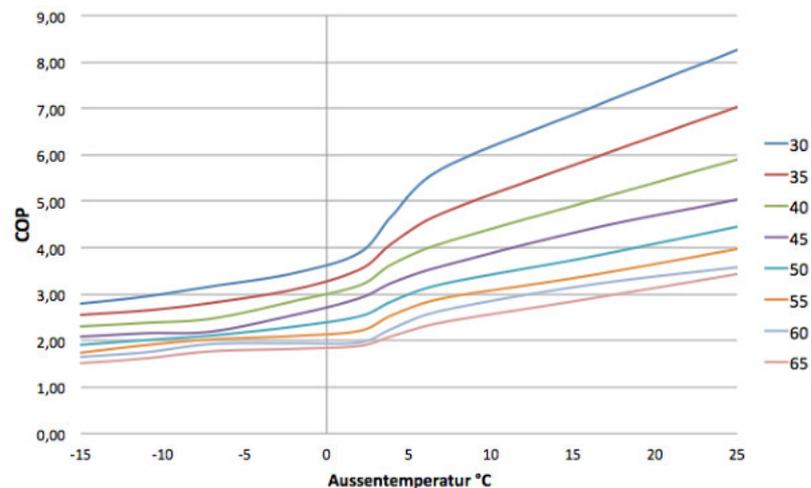


Abbildung 4.4: COP-Wert von Luft/Wasser Wärmepumpe in Abhängigkeit von Außentemperatur bei verschiedenen Vorlauftemperaturen Quelle: [http://heizkostenrechner.com/wp-content/uploads/2016/02/COP\\_vs\\_temp.png](http://heizkostenrechner.com/wp-content/uploads/2016/02/COP_vs_temp.png)

Wie gravierend der Einfluss der Vorlauftemperatur auf den Wirkungsgrad einer Wärmepumpe ist, kann in Abbildung 4.4 gesehen werden. Der gezeigte Zusammenhang basiert zwar auf Daten von Luft/Wasser Wärmepumpen, jedoch gelten diese ebenso für Sole/Wasser- und Wasser/Wasser Wärmepumpen. Durch die Anhebung der Vorlauftemperatur von 30°C auf 65°C wird der COP-Wert, und damit der Wirkungsgrad, fast halbiert. Demzufolge wird fast doppelt so viel elektrische Energie benötigt um die gleiche Wärmemenge zu erzeugen.

Die Robert Bosch GmbH, ein großer Hersteller für Wärmepumpen, gibt die aktuell notwendigen Investitionskosten für eine Umstellung auf eine Wärmepumpe mit 10.000€ bis 25.000€ an (Roba).

Tabelle 4.4: Investitionskosten für Wärmepumpen

Wärmepumpentyp	Investition
Luft/Wasser Wärmepumpe	10.000€ - 18.000€
Sole/Wasser Wärmepumpe	14.000€ - 25.000€
Wasser/Wasser Wärmepumpe	15.000€ - 22.000€

Durch die hohen Investitionskosten sollte ein Umstieg auf eine der in diesem Abschnitt gezeigten Wärmepumpen nur in Erwägung gezogen werden, wenn die vorhandene Heizungsanlage ihre maximale Lebensdauer erreicht hat und sowieso erneuert werden muss.



## Kapitel 5: Steuerung und Monitoring

Als letzter Baustein wird eine Gebäudeautomation benötigt, um zum Einen ein Monitoring aufzubauen und zum Anderen die Energieproduzenten und Verbraucher untereinander zu koppeln. Ein System zur Überwachung von Energieflüssen und Steuern von Verbrauchern, abhängig von der vorhandenen Energie, wird auch als Energiemanagementsystem oder kurz EMS bezeichnet. Ein Monitoring ist für alle Anlagen sinnvoll, eine Steuerung hingegen sollte nur für Eigenverbrauchsanlagen in Betracht gezogen werden. Durch diese Kopplung können Verbraucher dann zugeschaltet werden, wenn sie den besten Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit haben. So kann zum Beispiel die in Abschnitt 4.1 dargestellte Bedingung, dass die Heizpatrone nur mit Überschuss betrieben werden sollte, mit einer Steuerung realisiert werden. Zusätzlich können zeitunkritische Verbraucher, wie Waschmaschine oder Spülmaschine, dann zugeschaltet werden, wenn ein ausreichender Überschuss vorhanden ist. Dadurch wird der Eigenverbrauchswert und Autarkiewert erhöht und die Wirtschaftlichkeit verbessert. Um festzustellen ob die Installation aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll ist, muss, analog zur Nachhaltigkeit, die durch den erhöhten Eigenverbrauchsanteil eingesparte Energie gegen die entstehenden Investitionskosten aufgerechnet werden.

Durch ein Monitoring kann der Nutzer zu jeder Zeit die Ertragsdaten der Anlage einsehen. Wird das Monitoring ebenfalls auf die Verbraucherseite ausgeweitet, können beide Seiten gegenübergestellt betrachtet und aus diesen Informationen eventuelle Verbesserungen abgeleitet werden. Außerdem regen die gezeigten Verbrauchsdaten generell zum Energiesparen an.



Abbildung 5.1: Beispieldarstellung eines Photovoltaik Monitoring Dashboards Quelle: <https://solaranzeige.de/phpBB3/download/file.php?id=930&t=1>

Durch das Monitoring des Ertrages können dem Nutzer die durch die Anlage erwirtschafteten Gewinne sowie den durch Eigenverbrauch eingesparten Netzbezug schwarz auf weiß dargestellt werden. Diese Daten zeigen, ob die in der Vorplanung getroffenen Annahmen über mögliche Erzeugung, Gewinne und Amortisationszeiträume in der Realität wirklich zutreffen. Der Nutzer kann zum ersten Mal genau sehen wie effektiv die installierte Anlage ist. Ohne ein Monitoring kann nur schwer festgestellt werden wann sich eine Anlage wirklich amortisiert hat.

Um ein Monitoring aufzubauen sollten alle vorhandenen Daten an einem zentralen Punkt gesammelt und gespeichert werden um diese anschließend auszuwerten und sinnvoll darzustellen. Wie im Abschnitt 3.3.4 gezeigt integrieren die meisten Hersteller bereits ein Monitoring in ihren Produkten. Es ist vom Hersteller vorgegeben und kann nicht weiter angepasst werden. Außerdem ist es sehr schwierig auf die in diesem Monitoring gesammelten Daten für eine eigene Auswertung zuzugreifen.

Beschränkt sich die Automation nur auf ein Monitoring spricht nichts dagegen diese vorgefertigten Angebote zu nutzen. Sollen die Daten jedoch in einer übergeordneten Gebäudeautomation, oder einer Do-It-Yourself Steuerung verwendet werden, sollte ein unabhängiges Monitoring der Geräte aufgebaut werden.

Eine Steuerung ist im Grunde eine Erweiterung des Monitorings. Die gesammelten Daten werden automatisch ausgewertet und entsprechende Aktoren geschaltet. Soll nur eine Steuerung zum Einsatz kommen müssen nichtsdestotrotz die Daten gesammelt und gespeichert werden. Der Schritt hin zum vollständigen Monitoring ist nicht groß weshalb es in jedem Fall immer mit umgesetzt werden sollte.

Grundlegend sollen Verbraucher so geschaltet werden, dass diese mit der von der Photovoltaikanlage erzeugten Energie betrieben werden können. Die einfachste Lösung hierzu ist eine Zeitsteuerung welche die Verbraucher nacheinander in der Erzeugungsperiode der Photovoltaikanlage zuschaltet. Diese simple Integration kann den Eigenverbrauchsanteil schon steigern, jedoch wird nicht sichergestellt, dass die zur Verfügung stehende Energie optimal ausgenutzt wird. Daher schalten viele Energiemanagementsysteme die Verbraucher abhängig der vorhandenen Energie zu. Dazu ist ein Monitoring des Zugangspunktes zum öffentlichen Stromnetz erforderlich um die Menge der eingespeisten und somit überschüssigen Energie zu erfassen. Mithilfe dieser Information wählt die Steuerung die passenden Geräte aus um den vorhandenen Überschuss optimal selbst zu nutzen. Ist nicht genug Überschuss für alle steuerbaren Verbraucher vorhanden, stößt diese Steuerung an ihre Grenze. Für diesen Fall muss manuell festgelegt werden ab welchem Zeitpunkt die Verbraucher trotz fehlender Überschüsse zugeschaltet und mit Netzbezug betrieben werden sollen. Eine umfassende Automation zieht im Vorfeld vorhandene Erzeugungsdaten und Wetterprognosen heran, um die für den Tag vorhandene Energiemenge vorherzusagen. Anhand dieser Prognose wird eine optimale Verteilung der Verbraucher erstellt und der Eigenverbrauchsanteil wird maximiert.

Manche Hersteller von Wechselrichtern haben ihr vorinstalliertes Monitoring mit einer eigenen Steuerung erweitert. Zu beachten ist jedoch, dass zusätzlich nötige Sensoren, wie zum Beispiel Smart Meter, nicht frei gewählt werden können sondern vom gleichen oder einem kooperierenden Hersteller stammen müssen. Außerdem kann die integrierte Steuerung nicht nach den eigenen Wünschen angepasst werden.

Sind die Funktionen des integrierten EMS für den Nutzer ausreichend, die Investitionskosten für zusätzliche kompatible Sensoren nicht zu hoch und keine Erweiterung der Automation in Zukunft geplant, so sollte darauf zurückgegriffen werden. Trifft einer der Punkte nicht zu ist ein selbst erstelltes EMS sinnvoller.

### 5.1 Schlüsselfertiges Energiemanagementsystem

Neben den oben genannten integrierten Lösungen können auch selbstständige Energiemanagementsysteme im Haus installiert werden. In der Regel bestehen diese aus einer zentralen Steuereinheit und zugehörigen Sensoren und Aktoren. Bei schlüsselfertigen Systemen sind alle Geräte schon für den finalen Betrieb eingerichtet. Parameter können noch angepasst werden, um die Steuerung besser auf den vorliegenden Anwendungsfall anzupassen, jedoch sind alle Darstellungen und Steuerungen schon vorprogrammiert. Lediglich die Sensoren und Aktoren müssen in die jeweiligen Stromkreise integriert werden. Diese Systeme bieten ein fertiges EMS gegen minimalem Aufwand. Die nötigen Investitionskosten können nur schwer benannt werden, da diese sich zwischen den Anbietern stark unterscheiden. Außerdem sind die Investitionskosten auch von der Ausbaustufe des Systems abhängig. Sie können von einem einfachen Monitoring der Produktion und des Verbrauchs bis hin zu voll integrierten Systemen zur Steuerung aller großen Haushaltsgeräten sowie Elektroauto und Speicherung reichen.

Beachtet werden muss jedoch, dass Systeme unterschiedlicher Hersteller selten untereinander kompatibel sind. Wird ein EMS eines Herstellers ausgewählt muss dieses entweder für alle zukünftigen Bedürfnissen erweitert, oder, falls eine Erweiterung nicht möglich ist, vollständig gegen ein anderes ausgetauscht werden. Gerade bei umfangreichen Systemen ist dieser Schritt sehr aufwendig, da nicht nur die Steuerung, sondern alle nötigen Sensoren und Aktoren getauscht werden müssen.

### 5.2 Do-It-Yourself System

Eine Do-It-Yourself Automation sollte nur in Betracht gezogen werden, wenn gewisse Vorkenntnisse in Elektrotechnik und Automation vorhanden sind. Sie bringen viele unumstößliche Vorteile gegenüber vorgefertigten Systemen mit sich. So sind die Investitionskosten für die Hardware deutlich geringer und die Software frei verfügbar. Außerdem sind selbst entwickelte Steuerungen mit allen anderen freien Geräten kompatibel wodurch vorhandene Systeme ohne Probleme immer weiter erweitert werden können. Jedes System kann exakt auf den vorliegenden Anwendungsfall zugeschnitten und auf die Wünsche des Nutzers angepasst werden. Zudem ist der Nutzer auch im Betrieb in der Lage Veränderungen an Steuerung oder Monitoring vorzunehmen, falls sich Schwächen im laufenden Betrieb zeigen. Jederzeit hat der Nutzer die vollständige Kontrolle über alle Bestandteile der Automation. Dies gilt auch für die Datenspeicherung. Es kann genau festgelegt werden wo die Daten gespeichert, wie diese gesichert werden und wer darauf Zugriff hat.

