



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Life Sciences
Studiengang Umwelttechnik

Heizen mit Wärmepumpe - Vergleich von auf Eigenverbrauch optimierten
Photovoltaik/-Speichersystemen für Verschiedene Gebäudealtersklassen
Bachelorarbeit

Tag der Abgabe: 20.08.2022

Vorgelegt von: Luisa Schmitter [REDACTED]

Gutachter:

Prof. Dr. -Ing. Sebastian Timmerberg

Dipl.-Ing. Ulrich Fuchs

Betreuender Prüfer

Zweiter Prüfer

ZUSAMMENFASSUNG	5
1 EINLEITUNG.....	6
2 STAND DER TECHNIK.....	9
2.1 RAHMENBEDINGUNG ZÄHLERANSCHLUSS	9
2.2. PHOTOVOLTAIK.....	9
2.2.1. <i>Funktion und Technik der Photovoltaik</i>	9
2.2.2. <i>Technologien und Bauweisen</i>	11
2.2.3. <i>Einfluss des Anstellwinkels</i>	12
2.2.4. <i>Nachführung von PV-Modulen</i>	13
2.2.5. <i>Bestrahlungsstärke auf geneigter Ebene</i>	14
2.3. WÄRMEPUMPE.....	16
2.3.1. <i>Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe</i>	16
2.3.2. <i>Theoretischer und realer Kreisprozess einer Wärmepumpe</i>	17
2.3.3. <i>Auslegung und Regelung einer Wärmepumpe</i>	19
2.4. ENERGIESPEICHER	20
2.4.1. <i>Thermische Speicher</i>	21
2.4.2. <i>Elektrochemische Speicher</i>	23
3 METHODIK	26
3.1. VERGLEICHSGEBÄUDE	27
3.1.1. <i>Repräsentatives Bestandsgebäude</i>	27
3.1.2. <i>Niedrigenergiegebäude</i>	28
3.2. LASTPROFILE DER VERGLEICHSGEBÄUDE	29
3.3. AUSLEGUNG DER SPEICHERVOLUMEN, SPEICHERKAPAZITÄT UND WÄRMEVERLUSTE	30
3.3.1. <i>Normheizlast</i>	30
3.3.2. <i>Speichervolumen</i>	31
3.3.3. <i>Speicherkapazität</i>	32
3.3.4. <i>Wärmeverlustkoeffizient</i>	33
3.4. AUSLEGUNG DER WÄRMEPUMPE.....	34
3.5. REGELUNG DES SYSTEMS	34
3.6. AUSLEGUNG UND DIMENSIONIERUNG DER PV-ANLAGE	36
3.7. BATTERIESPEICHER AUSLEGUNG UND DIMENSIONIERUNG	36
4 ERGEBNISSE.....	38
4.1. BESTANDSHAUS.....	39
4.2. NIEDRIGENERGIEHAUS.....	42
4.3. WIRTSCHAFTLICHKEITSANALYSE DES SYSTEMS OHNE UND MIT OPTIMIERUNG DES ANSTELLWINKELS	47
5 AUSWERTUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	49
5.1. AUSWERTUNG	49
5.2. DISKUSSION.....	52
6 FAZIT	55
7 AUSBLICK.....	56
ANHANG	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Netto-PV-Zubau: Ist-Werte bis 2021, möglicher Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele (EEG2023) Quelle: (Wirth, 2022, S. 6).....	7
Abbildung 2: Endenergieverbrauch der Raumwärme von Wohngebäuden 2015 Quelle: (Goeke, 2021, S. 3) ...	8
Abbildung 3: Typische Silizium-Solarzelle Quelle: (Mertens, 2020, S. 92)	10
Abbildung 4: Aufbau einer PERC-Zelle Quelle: (Mertens, 2020, S. 121).....	11
Abbildung 5: Temperaturabhängigkeit einer Si-Solarzelle am Beispiel der Bosch Solar Cell M-3BB Quelle: (Mertens, 2020, S. 104)	12
Abbildung 6: Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme, Standort Hamburg Quelle: (Mertens, 2020, S. 359)	13
Abbildung 7: Erträge von starrer und nachgeführter PV-Anlage an zwei verschiedenen Tagen Quelle: (Mertens, 2020, S. 59) nach IBC Solar)	14
Abbildung 8: Prinzipschaltbild der Kompressionswärmepumpe Quelle: (Crastan, 2009, S. 331).....	17
Abbildung 9: Kreisprozess der Kompressionswärmepumpe ABCD= idealisierter Kreisprozess, AB*C*D*= realer Kreisprozess Quelle: (Crastan, 2009, S. 332)	17
Abbildung 10: Monovalente und Monoenergetische Betriebsweise einer Wärmepumpe Quelle: (Sobotta, 2018, S. 83)	19
Abbildung 11: Verhältnis Wärmebedarf Gebäude zur Heizleistung der Luft/Wasser-Wärmepumpe Quelle: (Sobotta, 2018, S. 158).....	20
Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Speichers (CE: Chemische Energie) Quelle: (Jossen & Weydanz, 2019, S. 6)	23
Abbildung 13: Schema einer elektrochemischen Zelle für den Fall der Entladung Quelle: (Jossen & Weydanz, 2019, S. 7)	24
Abbildung 14: Schematische Darstellung der reversiblen Selbstentladung S und des irreversiblen Kapazitätsverlustes KV in Abhängigkeit vom Ladezustand (SOC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen Zelle Quelle (Jossen & Weydanz, 2019, S. 168)	25
Abbildung 15: Energiefließbild der Simulationsanlage.....	26
Abbildung 16: Abschätzung der Heizlast in Abhängigkeit von beheizter Fläche und Wärmeschutzstandart (Baualtersklasse) des Gebäudes- 100 m ² bis 500 m ² Quelle: (DIN SPEC 15378:2018-08, 2018, S. 50)	31
Abbildung 17: Priorisierungsschema für den Verbrauch von PV-Strom.....	34
Abbildung 18: Regelungsschema der Wärmepumpe für die Vergleichsgebäude	35
Abbildung 19: Monatlicher Ertrag einer 10 kWp PV-Anlage in 0° Südausrichtung und verschiedenen Anstellwinkeln	38
Abbildung 20: Nutzungsanteile des PV-Stroms bei 6000 kWh Jahresstromverbrauch und in Abhängigkeit der Speicherkapazität der Batterie für das Bestandhaus.....	42
Abbildung 21: Nutzungsanteile des PV-Stroms bei 6000 kWh Jahresstromverbrauch und in Abhängigkeit der Speicherkapazität der Batterie für das Niedrigenergiehaus.....	46
Abbildung 22: PV-Stromertrag und Stromverbrauch durch Wärmepumpe und Haushalt des Bestandshauses für eine Woche des TRY	50
Abbildung 23: PV-Stromertrag und Stromverbrauch durch Wärmepumpe, Durchlauferhitzer und Haushalt des Niedrigenergiehauses für eine Woche des TRY.....	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wohnflächen und Häufigkeiten im Deutschen Wohngebäudebestand/ Basis-Typen/ Baujahr bis 2009, Mai 2011, Quelle: (Loga et al., 2015, S. 18)	27
Tabelle 2: Die wichtigsten Parameter der Vergleichsgebäude für die Auslegung von PV, WP und Speichern .	28
Tabelle 3: Systematik der Typtagkategorien Quelle: (VDI e.V., 2021, S. 5)	29
Tabelle 4: Eigenverbrauch des PV-Stroms im Bestandshaus bei Anstellwinkeln von 10° bis 70° und unterschiedlichen Jahresstromverbräuchen.....	39
Tabelle 5: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 0 kWh Batteriespeicher (Bestandshaus)	40
Tabelle 6: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 5 kWh Batteriespeicher (Bestandshaus)	41
Tabelle 7: Eigenverbrauch des PV-Stroms im Niedrigenergiehaus bei Anstellwinkeln von 10° bis 70° und unterschiedlichen Jahresstromverbräuchen.....	43
Tabelle 8: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 0 kWh Batteriespeicher (Niedrigenergiehaus)	44
Tabelle 9: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 5 kWh Batteriespeicher (Niedrigenergiehaus)	45
Tabelle 10: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	47
Tabelle 11: Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Bestandshaus für vorhandenen und optimierten Anstellwinkel	48
Tabelle 12: Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Niedrigenergiehaus für vorhandenen und optimierten Anstellwinkel	48
Tabelle 13: Anteil Eigenverbrauch der 10 kWp PV-Anlage bei 25° Anstellwinkel.....	49
Tabelle 14: Prozentualer Anteil von Wärmepumpe und Haushalt am Eigenverbrauch für Anstellwinkel von 10° bis 70° und 0 kWh Batteriespeicher für das Bestandshaus	51
Tabelle 15: Prozentualer Anteil von Wärmepumpe Durchlauferhitzer und Haushalt am Eigenverbrauch für Anstellwinkel von 10° bis 70° und 0 kWh Batteriespeicher für das Niedrigenergiehaus.....	52