In Kapitel 2 wurden bereits einige freie Hard- und Softwarekomponenten, die für ein Do-It-Yourself EMS zum Einsatz kommen könnten, vorgestellt.

Für alle Systeme bietet es sich an einem Raspberry Pi als zentrale Steuereinheit des Systems zu verwenden. Je nach geplantem Umfang der Steuerung kann auch auf ältere

Modelle mit weniger Rechenleistung zurückgegriffen werden. Für ein Monitoring und einfache Steuerungsaufgaben empfehlen sich IOBroker oder Home Assistant. Durch die vorhandenen Adapter lassen sich viele unterschiedliche Sensoren und Aktoren ohne weiteres verbinden. Die gespeicherten Daten können mit einem Grafana Webinterface dargestellt werden, jedoch bietet dieses Interface keine Möglichkeit zur Eingabe.

Steigt die Anzahl der Sensoren und Aktoren bietet OpenHAB mehr Vorteile. Es erleichtert die Übersicht bei vielen ähnlichen Sensoren und bringt ein voll konfigurierbares Interface mit. OpenHAB eignet sich ausgezeichnet als umfassendes Smart Home System in dem die Sensordaten über das Nutzerinterface ausgegeben und Befehle für die Aktoren eingegeben werden können. Das Anlegen von Steuerungen ist in OpenHAB aufwendig und bei größeren Steueraufgaben schnell unübersichtlich. Außerdem ist die Einrichtung des gesamten Systems deutlich aufwendiger als bei IOBroker oder Home Assistant. Sind im System viele vollautomatisierte Prozesse umzusetzen ist Node-Red der Favorit. Durch die Flow- und Nodearchitektur sind auch umfangreichere Steuerungen übersichtlich und einfach zu erstellen. Node-Red bringt eigene Werkzeuge zur Erstellung eines Nutzerinterface mit. Node-Red kann auch parallel zu einem der oben gezeigten Systeme zum Einsatz kommen. So können Monitoring und einfache Steueraufgaben über OpenHAB abgewickelt, während andere, umfassende Steuerungen mit Node-Red umgesetzt werden.

Bei allen genannten Systemaufbauten können verschiedenste Übertragungstechnologien verknüpft werden. Alle genannten Anwendungen bieten Adapter um eine Vielzahl gängiger Smart-Home Produkte, alle gängigen Wechselrichter und BMS, sowie Zigbee und MQTT anzubinden. Mit speziellen Steckdosenadaptern, so genannten Smart Plugs, können elektrische Verbraucher gesteuert und ihre Verbrauchsdaten aufgenommen werden. Für ein EMS können Verbraucher, falls diese selbst keine Netzwerkanbindung besitzen, trotzdem von der Automation gesteuert werden. Zudem können heute gängige intelligente Stromzähler ebenfalls in das EMS mit aufgenommen werden.

## Kapitel 6: Simulation für das Modellhaus

---

Zur Anschauung, welche Einflüsse die oben gezeigten Installationen von Photovoltaik, Nachhaltung und Heizungsunterstützung auf den Energieverbrauch des Modellhauses haben, werden nun verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Ausbaustufen erstellt und simuliert.

### 6.1 Simulationsparameter

Um eine optimale Grundlage für die simulierten Installationen zu schaffen werden die äußeren Einflüsse denen eines Frühlingstages nachempfunden. Dieser zeichnet sich durch niedrige Außentemperaturen und daraus folgend einem höheren Heizwärmebedarf, sowie einer schon ausreichenden Sonneneinstrahlung, um genügend Energie zu erzeugen, aus. Dadurch werden Effekte einzelner Installationen verstärkt und können besser erkannt werden.

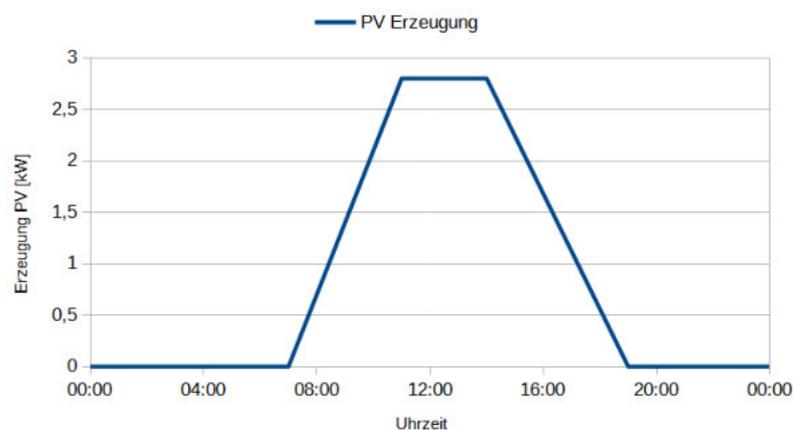


Abbildung 6.1: Angenommene Erzeugung der Photovoltaikanlage für die Simulation

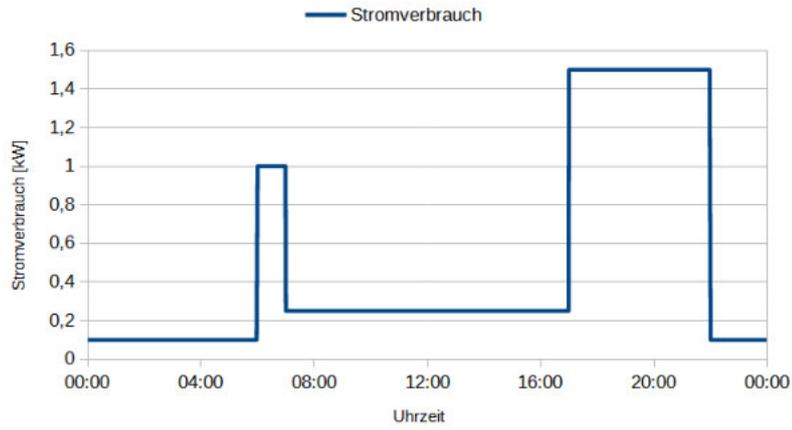


Abbildung 6.2: Angenommener Strombedarf für die Simulation

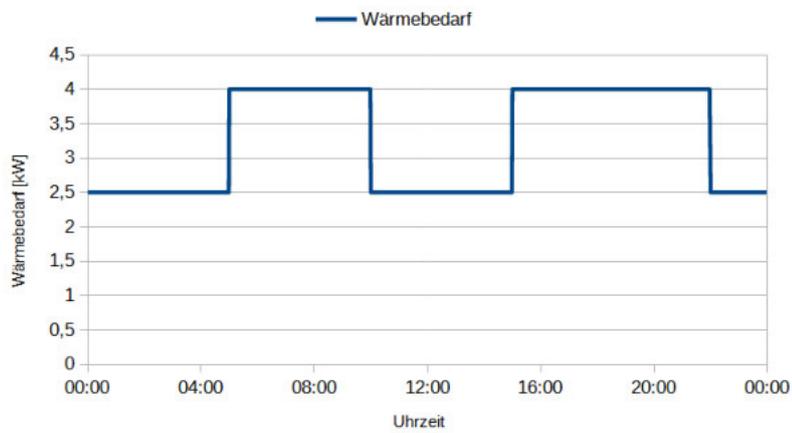


Abbildung 6.3: Angenommener Raumwärmebedarf für die Simulation

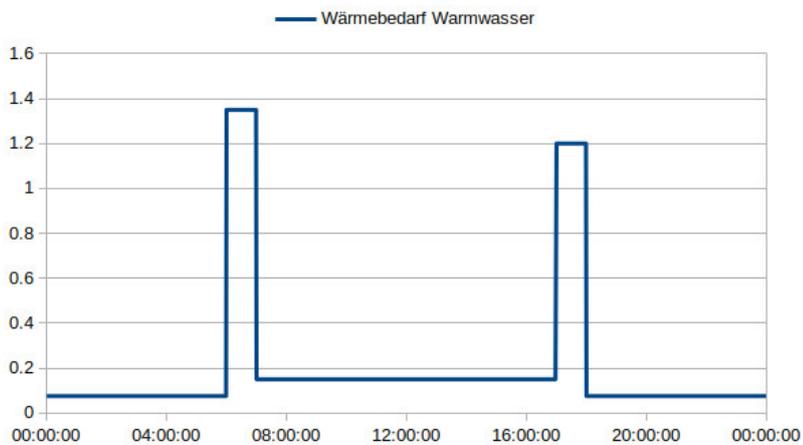


Abbildung 6.4: Angenommener Warmwasserwärmebedarf für die Simulation

Als Heizungsanlage wird eine Ölheizung mit einer Brennerleistung von 20kW angenommen. Hierfür wird ein Wirkungsgrad von 100% zugrunde gelegt. Zudem wird ein Puffer-

speicher mit einem Fassungsvermögen von 200l simuliert. Zu Beginn jeder Simulation wird eine Wassertemperatur von 80°C im Pufferspeicher angenommen. Für Nachhaltungen wird die maximale Lade- und Entladeleistung auf 1.500 W limitiert. Alle angenommenen Parameter beruhen auf Erfahrungswerten.

Tabelle 6.1: Allgemeine Simulationsparameter

Parameter	Wert
Brennerleistung	20 kW
Pufferspeichergröße	200l
Starttemperatur Pufferspeicher	80 °C
Maximale Lade und Entladeleistung des Speichers	1.500 W

Für das Modellhaus werden nun verschiedene Kombinationen aus Photovoltaik, Nachhaltigkeit und Heizungsunterstützung ausgelegt und durch eine Simulation validiert.

Tabelle 6.2: Parameter verschiedener Varianten

Nr	PV	Speicher	Heizungsunterstützung
1	0	0	0
2	3 kWp	0	0
3	3 kWp	0	Heizstab 1,5 kW Zweipunktregler
4	3 kWp	0	Heizstab 3 kW in 6 Stufen
5	3 kWp	0	Heizstab 3 kW Stufenlos
6	5 kWp	5 kWh	Heizstab 3 kW Stufenlos
7	9 kWp	9 kWh	Heizstab 3 kW Stufenlos
8	8 kWp	8 kWh	Luft / Luft Wärmepumpe
9	8 kWp	8 kWh	Luft / Luft Wärmepumpe und Heizstab 3kW Stufenlos
10	15 kWp	15 kWh	Luft / Luft Wärmepumpe und Heizstab 3kW Stufenlos
11	8 kWp	8 kWh	Luft / Luft Wärmepumpe und Brauchwasserwärmepumpe

Die verschiedenen Auslegungen werden anhand von Strombezug aus dem öffentlichen Netz, Stromeinspeisung, Ölverbrauch, Investitionskosten und entstandenen laufenden Kosten verglichen.

Monitoring und Steuerung wird von einem Raspberry Pi mit IOBroker übernommen. Die Sensoren und Aktoren werden durch eine selbst erstellte Software simuliert, welche über MQTT mit Raspberry Pi kommuniziert. Die Simulationsgeschwindigkeit ist um das 60-fache erhöht, daher stellt ein 24-minütiger Zeitraum Daten eines Tages dar. Die visuelle Darstellung der Daten wird mittels Grafana realisiert.

## 6.2 Durchführung

Größere Darstellungen aller Ergebnisse befinden sich in Anhang C.

### Variante 1

Zuerst wird das Modellhaus im Istzustand, ohne Photovoltaikanlage, Nachhaltung oder Heizungsunterstützung, simuliert. Diese Betrachtung kann als Basis für alle kommenden Betrachtungen herangezogen werden.



Abbildung 6.5: Simulationsergebnisse Variante 1

Ohne Photovoltaik muss der gesamte Strombedarf von 11,8 kWh aus dem öffentlichen Netz gedeckt werden. Außerdem ist die Ölheizung für 3 Stunden und 52 Minuten aktiv um die nötigen 78 kWh zu erzeugen. Dafür werden ca. 7,9l Heizöl verbraucht.

### Variante 2

Nun wird das Modellhaus mit einer Eigenverbrauchsphotovoltaikanlage ausgestattet. Aus den Betrachtungen in Abschnitt 3.1.3 geht hervor, dass eine Anlagengröße von 3 kWp die beste Wirtschaftlichkeit verspricht. In dieser, sowie allen nachfolgenden Varianten, wird von einer Fremdinstallation der Photovoltaikanlage ausgegangen und die Investitionskosten dementsprechend abgeschätzt.