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
Ct	Cent
J	Joule
kg	Kilogramm
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt peak
m ²	Quadratmeter
m ³	Kubikmeter
W	Watt
€	Euro
EEG	Erneuerbare-Energien Gesetz
DLE	Durchlauferhitzer
DWD	Deutscher Wetterdienst
GEG	Gebäudeenergiegesetz
PV	Photovoltaik
TRY	Testreferenzjahr
TT	Typtag
W	Watt
WP	Wärmepumpe

Zusammenfassung

Diese Arbeit ist eine wirtschaftliche Betrachtung des Einflusses der Untersuchungsparameter Anstellwinkel und Batteriekapazität auf eine PV-Anlage, die in ein Gebäude mit einer Luft-Wasser Wärmepumpe speist. Nach einer Einleitung wird im Kapitel Stand der Technik die Technologien erklärt, Annahmen getroffen und Berechnungsansätze vorgestellt. Die Untersuchung wird anhand einer Jahressimulation durchgeführt. Hier werden der Einfluss der Parameter Batteriekapazität und Anstellwinkel auf die Jahressimulation untersucht. Die Jahressimulation wird für zwei Gebäude unterschiedlicher Baualtersklassen (Bestands- und Niedrigenergiehaus) mit Verbrauchsfaktoren nach VDI Norm 4655 aufgestellt. Die Erzeugung der PV-Anlage wird mittels Daten des Deutschen Wetterdienstes (Testreferenzjahr) und über die Aufteilung in Direkt- und Diffusstrahlung berechnet. Die Diffusstrahlung wird mit dem isotropen Modell berechnet. Die Jahressimulation errechnet die Wärmeversorgung für Heizenergie mittels Wärmepumpe und die Wärmeversorgung des Trinkwarmwassers mittels Wärmepumpe und ggf. Durchlauferhitzer. Anschließend kann der elektrische Energiebedarf simuliert werden. Anhand der Jahressimulation wird das System mit der Annahme verschiedener Untersuchungsparameter wirtschaftlich verglichen. Eine Anpassung des Lastgangs des Gebäudes an den PV-Ertrag stellt sich in jedem Fall als sinnvoll dar. Die Optimierung des Anstellwinkels ist unter den gegebenen Voraussetzungen nicht rentabel. Die Speicherkapazität eines Batteriespeichers mindert die Rentabilität gegenüber einem System ohne Batteriespeicher. Für die Erhöhung des Gesamteigenverbrauchs ist die Integration eines Batteriespeicher allerdings sinnvoll und kann bei einer Erhöhung des Strompreises rentabel werden.

1 Einleitung

Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine bedroht die sichere Versorgung der EU mit russischem Gas. Als Folge daraus wurden Maßnahmen beschlossen, um eine größere Unabhängigkeit in der Energieversorgung sicher zu stellen.

Mitte 2022 hat das Bundeskabinett eine Erneuerung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) in Form des „Osterpakets“ beschlossen. Es handelt sich dabei um ein Sofortprogramm, welches die größte Erneuerung seit Inkrafttreten des EEGs im Jahr 2000 darstellt und die Rahmenbedingungen für das Erreichen einer treibhausgasneutralen Stromerzeugung verschärft (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022).

Klima- Energie- und Wirtschaftspolitik werden auf das 1,5-Grad Klimaschutzziel aus dem Pariser Klimaabkommen 2015 zugeschnitten. Das bisher geltende EEG 2021 wurde daraufhin mit dem ‚Osterpaket‘ noch einmal überarbeitet und aktualisiert.

Das Osterpaket erhöht die Einspeisevergütung für PV Dachanlagen von der bisher gültigen monatlichen Degression auf bis zu 13,8 Cent/kWh. (Zuletzt lagen die Einspeisevergütungen im Juli 2022 für kleine Anlagen bei 6,24 Ct/kWh (vgl. (Wirth, 2022))). Die wieder erhöhten Vergütungssätze sollen Anlagenbesitzer*innen dazu animieren, ihre komplette Dachfläche mit PV zu belegen. Eine Degression der Vergütungssätze soll es erst nach einer grundlegenden Erneuerung der Festlegung dieser Sätze wieder geben.