Abbildung 6.6: Simulationsergebnisse Variante 2

### Variante 3

Hier wird die Installation aus Variante 2 mit einer Heizungsunterstützung erweitert. Durch diese soll überschüssige Energie der Photovoltaikanlage in den Heizkreislauf eingebracht werden, statt diese in das öffentliche Netz einzuspeisen. Für Variante 3 wird ein Heizstab mit einem Zweipunktregler ausgelegt. Damit dieser bei den vorgegebenen Parametern auch zum Einsatz kommen kann, wird ein Heizstab mit 1,5 kW ausgewählt. Im IOBroker wird eine Logik zur Steuerung des Heizstabes erstellt, welche periodisch ausgeführt wird. Die Wartezeit zwischen den Programmdurchläufen muss so gewählt werden, dass alle vorhandenen Messeinrichtungen in der Lage sind aktuelle Werte an die Steuerung zu übermitteln bevor ein erneuter Befehl an den Heizstab gesendet wird. Für den Simulationsaufbau hat sich im Versuch ein Intervall mit 5 Sekunden als optimal erwiesen.

- 
- 1: **if** Netzeinspeisung > 1,6 kW **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
  - 2:     Heizstab einschalten
  - 3: **else if** Netzeinspeisung <= 0 kW **OR** Speichertemperatur > Limit **then**
  - 4:     Heizstab ausschalten
  - 5: **end if**
- 



Abbildung 6.7: Simulationsergebnisse Variante 3

Mithilfe des Heizstabes können 6,5 kWh der überschüssigen Energie in den Heizkreislauf eingebracht werden und verringern dadurch die Laufzeit der Ölheizung. Der leicht gestiegene Netzbezug entsteht durch die Trägheit der Heizstabsteuerung. Da dieser Anstieg jedoch nur geringfügig ist, muss die Steuerung nicht optimiert werden. Durch die Unterdimensionierung des Heizstabes und seine suboptimale Ansteuerung sind die Einsparungen jedoch nur sehr gering und es bleiben noch ungenutzte Potentiale.

### Variante 4

Um das Potential der überschüssigen Energie besser nutzbar zu machen, wird in Variante 4 ein größer dimensionierter Heizstab mit 3 kW, regelbar in sechs Stufen, installiert. Die Steuerung wird so angepasst, um die Stufen, abhängig vom Überschuss, zu- oder abzuschalten.

- 1: **if** Netzeinspeisung > 0,6 kW **AND** Heizstabstufe < 6  
    **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
  - 2: Heizstabstufe erhöhen
  - 3: **else if** Netzeinspeisung <= 0 kW **AND** Heizungsstufe > 0  
    **OR** Speichertemperatur > Limit **then**
  - 4: Heizstabstufe verringern
  - 5: **end if**
- 



Abbildung 6.8: Simulationsergebnisse Variante 4

Durch den in Stufen regelbaren Heizstab kann fast doppelt so viel überschüssige Energie in den Heizkreislauf eingebracht werden. Da die Steuerung häufiger die Leistung des Heizstabes anpasst, fällt hier die Trägheit stärker ins Gewicht und der Netzbezug steigt wieder leicht an. Jedoch ist auch in diesem Fall der Anstieg nur unbedeutend und kann vernachlässigt werden.

### Variante 5

Um den vorhandenen Überschuss optimal nutzen zu können, kommt in Variante 5 ein stufenlos regelbarer Heizstab zum Einsatz. Für diesen wird ein Regler im IOBroker programmiert. Wie schon zuvor wird auch dieser Regler im Intervall von 5 Sekunden ausgeführt.

- 
- 1: Überschuss = Stromeinspeisung + momentane Heizstableistung - 0,1
  - 2: **if** Überschuss > 3 **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
  - 3: setze Heizleistung auf 3
  - 4: **else if** Überschuss > 0 **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
  - 5: setze Heizleistung auf Überschuss
  - 6: **else**
  - 7: setze Heizleistung auf 0
  - 8: **end if**
-



Abbildung 6.9: Simulationsergebnisse Variante 5

Durch den stufenlos regelbaren Heizstab kann nun fast die gesamte überschüssige Energie in den Heizkreislauf eingebracht werden. Da für die Photovoltaikleistung ein gradliniger Verlauf ohne große Schwankungen angenommen wird, fallen die Nachteile des in Stufen regelbaren Heizstabes weniger ins Gewicht und er kann ähnlich gute Ergebnisse wie ein stufenlos regelbarer Heizstab erzielen.

## Variante 6

Variante 6 zeigt eine Installation einer Photovoltaikanlage mit Nachhaltung und Heizungsunterstützung in Form eines stufenlos regelbaren 3 kW Heizstabes. Photovoltaikanlage und Nachhaltung werden anhand einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung neu ausgelegt. Die Investitionskosten für die Nachhaltung werden mit 1.747€ pro kWh angenommen.

/	Speicher										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	32.5	25.9	27.4	30.3	33.4	36.7	39.9	43.1	46.4	49.6	52.9
2	20.6	17.1	16.5	16.9	17.3	18.0	18.8	19.9	21.0	22.3	23.5
3	17.3	15.1	14.4	14.5	14.4	14.6	14.9	15.5	16.0	16.7	17.4
4	16.7	15.0	14.3	14.3	14.0	14.1	14.2	14.6	14.9	15.5	16.0
5	16.1	14.7	14.0	13.9	13.6	13.6	13.6	13.9	14.2	14.6	15.1
6	16.1	14.9	14.3	14.1	13.8	13.8	13.7	14.0	14.2	14.6	15.0
7	15.9	14.8	14.2	14.0	13.7	13.7	13.6	13.8	14.0	14.3	14.7
8	16.0	15.0	14.4	14.3	13.9	13.9	13.8	14.0	14.2	14.5	14.8
9	15.6	14.7	14.2	14.0	13.7	13.7	13.6	13.7	13.9	14.2	14.5
PV	10	15.7	14.9	14.4	14.2	13.9	13.8	14.0	14.1	14.3	14.6

Abbildung 6.10: Amortisierungszeiträume für Photovoltaik und Speicher für das Modellhaus

Abbildung 6.10 zeigt, dass mit der Kombination einer 5 kWp Photovoltaikanlage und einer Nachhaltung mit 5 kWh die beste Wirtschaftlichkeit erzielt werden kann.

Die im Speicher befindliche Energie soll nur für den elektrischen Energiebedarf des Modellhauses und nicht für die Heizungsunterstützung verwendet werden. Daher wird der Regler des stufenlos regelbaren Heizstabes wie folgt erweitert.

- 1: Überschuss = Stromeinspeisung + momentane Heizstableistung - 0,1
- 2: **if** Änderung Batterieladung < 0 **then**
- 3:     Überschuss = Überschuss + Änderung Batterieladung
- 4: **end if**
- 5: **if** Überschuss > 3 **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
- 6:     setzte Heizleistung auf 3
- 7: **else if** Überschuss > 0 **AND** Speichertemperatur < Limit **then**
- 8:     setzte Heizleistung auf Überschuss
- 9: **else**
- 10:     setzte Heizleistung auf 0
- 11: **end if**



Abbildung 6.11: Simulationsergebnisse Variante 6

Der Verlauf der Batterieladung (Unterer Graph, gelbe Kurve) zeigt, dass die Batterie noch vor Anbruch des neuen Tages entladen ist. Daher muss keine erneute Simulation mit einem Startwert der Batterieladung durchgeführt werden.

### Variante 7

Für Variante 7 wird überprüft, wie sich eine deutlich überdimensionierte Photovoltaikanlage und Nachhaltung auf die Simulation auswirken. Dazu wird eine Photovoltaikanlage mit 9 kWp und eine Nachhaltung mit 9 kWh vorgegeben. Anders als bei Variante 6 muss hier davon ausgegangen werden, dass die Batterie zu Beginn des Tages noch nicht vollständig entladen ist. Durch einen Simulationdurchlauf wird eine Initialladung von 3 kWh ermittelt und für die Simulation verwendet.



Abbildung 6.12: Simulationsergebnisse Variante 7

Durch die deutlich größere Nachhaltigkeit und Photovoltaikanlage tendiert der Bezug aus dem öffentlichen Netz gegen Null. Über den gesamten Tagesverlauf wird die Batterie nie vollständig entladen und versorgt somit immer das Modellhaus. Die Abweichung der Einspeisung vom Wert Null kann mit der Trägheit der Heizstabsteuerung erklärt werden.

### Variante 8

In Variante 8 wird das Modellhaus mit Luft/Luft Wärmepumpen ausgestattet, um die benötigte Raumwärme zu erzeugen. Für die Wärmepumpen wird ein COP Wert von 4 angenommen. Eine weitere Unterstützung durch eine Heizpatrone ist nicht vorgesehen. Die Luft/Luft Wärmepumpen sollen, wenn möglich, mit Energie aus der Photovoltaikanlage betrieben werden. Für die Warmwasseraufbereitung kommt die vorhandene Ölheizung zum Einsatz. Um die pro Jahr benötigten 16.000 kWh Raumwärmebedarf durch die Luft/Luft Wärmepumpen zu decken, wird der vorhandene elektrische Energiebedarf von 4.500 auf 8.500 erhöht. Auf diesen Bedarf ausgerichtet, werden Photovoltaikanlage und Nachhaltigkeit neu dimensioniert.

/	Speicher															
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	23.2	22.4	23.6	25.0	26.4	27.9	29.4	30.9	32.4	33.9	35.4	36.9	38.4	39.9	41.4	42.9
2	13.3	12.0	12.3	12.6	13.1	13.6	14.2	14.7	15.3	15.9	16.5	17.1	17.7	18.3	18.9	19.4
3	11.3	9.9	9.8	9.9	10.1	10.3	10.6	10.9	11.2	11.5	11.9	12.2	12.6	13.0	13.3	13.7
4	10.5	9.2	9.0	8.9	9.0	9.1	9.2	9.4	9.5	9.7	9.9	10.1	10.4	10.6	10.9	11.1
5	10.2	8.9	8.7	8.6	8.5	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.4	9.6	9.7
6	10.0	8.9	8.6	8.5	8.4	8.4	8.4	8.4	8.4	8.5	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0
7	10.0	8.9	8.7	8.5	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4	8.4	8.5	8.5	8.6
8	10.1	9.1	8.8	8.6	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.4
9	10.1	9.2	8.9	8.8	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
PV	10.3	9.4	9.1	8.9	8.8	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3
11	10.4	9.6	9.3	9.1	9.0	8.8	8.8	8.7	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4	8.4	8.4	8.3
12	10.6	9.8	9.5	9.3	9.1	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7	8.6	8.6	8.5	8.5	8.4	8.4
13	10.8	10.0	9.7	9.5	9.3	9.2	9.1	9.0	8.9	8.8	8.8	8.7	8.7	8.6	8.6	8.5
14	11.0	10.2	9.9	9.7	9.5	9.4	9.3	9.2	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.7	8.7	8.6
15	11.1	10.4	10.1	9.9	9.7	9.6	9.5	9.3	9.2	9.2	9.1	9.0	8.9	8.9	8.8	8.8

Abbildung 6.13: Amortisierungszeiträume für Photovoltaik und Speicher für das Modellhaus bei Variante 8

Die Abbildung zeigt einen großen Bereich mit nahezu gleichen Amortisationszeiträumen. Die Mitte des Bereichs liegt bei ca. 8 kWp Photovoltaik und 8 kWh Nachhaltigkeit weshalb diese Kombination als Parameter verwendet werden.

In dieser Simulation wird davon ausgegangen, dass sich die, von den Luft/Luft Wärmepumpen erzeugte, Wärme gleichmäßig in allen Wohnräumen verteilt, um so die Ölhei-

zung optimal zu unterstützen.



Abbildung 6.14: Simulationsergebnisse Variante 8

Zuerst fällt auf, dass die Ölheizung über den simulierten Tag nicht zugeschaltet wird. Der Warmwasserwärmebedarf kann demnach vollständig aus dem Pufferspeicher entnommen werden.

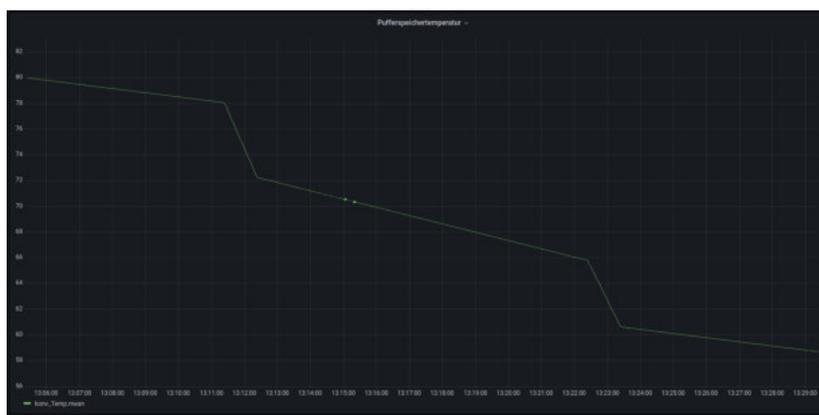


Abbildung 6.15: Temperaturverlauf Pufferspeicher Simulation Variante 8

Die Absenkung der Temperatur im Pufferspeicher beträgt 21 K, was einer Energiemenge von 5,6 kWh entspricht.