Weiterhin wird es Anlagenbesitzer*innen ermöglicht, pro Hausanschluss zwei PV-Anlagen anzumelden. So kann eine PV-Anlage zur Volleinspeisung und eine Eigenverbrauchsanlage mit zwei unterschiedlichen Vergütungssätzen realisiert werden.

Die EEG-Umlage, die Stromverbraucher*innen bisher über den Strompreis gezahlt haben, entfällt bis auf Weiteres völlig. Die erneuerbaren Energien finanzieren sich ab dem zweiten Halbjahr 2022 über das Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“ (Bundesregierung, 2022).

Diese Änderungen im EEG sollen das Ziel des Koalitionsvertrags 2021, bis 2030 80% des Primärenergieverbrauchs in Deutschland durch erneuerbare Energien zu decken, vorantreiben (Bundesregierung, 2022).

Das EEG 2023 schreibt den Ausbau von PV bis 2030 auf 215 GW_p und bis 2040 auf 400 GW_p vor. Abbildung 1 zeigt den möglichen Ausbauweg zum Erreichen dieser Ziele pro Jahr.

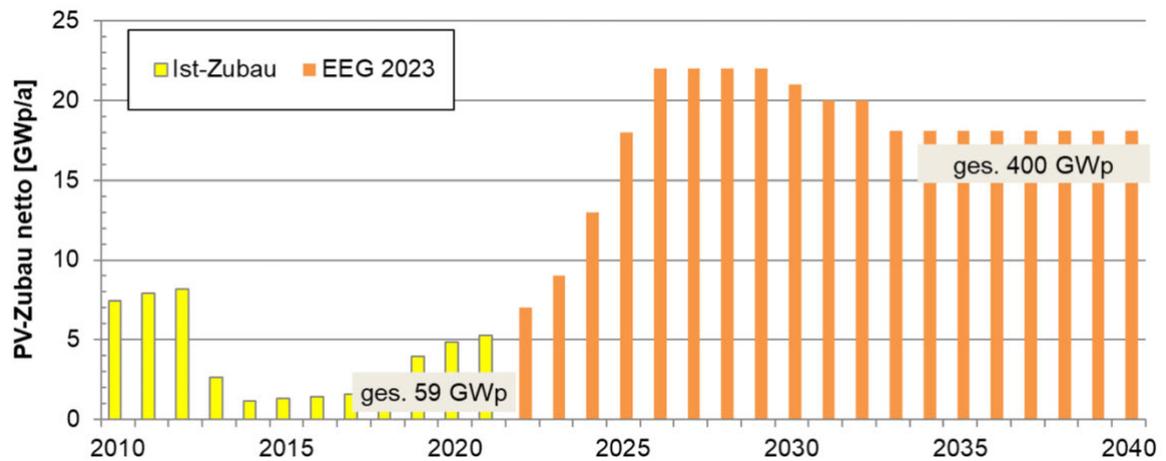


Abbildung 1: Netto-PV-Zubau: Ist-Werte bis 2021, möglicher Ausbaupfad zur Erreichung der gesetzlichen Ziele (EEG2023)

Quelle: (Wirth, 2022, S. 6)

Der Zubau von PV-Anlagen im Einfamilienhausesektor bringt den Vorteil, dass diese an das Niederspannungsnetz angeschlossen werden und der überschüssige Solarstrom verbrauchsnahe genutzt werden kann. Die Struktur des kommunal organisierten Niederspannungsnetzes verringert dabei den Bedarf des Netzausbaus und unterstützt so die schnelle Realisierung der Ausbauziele. Netzüberlastungen, vor denen bei einem schnellen Ausbau der erneuerbaren Energien gewarnt wird, betreffen vor allem Strom aus Windkraftanlagen und nicht kleine PV-Anlagen.

Bislang ungenutzten Flächen wie Hausdächern einen zweiten Nutzen zuzuschreiben, ist ein konfliktarmer Weg, den Anteil erneuerbarer Energien nach Gesetzesvorgaben zu erweitern. (Wirth, 2022)

Die Frage nach der Wirtschaftlichkeit in die Investition einer PV-Anlage und nach Autarkie vom Stromnetzbetreiber liegt auf Seite der Verbraucher*innen. Die Investitionskosten für PV sind in den letzten Jahren zwar drastisch zurückgegangen, es handelt sich dennoch um nicht zu vernachlässigende Kosten. (Quaschnig, 2019, S. 419)

Nicht nur die Produktion von Strom aus erneuerbaren Energien muss vorangetrieben werden. Wohn- und Nichtwohngebäude müssen auf den Verbrauch von erneuerbaren Energien modernisiert werden. Besonders die Erzeugung von Raumwärme in Wohngebäuden, die zum Großteil von Öl- und Gasthermen bereitgestellt wird (vgl. Abbildung 2) und mit über 75% den Großteil des Energieverbrauchs in Wohn- und Nichtwohngebäuden einnimmt, bedarf dabei einer Modernisierung. (Goeke, 2021)

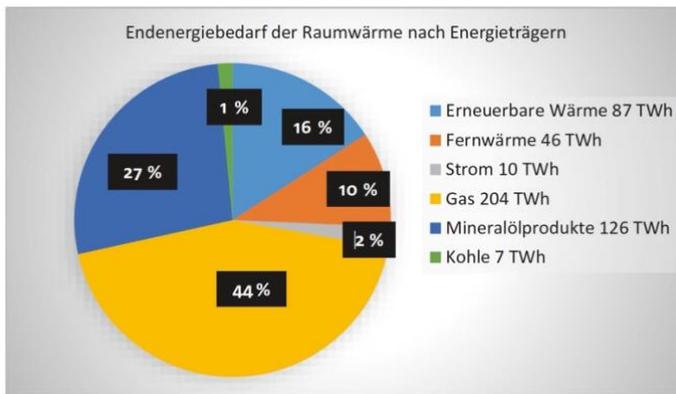


Abbildung 2: Endenergieverbrauch der Raumwärme von Wohngebäuden 2015 Quelle: (Goeke, 2021, S. 3)

Eine Lösung für eine Wärmeversorgung ohne Öl oder Gas stellen Wärmepumpen dar. Werden diese mit Strom aus erneuerbaren Energien gespeist, ist dies nicht nur für die Unabhängigkeit von ausländischen Rohstoffen, sondern auch für die Energiewende zu begrüßen (Roth et al., 2022).

Zusätzlich zu den politischen Vorgaben der Ausbauziele für PV wächst die Nachfrage für Wärmepumpen immer weiter. Werden die Pläne der Ampel-Koalition in die Tat umgesetzt, besteht die Möglichkeit, dass es ab 2024 keine Neuzulassungen mehr für Gasthermen geben wird (Walker, 2022). So bietet sich für viele, gerade im ländlichen Bereich, wo es keinen Anschluss an ein großes Fernwärmenetz gibt, keine andere Möglichkeit, als in eine Wärmepumpe zu investieren. Die Zahl der Umrüstungen der eigenen Heizungsanlage auf eine elektrisch betriebene Wärmepumpe ist demnach steigend. Um auch hier Stromkosten so gering wie möglich zu halten, vor allem da nicht absehbar ist wohin sich der Strompreis in den nächsten Jahren entwickelt, ist die Kopplung der Wärmepumpe mit einer PV-Anlage theoretisch gedacht sinnvoll.

Aufgrund der immer weiter steigenden Stromkosten ist bei der Planung einer PV-Anlage der Anreiz, eine bestmögliche Eigennutzung des erzeugten Stroms zu gewährleisten, groß (Goeke, 2021, S. 11 f).

Die Fragestellung in dieser Arbeit ist, wie die Strom-Erzeugung durch eine PV-Anlage bestmöglich für den Eigenverbrauch wirtschaftlich optimiert werden kann. Hierfür wird untersucht, wie sich der Anstellwinkel der PV-Module auf die Eigennutzungsanteile durch Hausverbraucher auswirkt. Ein besonderer Fokus wird hierbei auf den Verbrauch durch die Wärmepumpe gelegt.

Zuerst werden im Kapitel 2 die betrachteten Technologien erklärt, wichtige Annahmen dazu getroffen und Berechnungsansätze für eine Systemsimulation vorgestellt. Im Kapitel 3 wird die Methodik zur Lösung der Fragestellung vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulation in Kapitel 4 beschrieben und eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt. Im Kapitel 5 werden die Ergebnisse ausgewertet und diskutiert. Schließlich wird in Kapitel 6 ein Ausblick für mögliche weitere Betrachtungen gegeben.