## Variante 9

Für Variante 9 wird die vorangegangene Simulation mit einem stufenlos regelbaren Heizstab ausgestattet um so auch den Warmwasserwärmebedarf mit selbst erzeugter Energie zu decken. Dadurch werden sowohl Eigenverbrauchsanteil als auch Autarkiegrad gesteigert.



Abbildung 6.16: Simulationsergebnisse Variante 9

### Variante 10

Für Variante 10 wird wie in Variante 7 eine deutlich überdimensionierte Photovoltaikanlage und Nachhaltung eingesetzt.



Abbildung 6.17: Simulationsergebnisse Variante 10

Durch die Überdimensionierung wird wie erwartet deutlich weniger Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen und deutlich mehr eingespeist. Die daraus entstehenden Einsparungen der laufenden Kosten fallen im Vergleich zu den enorm gestiegenen Investitionskosten jedoch eher gering aus. Durch die Begrenzung der Lade- und Entladeleistung muss streckenweise Energie aus dem öffentlichen Netz bezogen werden, obwohl der Speicher nicht entladen ist. Jedoch würde eine Kompensation dieser Energie durch eine erhöhte Entladeleistung keinesfalls die gestiegenen Investitionskosten aufwiegen.

### Variante 11

Für Variante 11 wird der vorhandene Heizstab gegen eine Brauchwasserwärmepumpe, mit einem angenommenen COP Wert von 3, ersetzt. Dadurch wird nur noch ein Drittel der elektrischen Energie zur Erzeugung des Warmwasserwärmebedarfs benötigt. Jedoch muss davon ausgegangen werden, dass Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen werden muss, falls keine selbst erzeugte Energie zur Verfügung steht.



Abbildung 6.18: Simulationsergebnisse Variante 11

Durch die Brauchwasserwärmepumpe sinkt der benötigte Energiebedarf für Warmwasser, jedoch muss ein Teil des dafür notwendigen Stroms aus dem öffentlichen Netz bezogen werden.

Der simulierte Tag verfügt über reichlich Sonneneinstrahlung und somit ausreichend selbst erzeugte Energie. Der verringerte Energiebedarf führt daher im Vergleich zu Variante 9 nur zu mehr Einspeisung. Diese kann die höheren Investitionskosten nicht aufwiegen. Mit Luft/Luft Wärmepumpen und Brauchwasserwärmepumpe kann der gesamte Wärmebedarf des Modellhauses mit Wärmepumpen und den damit einhergehenden hohen Wirkungsgraden erzeugt werden. Dadurch wird die Effizienz gesteigert und insgesamt ist weniger elektrische Energie nötig um den Heizwärmebedarf zu decken.

### 6.3 Auswertung

Tabelle 6.3 zeigt die Ergebnisse aller Simulationen. Zur besseren Vergleichbarkeit werden Investitionskosten und laufende Kosten des simulierten Tages berechnet und angegeben. Keine Variante weist übermäßig hohe Einsparungen bei niedrigen Investitionskosten auf, weshalb es keine *beste* Kombination der gezeigten Optionen gibt. Wie erwartet, führen höhere Investitionen zu größeren Einsparungen und mehr Autarkie. Zu beachten ist jedoch, dass der, den Simulationen zugrunde liegende Tag, optimal für die gezeigten Installationen ist. Dadurch kann viel Energie erzeugt und in den Heizkreislauf eingebracht werden. Bei weniger Sonneneinstrahlung oder geringeren Heizwärmebedarf fallen die Einsparungen deutlich kleiner aus.

Tabelle 6.3: Simulationsergebnisse Zusammenfassung

Nr	Strombezug	Einspeisung	Ölverbrauch	Investitionskosten	laufende Kosten
1	11,80 kWh	0	78 kWh $\approx$ 7,9 l	0	12,82 €
2	8,30 kWh	12,50 kWh	78 kWh $\approx$ 7,9 l	5.758 €	10,85 €
3	8,51 kWh	5,85 kWh	71,5 kWh $\approx$ 7,3 l	5.858 €	10,68 €
4	8,55 kWh	2,91 kWh	68,4 kWh $\approx$ 7 l	5.958 €	10,54 €
5	8,54 kWh	0,95 kWh	66,4 kWh $\approx$ 6,8 l	6.108 €	10,43 €
6	3,01 kWh	1,26 kWh	61,8 kWh $\approx$ 6,2 l	15.934 €	8,03 €
7	0,09 kWh	11,60 kWh	54,5 kWh $\approx$ 5,5 l	26.972 €	5,54 €
8	11,00 kWh	21,7 kWh	5,6 kWh $\approx$ 0,6 l	24.909 €	2,70 €
9	11,00 kWh	15,5 kWh	0 kWh	25.259 €	2,47 €
10	3,76 kWh	45,00 kWh	0 kWh	43.825 €	-1.50 €
11	12,10 kWh	12,10 kWh	0 kWh	26.909 €	2.51 €



## Kapitel 7: Heizungsbooster

---

Die Heizwärme wird in der Regel über Konvektionsheizkörper an die Raumluft abgegeben. Die erwärmte Raumluft steigt auf, zieht kalte Luft nach und erzeugt so eine Luftumwälzung im Raum. Geringere Vorlauftemperaturen behindern diesen Prozess und es wird nicht ausreichend Wärme an die Raumluft abgegeben um diese auf die gewünschte Temperatur aufzuheizen. Um dem entgegenzuwirken, kann der Heizkörper mit elektrischen Lüftern ausgestattet werden, welche die Luftumwälzung künstlich aufrecht erhalten. Diese Vorrichtung wird auch als Heizungsbooster bezeichnet. In einer Studie der Hochschule Mannheim aus dem Jahre 2019 wurde der Einfluss elektrischer Lüfter auf die Wärmeabgabe von Konvektionsheizkörpern untersucht. Die Studie stellt vor allen Dingen bei Heizungssystemen mit Wärmepumpen und daraus resultierend niedrigen Vorlauftemperaturen eine signifikante Verbesserung der Wärmeabgabe fest (EBW<sup>+</sup>).

### 7.1 Konzept

Da sich sowohl die Lüftergeräusche als auch zu starke Luftbewegung negativ auf das Wohlbefinden auswirken, muss die Drehzahl der Lüfter geregelt werden. Über Temperatursensoren wird die Temperaturdifferenz zwischen Heizkörper und Raumluft ermittelt um die Drehzahl dementsprechend anzupassen. Zusätzlich soll der Heizungsbooster über eine vorhandene Gebäudeautomation vom Nutzer steuerbar sein.

Als Lüfter kommen handelsübliche PC Lüfter zum Einsatz. Diese werden mit einem zusätzlichen Eingang zur Drehzahlregulierung angeboten. Durch ein 25 kHz pulsweitenmoduliertes Signal kann die Drehzahl stufenlos geregelt werden. Mittels eines ESP32 soll der Heizungsbooster gesteuert und an eine vorhandene Gebäudeautomation angebunden werden. Der ESP32 ist, im Gegensatz zum ESP8266, in der Lage PWM Signale bis zu einer Frequenz von 40 kHz zu erzeugen.

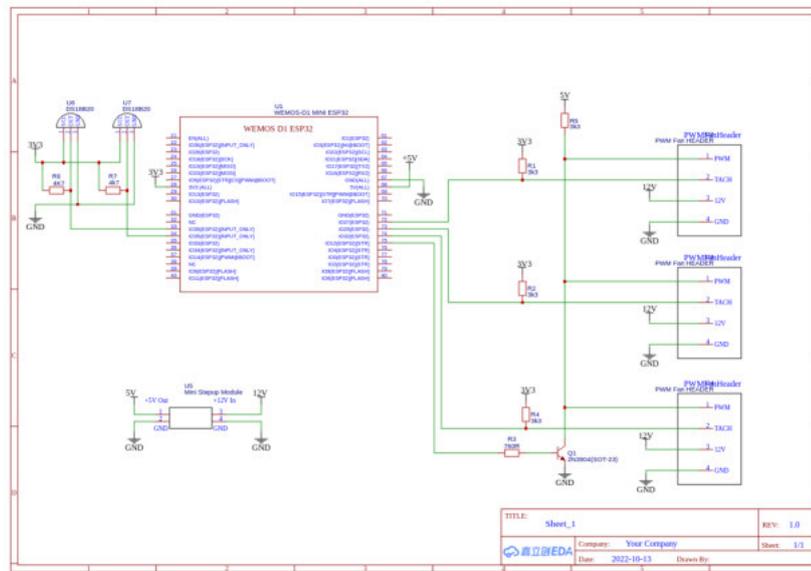


Abbildung 7.1: Konzept des Heizungsbooster als Schaltplan (Größere Darstellung in Anhang B)

Da eine individuelle Drehzahlregelung der einzelnen Lüfter nicht notwendig ist, werden alle Lüfter über einen Ausgangspin des ESP angesteuert. Der Aufbau ist demnach sehr einfach über die konzeptionierten drei Lüfter hinaus erweiterbar. Neben den beiden Temperaturen wird auch die Drehzahl der Lüfter mittels Sensoren überwacht. Alle aufgenommenen Daten werden für ein Monitoring an eine vorhandene Gebäudeautomation via MQTT geleitet.

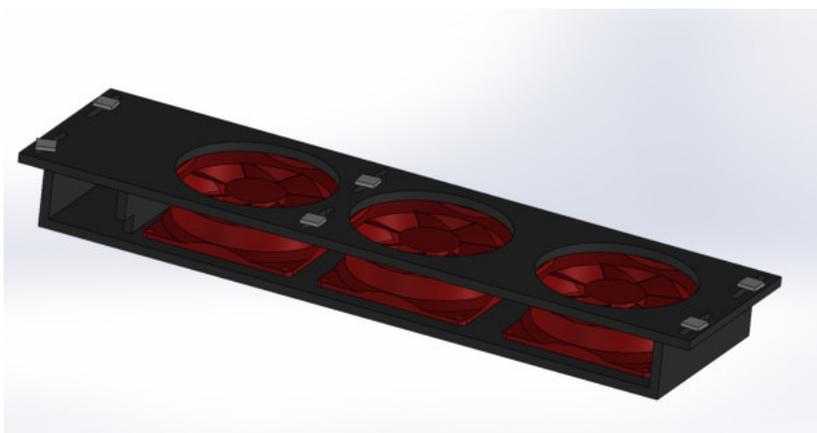


Abbildung 7.2: Konzept des Heizungsbooster als Modell

Mit einem 3D Drucker wird ein Gehäuse gefertigt. Auf der Oberseite sollen sich sechs verschiebbare Magneten zur Befestigung am Heizkörper befinden. Dadurch kann der Heizungsbooster an Heizkörpern verschiedener Abmessungen angebracht und betrieben werden. Er kann sowohl auf den Heizkörper gelegt oder mit Hilfe der Magneten unter dem Heizkörper befestigt werden.

- 
- 1: Setze Temperaturdifferenz auf Heizungstemperatur - Raumtemperatur
  - 2: **if** Mastereingabe == Freigabe **then**
  - 3:     Setze Drehzahl auf Temperaturdifferenz· 5, Drehzahl auf Bereich 0-255 limitiert
  - 4: **else**
  - 5:     Setze Drehzahl auf Mastereingabe
  - 6: **end if**
- 

Die Software bietet MQTT Schnittstellen zum Auslesen der Temperaturen und Vorgeben der Drehzahl an. Die eigentliche Steuerung findet in der übergeordneten Automation, hier ein Raspberry Pi mit IOBroker, statt. Über eine Mastereingabe soll die Drehzahl direkt vom Nutzer, unabhängig der internen Steuerung, gesetzt werden können.