2 Stand der Technik

2.1 Rahmenbedingung Zähleranschluss

In Hamburg gibt es für den Wärmepumpenstrom einen speziellen Stromtarif, der günstiger ist als Haushaltsstromtarif. Bisher mussten Verbraucher*innen sich entscheiden, ob die PV-Anlage zur Versorgung der Wärmepumpe oder für den Haushaltsstrom genutzt werden soll. Die Möglichkeit, den Strom der PV-Anlage für beide Anwendungen zu nutzen, war nicht möglich.

Über eine spezielle Kaskadenschaltung der beiden Stromzähler ist dies in Hamburg mittlerweile möglich. Weiterhin gibt es in Hamburg keine Sperrzeiten für Wärmepumpen, wie es in anderen Bundesländern der Fall ist. Lediglich für elektronische Zusatzheizungen, die den Wärmepumpenbetrieb bei extremen Temperaturen unterstützen sollen, gibt es diese Sperrzeiten.¹ Diese Bedingungen werden für den Aufbau dieser Arbeit als Grundlage vorausgesetzt.

2.2. Photovoltaik

Photovoltaik beschreibt den Prozess der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, bzw. Strom. (Mertens, 2020)

2.2.1. Funktion und Technik der Photovoltaik

Eine Solarzelle nutzt die stromleitenden Eigenschaften von Halbleitern, wie Silizium.

In der Abbildung 3 ist eine typische Silizium Solarzelle im Schnitt dargestellt. Silizium ist ein Elementarhalbleiter aus der 4. Gruppe des Periodensystems und besitzt folglich 4

¹ Durch den freundlichen Hinweis von Jan-Christian Ohrt, Stromnetz Hamburg, Hamburg, 2022

Valenzelektronen. Reines Silizium bildet ein stabiles Kristallgitter, indem sich benachbarte Atome jeweils ein Elektronenpaar teilen. Ohne äußere Einflüsse befinden sich im perfekten Kristallgitter keine freien Elektronen. Für die Stromerzeugung sind freie Elektronen jedoch nötig, folglich muss der Halbleiter, in diesem Fall Silizium, dotiert werden, um freie Elektronen für die Stromerzeugung zur Verfügung zu haben. Dotierung bedeutet, dass Atome aus der 3. und 5. Gruppe des Periodensystems beispielsweise Bor (p-Dotierung) und Phosphor (n-Dotierung) in ein Siliziumgitter eingebaut werden. Das Ergebnis dieser ‚Verunreinigung‘ ist, dass im Halbleiter mit p-Dotierung zu wenig Elektronen für die Verbindung eines stabilen Kristallgitters zur Verfügung stehen, sogenannte Löcher, und im Halbleiter mit n-Dotierung zu viele.

Ein p-n-Übergang entsteht, sobald ein n-dotierter und ein p-dotierter Halbleiter in Kontakt gebracht werden. Freie Elektronen aus dem n-Halbleiter diffundieren in den p-Halbleiter und Elektronenlöcher aus dem p-Halbleiter in den n-Halbleiter. Durch diesen Vorgang entsteht auf der p-dotierten Seite eine negative und auf der n-dotierten Seite eine positive Raumladungszone (Quaschnig, 2019).

Löst nun ein auftreffender Sonnenstrahl ein Elektron in der p-Schicht aus dem Kristallgitter, so wird dieses negativ geladene Teilchen von der positiven Ladung der n-dotierten Schicht angezogen, an die Stromschiene den Minuspol abgegeben und schließlich an den Pluspol zurückgegeben. Zwischen Plus und Minuspol fließende Elektronen können als Strom genutzt werden (Mertens, 2020).

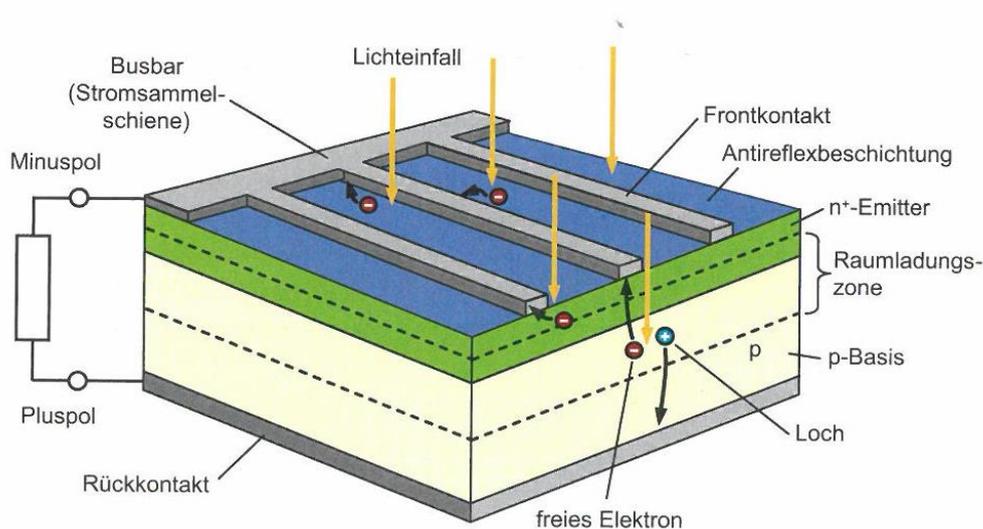


Abbildung 3: Typische Silizium-Solarzelle Quelle: (Mertens, 2020, S. 92)

2.2.2. Technologien und Bauweisen

Laut Mertens (Mertens, 2020) beträgt die Obergrenze des theoretisch erreichbaren Wirkungsgrades einer Solarzelle aus kristallinem Silizium 28,6%. Zu den unabdingbaren Verlusten, die den theoretischen Wirkungsgrad bestimmen, kommen bei einer realen Solarzelle noch Verluste durch Reflexion an der Oberfläche, Abschattung durch die Kontakte, Verluste durch Transmission, ohmsche Verluste und kombinatorische Verluste hinzu. Reflexionsverluste können durch eine Anti-Reflexionsschicht und Verschattung durch die Kontakte durch bestimmte Bauweisen minimiert werden. Sogenannte PERC-Zellen sind zusätzlich noch mit einer texturierten Oberfläche ausgestattet, welche dafür sorgt, dass Sonnenlicht noch besser zur Stromerzeugung genutzt werden kann (vgl. Abbildung 4). Die PERC Zelle erreicht so Wirkungsgrade von bis zu 24% mit guter Aussicht auf zukünftig weitere Steigerung des Wirkungsgrades (Mertens, 2020).

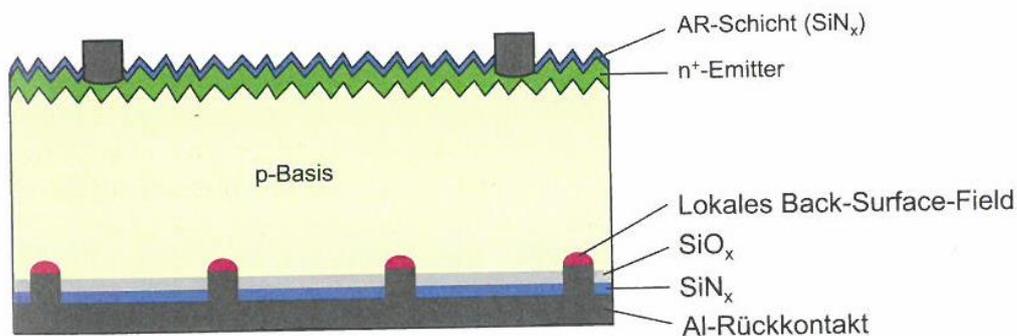


Abbildung 4: Aufbau einer PERC-Zelle Quelle: (Mertens, 2020, S. 121)

Für diese Arbeit wird mit einem marktüblichen Modulwirkungsgrad eines PERC-Moduls von 20,7 % gerechnet.²

Siliziumzellen sind mit einem Temperaturkoeffizienten von -0,4% pro Kelvin Temperaturänderung temperaturabhängig. In Abbildung 5 ist diese am Beispiel einer Bosch Solarzelle M-3BB aufgezeigt (Mertens, 2020, S. 103 f).