## 7.2 Umsetzung und Funktionsprüfung

Auf Grundlage des erstellten Modells werden die benötigten Teile im 3D Drucker angefertigt. Anschließend wird die in Abbildung 7.1 konzeptionierte Steuerung erstellt und in den vorhandenen Bereich des Gehäuses eingesetzt. Mit Hilfe der Python Bibliothek *ESPHome* wird der ESP32 entsprechend dem konzeptionierten Funktionsumfang konfiguriert. Der Raspberry Pi wird mit dem IOBroker Betriebssystem aufgesetzt, ein MQTT Server initialisiert und die notwendige Steuerung programmiert.



Abbildung 7.3: Heizungsbooster Draufsicht



Abbildung 7.4: Heizungsbooster Frontansicht

Nach Fehlersuche und -behebung kann eine abschließende Funktionsprüfung des Heizungsboosters durchgeführt werden.

Da in der oben genannten Studie der Hochschule Mannheim die Auswirkungen auf die Wärmeabgabe bereits ausreichend analysiert und dargestellt wurden, wird in dieser Arbeit nur die korrekte Funktion des Heizungsboosters überprüft. Durch die verstellbaren Magneten kann er ohne Probleme unter einem Heizkörper montiert werden. Der ESP32 verbindet sich über MQTT mit dem auf einem Raspberry Pi installierten IOBroker, übermittelt regelmäßig Sensordaten und nimmt Befehle entgegen. Beginnt der Heizkörper sich aufzuheizen steigt die Drehzahl der Lüfter entsprechend der programmierten Regelung mit an. Durch manuelle Eingaben kann die interne Regelung überschrieben und die Drehzahl direkt gesteuert werden. Alle der konzeptionierten Funktionen sind einwandfrei vorhanden und einsatzbereit.

## Kapitel 8: Zusammenfassung und Ausblick

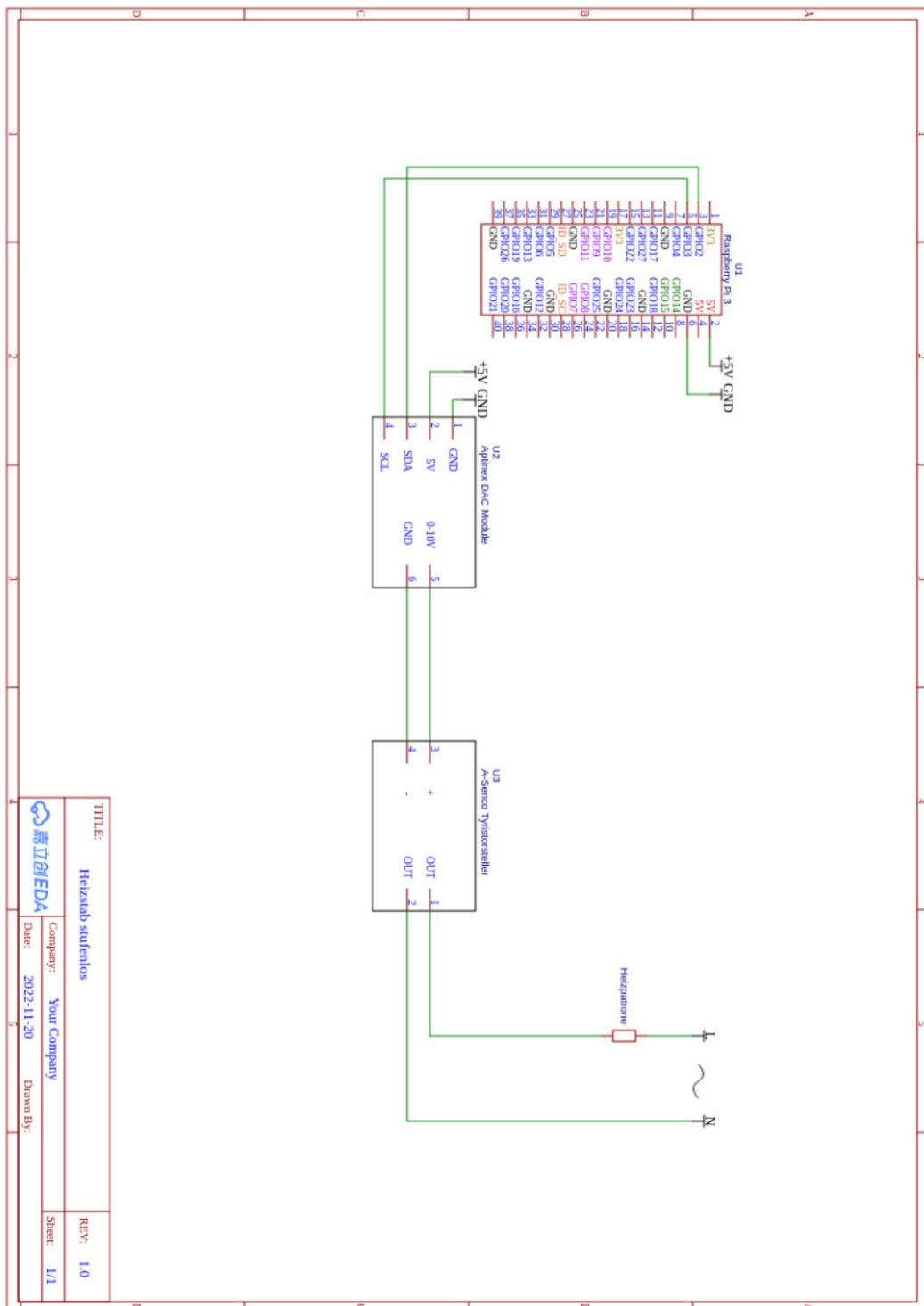
---

In dieser Arbeit sollte ein Leitfaden zur Auswahl der passenden Maßnahmen bei der Installation von Photovoltaikanlagen, Nachhaltungen und einer Gebäudeautomation erstellt werden. Die unterschiedlichen Maßnahmen wurden durch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand ihrer Amortisationszeit miteinander verglichen und bewertet. Bei Photovoltaikanlagen hat sich gezeigt, dass sich durch die angehobenen Einspeisevergütungen die Volleinspeisung, vor allen Dingen bei großen Anlagen, wieder lohnt. Außerdem ist die Amortisationszeit stark von den getätigten Investitionskosten abhängig, wodurch Anlagen, die auch in Eigenverantwortung aufgestellt werden können (zum Beispiel im Freiland oder auf Flachdächern), bevorteilt sind. Generell liegen die Amortisationszeiten von Photovoltaikanlagen deutlich unter der erwarteten Lebensdauer, so dass für fast alle Anlagen eine positive Wirtschaftlichkeit festgestellt werden konnte. Dies gilt jedoch nicht für betrachtete Nachhaltungen. Durch die Hinzufügung eines Speichers erhöhte sich die Amortisationszeit der Anlage, was auf eine schlechtere Wirtschaftlichkeit schließen lässt. Nur durch stark reduzierte Investitionskosten und einen deutlich höher angenommenen Stromverbrauch konnten Amortisationszeiträume unterhalb der erwartbaren Lebenszeit berechnet werden. Aus rein wirtschaftlicher Sicht ist von einer Erweiterung mit einer Nachhaltung abzusehen. Davon abgesehen bringen sie auch Vorteile mit sich. So wird der Autarkiegrad erhöht, so dass die Unabhängigkeit von Energiepreisen zunimmt. Außerdem können sie mit einer Notstromfunktion ausgestattet sein wodurch auch bei Ausfall des öffentlichen Netzes die Versorgung weiter gegeben ist.

Um Energieproduzenten und -verbraucher miteinander zu verknüpfen und somit den Eigenverbrauch weiter zu erhöhen sollte ein Energiemanagementsystem installiert werden. Bei vielen Wechselrichtern sind schon einfache Systeme für Monitoring und einfache Steueraufgaben vorhanden, jedoch ist ihre Erweiterung umständlich und nur mit kompatiblen Geräten möglich. Fall es die vorhandene Expertise zulässt, sollte hier ein eigenes System, bestehend aus freien Hard- und Softwarekomponenten, erstellt und betrieben werden. Diese Systeme können jederzeit auf neue Gegebenheiten angepasst oder erweitert werden. Außerdem können alle üblichen Smart Home Geräte sowie Wechselrichter und Batteriemanagementsysteme integriert und Nutzerinterface sowie Steuerung, den persönlichen Wünschen angepasst, frei erstellt werden.

In dieser Arbeit wurden nur Maßnahmen zur Verlegung des Energiebedarfs auf einen anderen Energieträger betrachtet. Jedoch sollte immer zuerst versucht werden den Energiebedarf an sich zu senken bevor er umgelegt wird. Die hier gezeigten Maßnahmen sollten demnach erst dann Anwendung finden, wenn der generelle Energiebedarf, zum Beispiel durch moderne Haushaltsgeräte oder eine passende Wärmedämmung minimiert worden ist.

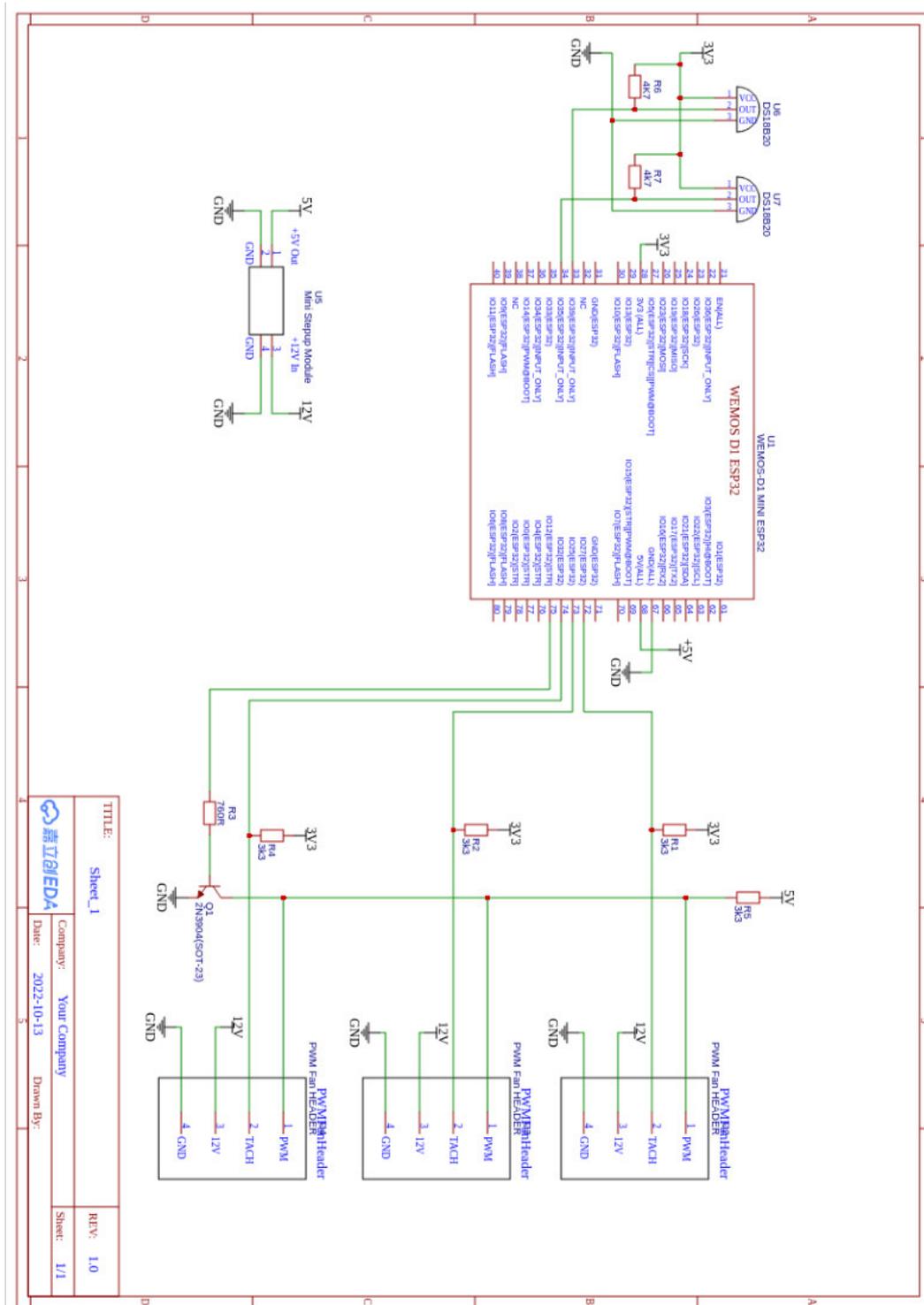
# Anhang A: Stufenlos steuerbarer Heizstab Schaltplan, vergrößerte Darstellung



TITLE:	Heizstab stufenlos	REV: 1.0
Company:	Your Company	Sheet: 1/1
Date:	2022-11-30	
Drawn By:		



# Anhang B: Konzept des Heizungsbooster, Schaltplan, vergrößerte Darstellung





# Anhang C: Simulationsergebnisse, größere Darstellung

Abbildung C.1: Variante 1



Abbildung C.2: Variante 2

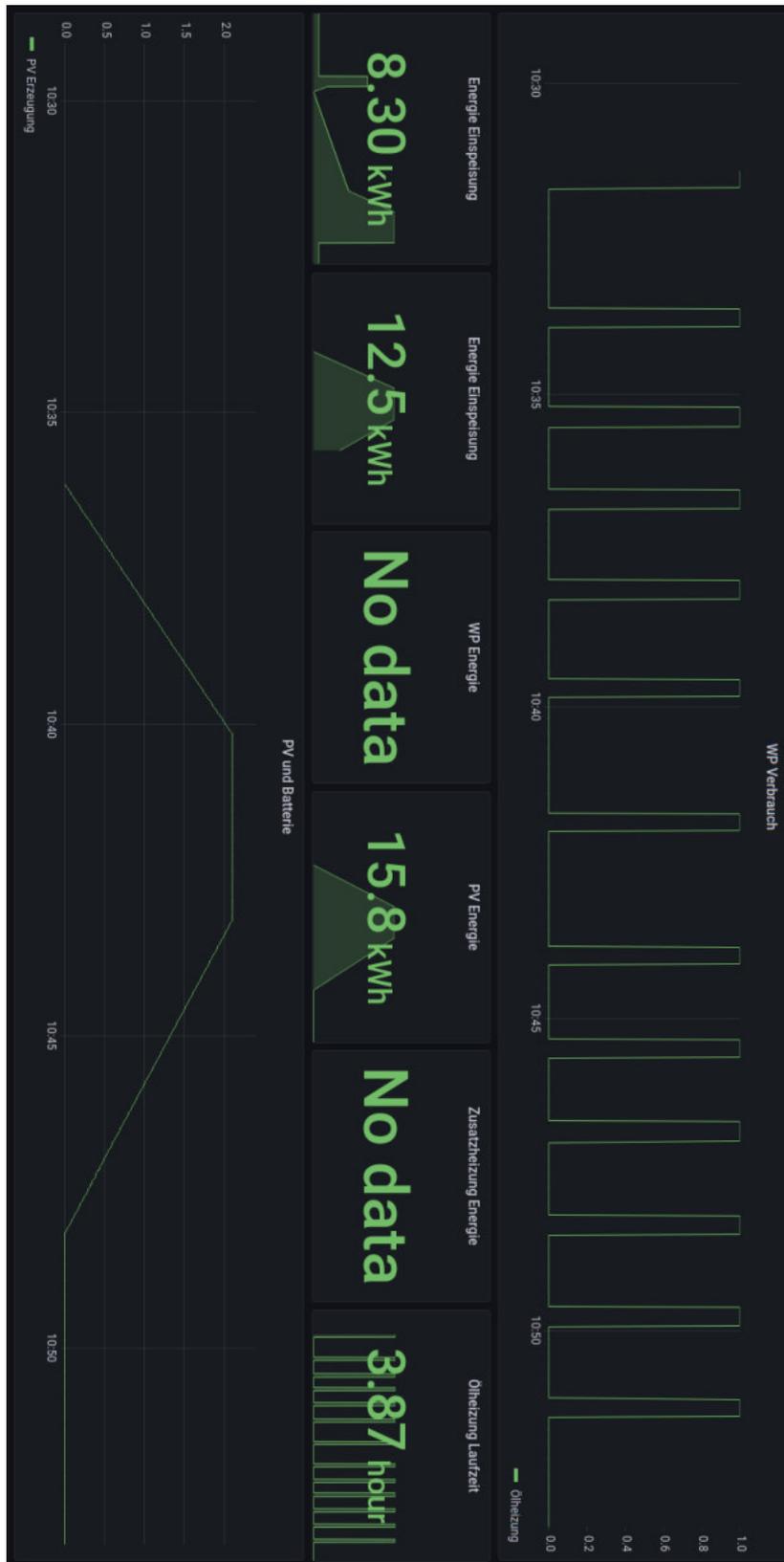


Abbildung C.3: Variante 3

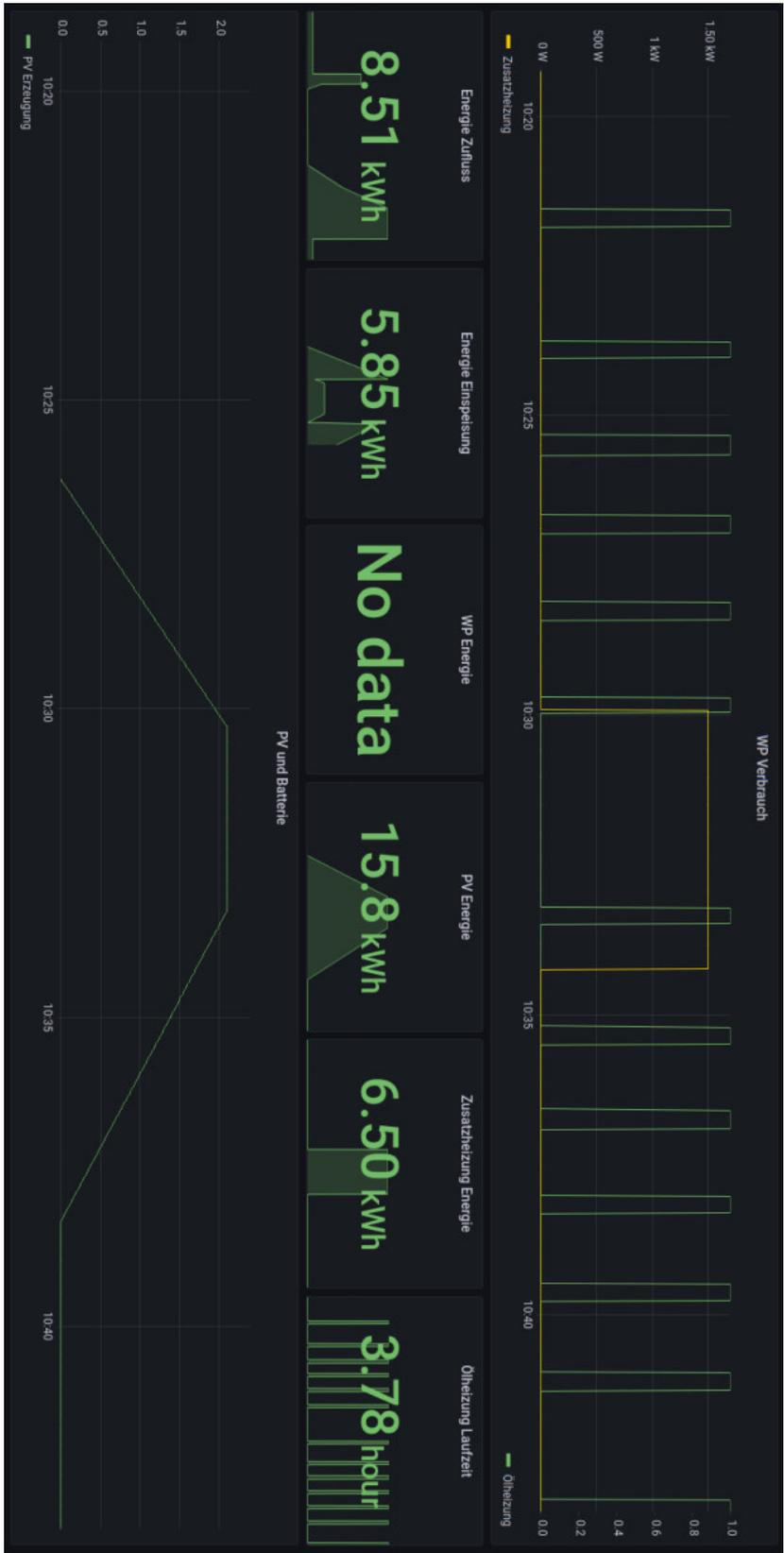


Abbildung C.4: Variante 4

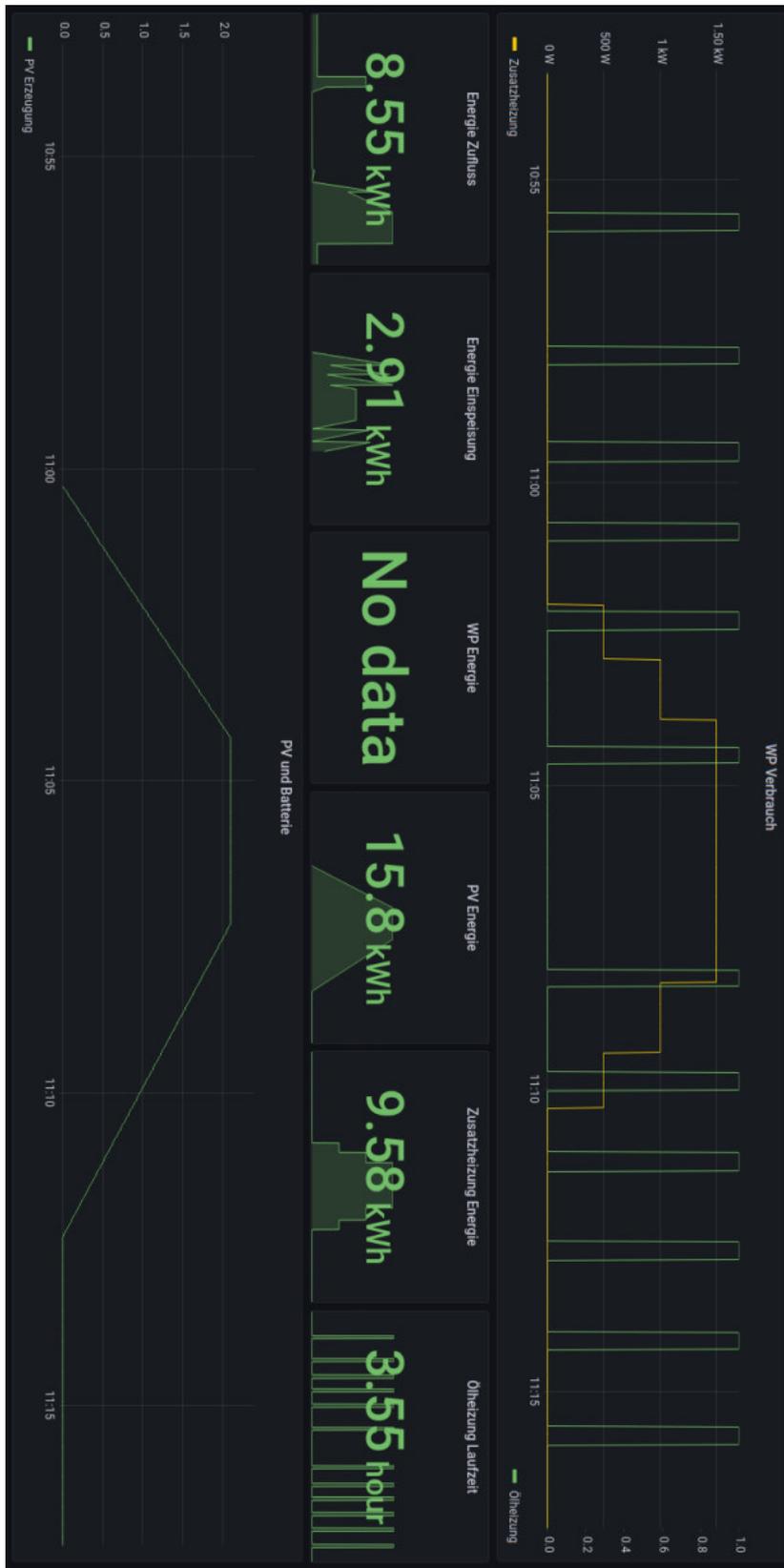


Abbildung C.5: Variante 5

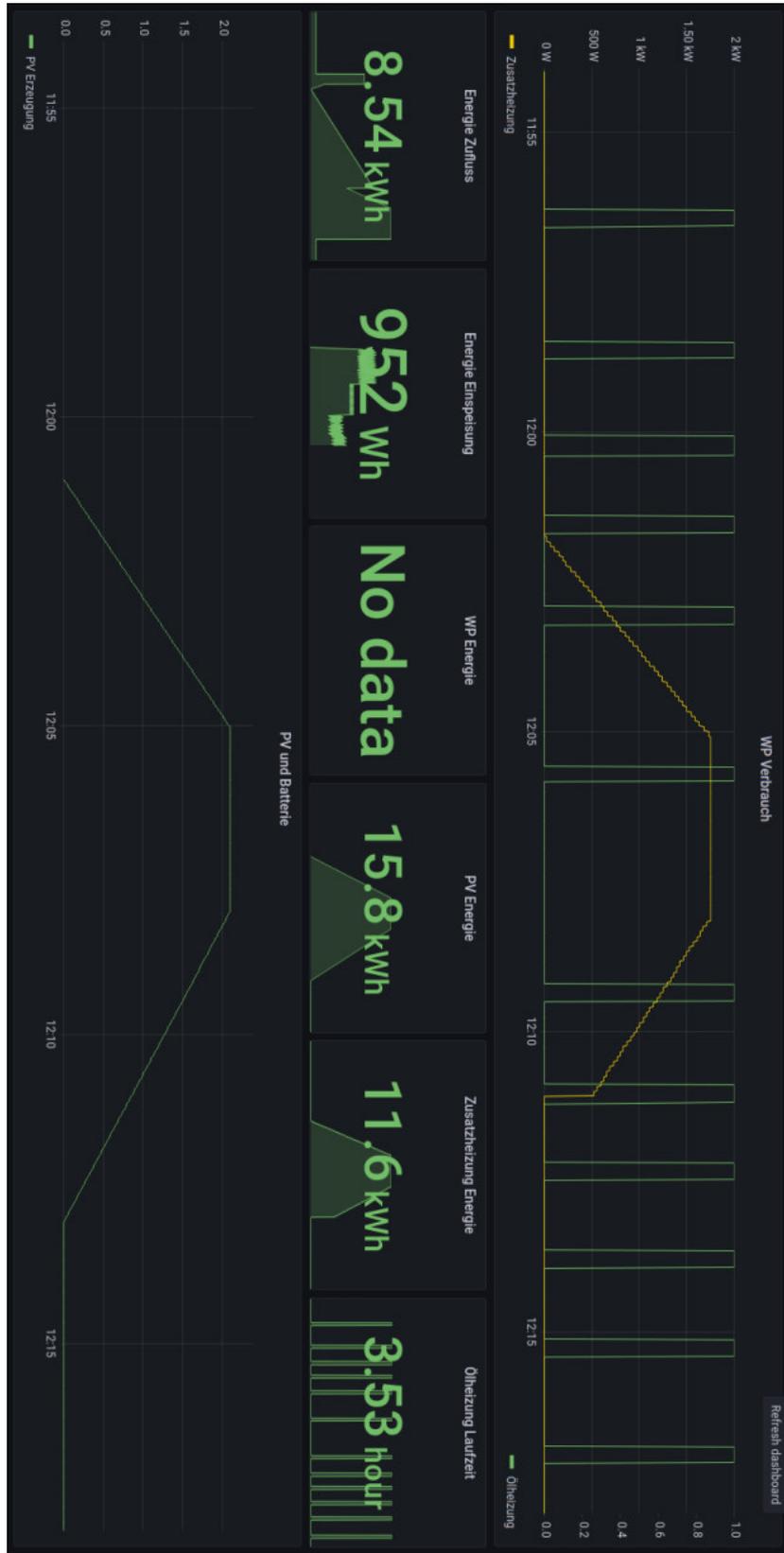


Abbildung C.6: Variante 6

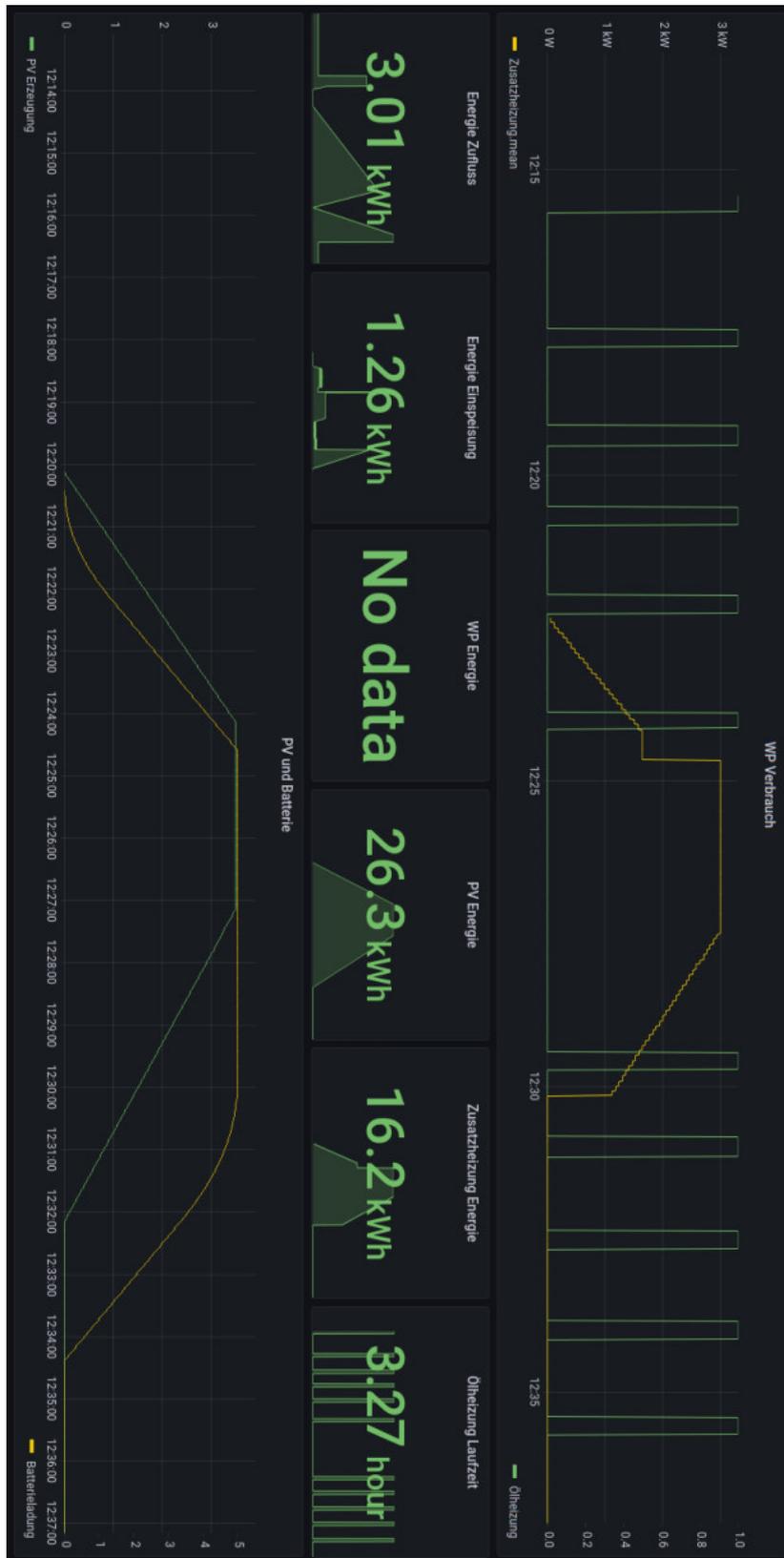


Abbildung C.7: Variante 7



Abbildung C.8: Variante 8



Abbildung C.9: Variante 9



Abbildung C.10: Variante 10



Abbildung C.11: Variante 11





# Abbildungsverzeichnis

Figure 1.1.	Grundriss des zu Grunde liegenden Modellhauses . . . . .	2
Figure 1.2.	Monatlicher Heizwärmebedarf . . . . .	3
Figure 2.1.	Raspberry Pi 4 Model B . . . . .	7
Figure 2.2.	Arduino Uno Rev3 . . . . .	8
Figure 2.3.	ESP D1 Mini Board mit ESP8266, Vor- und Rückseite . . . . .	9
Figure 2.4.	Skizze zur Funktionsweise des MQTT Protokolls . . . . .	10
Figure 2.5.	Beispiel eines Node-Red Flows . . . . .	11
Figure 2.6.	Webinterfaces von IOBroker . . . . .	12
Figure 2.7.	Schematischer Aufbau einer Solarzelle mit p-n-Übergang und Kontaktierung(WV12) . . . . .	13
Figure 2.8.	Schematischer Aufbau einer Wärmepumpe(Fre19) . . . . .	14
Figure 3.1.	Prinzipdarstellung zum Reihenabstand bei Aufgeständerten Photovoltaikanlagen . . . . .	16
Figure 3.2.	Freilandmontage einer Photovoltaikanlage . . . . .	17
Figure 3.3.	Montage einer Photovoltaikanlage an einer Fassade . . . . .	18
Figure 3.4.	Montage einer Photovoltaikanlage auf einem Flachdach . . . . .	19
Figure 3.5.	Aufdachmontage einer Photovoltaikanlage auf einem Schrägdach . . . . .	20
Figure 3.6.	Indachmontage einer Photovoltaikanlage auf einem Schrägdach . . . . .	20
Figure 3.7.	Beispiel Azimutwinkel . . . . .	21
Figure 3.8.	Zweiachsig nachgeführte Photovoltaikanlage . . . . .	22
Figure 3.9.	Jährliche Einstrahlung in Abhängigkeit des Azimut- und Neigungswinkel . . . . .	23
Figure 3.10.	Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße als Wertetabelle . . . . .	25
Figure 3.11.	Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße als Graph . . . . .	26
Figure 3.12.	Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße Vergleich zwischen Fremd- und Selbstmontage, Tabelle . . . . .	27
Figure 3.13.	Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage mit Volleinspeisung in Abhängigkeit der Anlagengröße Vergleich zwischen Fremd- und Selbstmontage, Graph . . . . .	27
Figure 3.14.	Berechnung des minimalen Eigenverbrauchsanteils abhängig von der Anlagengröße, Tabelle . . . . .	28
Figure 3.15.	Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße als Tabelle . . . . .	29
Figure 3.16.	Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße als Graph . . . . .	29

Figure 3.17. Amortisationszeit Eigenverbrauchsanlagen abhängig von Anlagengröße und Strompreis als Graph . . . . .	30
Figure 3.18. Vergleich der Amortisationszeiten von Eigenverbrauchsanlagen und Volleinspeiseanlagen abhängig von Anlagengröße . . . . .	30
Figure 3.19. DC-gekoppeltes System . . . . .	32
Figure 3.20. AC gekoppeltes System . . . . .	33
Figure 3.21. Amortisationszeitraum für Anlagen mit Nachhaltung abhängig von Anlagengröße und Speichergröße in Jahren als Tabelle . . . . .	34
Figure 3.22. Amortisationszeitraum für Anlagen mit Nachhaltung abhängig von Anlagengröße und Speichergröße als Graph . . . . .	35
Figure 3.23. Vergleich zwischen Anlagen mit und ohne Speicher Amortisationszeit abhängig von PV Anlagengröße . . . . .	35
Figure 3.24. Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Tabelle . . . . .	36
Figure 3.25. Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Graph . . . . .	36
Figure 3.26. Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation bei erhöhtem Strombedarf, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Tabelle . . . . .	37
Figure 3.27. Vergleich zwischen Anlagen mit Fremdinstallation und Eigeninstallation bei erhöhtem Strombedarf, Amortisationszeit abhängig von Speichergröße als Graph . . . . .	37
Figure 3.28. Voreingestelltes Nutzerinterface beim Venus OS . . . . .	42
Figure 3.29. Fronius eigenes Monitoring für Hauseigene Produkte . . . . .	43
Figure 3.30. Voreingestelltes Nutzerinterface der Solaranzeige . . . . .	44
Figure 4.1. Heizpatrone in einem Pufferspeicher . . . . .	46
Figure 4.2. Schaltplan für einen stufenlos steuerbarer Heizstab (größere Abbildung in Anhang A . . . . .	48
Figure 4.3. Skizze Aufbau eines Klimasplitgerätes . . . . .	51
Figure 4.4. COP-Wert von Luft/Wasser Wärmepumpe in Abhängigkeit von Außentemperatur bei verschiedenen Vorlauftemperaturen . . . . .	53
Figure 5.1. Beispieldarstellung eines Photovoltaik Monitoring Dashboards . . . . .	55
Figure 6.1. Angenommene Erzeugung der Photovoltaikanlage für die Simulation . . . . .	59
Figure 6.2. Angenommener Strombedarf für die Simulation . . . . .	60
Figure 6.3. Angenommener Raumwärmebedarf für die Simulation . . . . .	60
Figure 6.4. Angenommener Warmwasserwärmebedarf für die Simulation . . . . .	60
Figure 6.5. Simulationsergebnisse Variante 1 . . . . .	62
Figure 6.6. Simulationsergebnisse Variante 2 . . . . .	62
Figure 6.7. Simulationsergebnisse Variante 3 . . . . .	63
Figure 6.8. Simulationsergebnisse Variante 4 . . . . .	64
Figure 6.9. Simulationsergebnisse Variante 5 . . . . .	65
Figure 6.10. Amortisierungszeiträume für Photovoltaik und Speicher für das Modellhaus . . . . .	65
Figure 6.11. Simulationsergebnisse Variante 6 . . . . .	66

Figure 6.12. Simulationsergebnisse Variante 7 . . . . .	67
Figure 6.13. Amortisierungszeiträume für Photovoltaik und Speicher für das Modellhaus bei Variante 8 . . . . .	67
Figure 6.14. Simulationsergebnisse Variante 8 . . . . .	68
Figure 6.15. Temperaturverlauf Pufferspeicher Simulation Variante 8 . . . . .	68
Figure 6.16. Simulationsergebnisse Variante 9 . . . . .	69
Figure 6.17. Simulationsergebnisse Variante 10 . . . . .	69
Figure 6.18. Simulationsergebnisse Variante 11 . . . . .	70
Figure 7.1. Konzept des Heizungsbooster als Schaltplan (Größere Darstellung in Anhang B) . . . . .	74
Figure 7.2. Konzept des Heizungsbooster als Modell . . . . .	74
Figure 7.3. Heizungsbooster Draufsicht . . . . .	75
Figure 7.4. Heizungsbooster Frontansicht . . . . .	75
Figure C.1. Variante 1 . . . . .	e
Figure C.2. Variante 2 . . . . .	f
Figure C.3. Variante 3 . . . . .	g
Figure C.4. Variante 4 . . . . .	h
Figure C.5. Variante 5 . . . . .	i
Figure C.6. Variante 6 . . . . .	j
Figure C.7. Variante 7 . . . . .	k
Figure C.8. Variante 8 . . . . .	l
Figure C.9. Variante 9 . . . . .	m
Figure C.10. Variante 10 . . . . .	n
Figure C.11. Variante 11 . . . . .	o

## Tabellenverzeichnis

1.1 Angenommene Kenngrößen des Modellhauses . . . . .	2
3.1 Einspeisevergütungen nach EEG 2023 gültig ab Juli 2022 (Vera) . . . . .	24
3.2 Angenommene Zusammensetzung laufender Kosten einer Photovoltaikanlage (BQ18) . . . . .	25
3.3 Materialkosten bei einer eigenverantwortlichen Installation einer Photovoltaikanlage . . . . .	27
3.4 Materialkosten bei einer eigenverantwortlichen Installation einer Nachhaltigkeit . . . . .	36
3.5 geschätzte Investitionskosten für Wechselrichter nach Marktrecherche . . . . .	39
3.6 Kompatibilität zwischen führenden Wechselrichter Herstellern und Batteriespeicher Herstellern . . . . .	40
4.1 Preise Konventioneller Energieträger . . . . .	46
4.2 Investitionskosten für vorgefertigte Steuerbare Heizstäbe . . . . .	47

4.3	Leistungsstufen durch Zusammenschalten einzelner Phasen . . . . .	49
4.4	Investitionskosten für Wärmepumpen . . . . .	53
6.1	Allgemeine Simulationsparameter . . . . .	61
6.2	Parameter verschiedener Varianten . . . . .	61
6.3	Simulationsergebnisse Zusammenfassung . . . . .	71

## Literaturverzeichnis

- 
- [Arda] ARDUINO: *Arduino Uno Rev3*. <https://store.arduino.cc/collections/boards/products/arduino-uno-rev3>, Abruf: 25. April 2023
- [Ardb] ARDUINO: *Arduino Website*. <https://www.arduino.cc/en/about>, Abruf: 25. April 2023
- [AYK<sup>+</sup>19] AKINTADE, Olubiyi O. ; YESUFU, Thomas K. ; KEHINDE, Lawrence O. u. a.: Development of power consumption models for esp8266-enabled low-cost iot monitoring nodes. In: *Advances in Internet of Things* 9 (2019), Nr. 01, S. 1
- [Ber] BERLIN, HTW: *Unabhängigkeitsrechner*. Website. <https://solar.htw-berlin.de/rechner/unabhaengigkeitsrechner/>, Abruf: 06.09.2022
- [BQ18] BERGNER, J ; QUASCHNING, V: „Sinnvolle Dimensionierung von Photovoltaikanlagen für Prosumer “. In: *Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW Berlin), Berlin, Kurzstudie* (2018)
- [BS16] BEKAROO, Girish ; SANTOKHEE, Aditya: Power consumption of the Raspberry Pi: A comparative analysis. In: *2016 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Innovative Business Practices for the Transformation of Societies (EmergiTech)*, 2016, S. 361–366
- [Con] CONNECTIVITY STANDARDS ALLIANCE: *Connectivity Standards Alliance - Über uns*. <https://csa-iot.org/About/>, Abruf: 25. April 2023
- [EBW<sup>+</sup>] EISENMANN, Wolfgang ; BRUDER, Sascha ; WÖSSNER, Dirk ; SKWORZOW, Vladimir ; AGIRMAN, Ömer ; HENN, Jonas: Effizienzsteigerung von Heizgeräten im Gebäudebestand durch Absenkung der Heizkreistemperaturen mit Hilfe von Heizkörpern mit thermoelektrisch angetriebenen Ventilatoren. In: *RET. Con 2019: Tagungsband: 2. Regenerative Energietechnik-Konferenz in Nordhausen 7.-8. Februar 2019*, S. 147–157
- [eQ-] eQ-3: *eQ-3 UNternehmensgeschichte*. <https://www.eq-3.de/ueber-uns.html>, Abruf: 25. April 2023
- [Esp] ESPRESSIF: *About Espressif*. <https://www.espressif.com/en/company/about-espressif>, Abruf: 25. April 2023
- [FHK<sup>+</sup>19] FIGGENER, J ; HABERSCHUSZ, DAVID ; KAIRIES, KP ; WESSELS, OLIVER ; ZURMÜHLEN, S ; SAUER, DU: Speichermonitoring Baden-Württemberg Jahresbericht 2019. In: *Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA), RWTH Aachen, Aachen* (2019)
- [FR12] FRONDEL, Manuel ; RITTER, Nolan: Datenauswertung zum Energieverbrauch der privaten Haushalte differenziert nach Gebäudemerkmalen: Sonderauswertung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau

und Stadtentwicklung (BMVBS) / RWI Projektberichte. 2012. – Forschungsbericht

- [Fre19] FREY, Hartmut: Wärmepumpen. In: *Energieautarke Gebäude*. Springer, 2019, S. 325–364
- [Gro12] GROISS, Christoph: *Ein Jahr Photovoltaik-Forschungszentrum Zwentendorf*. 2012
- [hag] HAGER AND VALENTIN SOFTWARE: *hager PV\*SOL online - a free tool for solar power (PV) systems*. <https://hager-pvsol.valentin-software.com/#/>, Abruf: 25. April 2023
- [Hei17] HEINLE, Stefan: Das Projekt IO-Broker macht Smart-Home-Anwendungen kompatibel. In: *Linux Magazin* (2017)
- [HX12] HUA, Liu Y. ; XIANG, Zhang J.: Smart Home Based on the ZigBee Wireless. In: *2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems*, 2012, S. 122–125
- [Kai] KAI JANSSEN: *Solarmodule Test und Vergleich 2023*. <https://gruenes.haus/solarmodule-test-vergleich/#tve-jump-180326c1ffb>, Abruf: 22.08.2022
- [Leu13] LEUTHNER, Stephan: Übersicht zu lithium-ionen-batterien. In: *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer, 2013, S. 13–19
- [Lox] LOXONE ELECTRONICS GMBH: *Loxone Group*. <https://www.loxone.com/dede/ueber-uns/loxone-group/>, Abruf: 25. April 2023
- [MPAS21] MANFALUTHY, M ; PANGESTU, A ; ARIF, R ; SANJAYA, LA: Watt Peak Meter of Solar Panel. In: *Journal of Physics: Conference Series* Bd. 2019 IOP Publishing, 2021, S. 012097
- [NO22] NICO ORTH, et a. Johannes Weniger W. Johannes Weniger: Stromspeicher Inspektion 2022. (2022). <https://solar.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW-Stromspeicher-Inspektion-2022.pdf>, Abruf: 25. April 2023
- [OAS] OASIS OPEN: *OASIS Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) TC*. [https://www.oasis-open.org/committees/tc\\_home.php?wg\\_abbrev=mqtt](https://www.oasis-open.org/committees/tc_home.php?wg_abbrev=mqtt), Abruf: 25. April 2023
- [Ope] OPENJS FOUNDATION & CONTRIBUTORS: *About Node-Red*. <https://nodered.org/about/>, Abruf: 25. April 2023
- [Ras] RASPBERRY PI FOUNDATION: *Raspberry Pi Foundation About us*. <https://www.raspberrypi.org/about/>, Abruf: 25. April 2023
- [Roba] ROBERT BOSCH GMBH: *Wärmepumpe Kosten: Damit müssen Sie rechnen*. <https://www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/wissen/heizungsratgeber/waermepumpe/waermepumpe-kosten/>, Abruf: 30.08.2022

- [Robb] ROBERT BOSCH SMART HOME GMBH: *Über uns: Das ist Bosch Smart Home*. <https://www.bosch-smarthome.com/de/de/ueber-uns/>, Abruf: 25. April 2023
- [RSP11] RAMYA, C. M. ; SHANMUGARAJ, M ; PRABAKARAN, R: Study on ZigBee technology. In: *2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology* Bd. 6, 2011, S. 297–301
- [Staa] STADTWERKE MÜNCHEN: *Struktur des jährlichen Erdgasverbrauchs in deutschen Haushalten\* nach Monaten*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/160067/umfrage/verbrauch-von-heizenergie-nach-monaten/>, Abruf: 18.08.2022
- [Stab] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Erdgas- und Stromdurchschnittspreise*. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erdgas-Strom-Durchschnittspreise/_inhalt.html), Abruf: 25.08.2022
- [Stac] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Erzeugerpreise gewerblicher Produkte (Inlandsabsatz) Preise für leichtes Heizöl, Motorenbenzin und Dieselkraftstoff*. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/Publikationen/Downloads-Erzeugerpreise/erzeugerpreise-preisreihe-heizoel-pdf-5612402.pdf;jsessionid=0612862D76D2F82DB412F36F2DE29FB8.live712?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Preise/Erzeugerpreisindex-gewerbliche-Produkte/Publikationen/Downloads-Erzeugerpreise/erzeugerpreise-preisreihe-heizoel-pdf-5612402.pdf;jsessionid=0612862D76D2F82DB412F36F2DE29FB8.live712?__blob=publicationFile), Abruf: 25. April 2023
- [Stad] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Private Haushalte und Umwelt - Berichtszeitraum 2000 - 2019*. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/private-haushalte/Publikationen/Downloads/haushalte-umwelt-pdf-5851319.pdf?__blob=publicationFile), Abruf: 25. April 2023
- [Vera] VERBRAUCHERZENTRALE: *EEG 2023: Das ändert sich für Photovoltaik-Anlagen*. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/erneuerbare-energien/eeg-2023-das-aendert-sich-fuer-photovoltaikanlagen-75401>, Abruf: 25. April 2023
- [Verb] VERBRAUCHERZENTRALE: *Lohnen sich Batteriespeicher für Photovoltaikanlagen?* <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/erneuerbare-energien/lohnensich-batteriespeicher-fuer-photovoltaikanlagen-24589>, Abruf: 25. April 2023
- [WV12] WESSELAK, Viktor ; VOSWINCKEL, Sebastian: *Photovoltaik–Wie Sonne zu Strom wird*. Springer-Verlag, 2012
- [YSAAH17] YASSEIN, Muneer B. ; SHATNAWI, Mohammed Q. ; ALJWARNEH, Shadi ; ALHATMI, Razan: Internet of Things: Survey and open issues of MQTT protocol. In: *2017 International Conference on Engineering and MIS (ICEMIS)*, 2017, S. 1–6