² Siehe Anhang 2 Datenblatt JaSolar

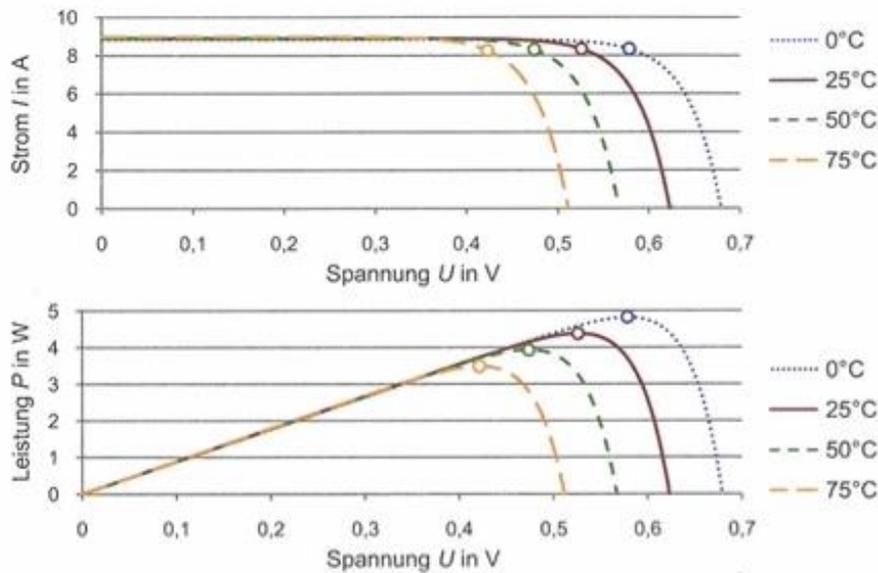


Abbildung 5: Temperaturabhängigkeit einer Si-Solarzelle am Beispiel der Bosch Solar Cell M-3BB Quelle: (Mertens, 2020, S. 104)

Die sogenannte Performance Ratio (PR) einer PV-Anlage liegt im Jahresmittel bei 80-90%. Verluste durch die Temperaturabhängigkeit der Module, Verschmutzungen, sowie Leitungs- und Wandlungsverluste sind dabei berücksichtigt (Wirth, 2022).

In dieser Arbeit wird mit einem Pauschalverlust von 14% auf den Gesamtertrag der PV-Anlage gerechnet, was einen mittleren Wert der angegebenen PR-Spanne darstellt.

2.2.3. Einfluss des Anstellwinkels

Der Anstellwinkel oder der Neigungswinkel eines PV-Moduls beeinflusst den Jahresertrag maßgeblich. Auf der nördlichen Erdhalbkugel ist über den Zeitraum eines Jahres betrachtet eine Ausrichtung nach Süden am ertragreichsten (Mertens, 2020, S. 359). Eine Erhöhung des Anstellwinkels auf 60 ° erzielt den höchsten Ertrag für die Monate Januar, Februar, Oktober, November und Dezember. Dies sind auch die heizintensivsten Monate des Jahres. Durch diese steilere Anstellung ergeben sich allerdings erhebliche Verluste für die restlichen Monate des Jahres (Quaschnig, 2019, S. 271 f).

Auf der Abbildung 6 ist der Einfluss der Ausrichtung und des Anstellwinkels auf den Jahresertrag in Hamburg dargestellt. Für den Standort Hamburg ist ein Anstellwinkel von 35 ° am ertragreichsten. Die Differenzierung des Jahresertrags auf die einzelnen Monate ist hier allerdings nicht zu erkennen. Diese findet sich in Kapitel 4.

		Neigungswinkel β																			
		0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	65°	70°	75°	80°	85°	90°	
Azimuth α	Nord	-180°	87,1	83,3	79,2	74,9	70,6	66,2	62,0	57,9	53,8	50,0	46,6	43,3	40,7	38,7	37,1	35,6	34,2	32,9	31,5
		-175°	87,1	83,3	79,2	74,9	70,6	66,2	62,0	57,8	53,7	50,0	46,5	43,2	40,6	38,7	37,1	35,6	34,1	32,8	31,5
		-170°	87,1	83,4	79,2	74,9	70,7	66,3	62,1	57,9	53,9	50,1	46,6	43,4	40,9	39,0	37,4	35,9	34,5	33,0	31,7
		-165°	87,1	83,4	79,3	75,1	70,8	66,6	62,4	58,2	54,2	50,5	47,0	43,9	41,5	39,6	38,0	36,5	35,0	33,6	32,2
		-160°	87,1	83,5	79,5	75,4	71,1	67,0	62,8	58,8	54,8	51,1	47,7	44,7	42,5	40,6	39,0	37,4	35,8	34,3	32,9
		-155°	87,1	83,6	79,7	75,6	71,5	67,4	63,4	59,4	55,5	51,9	48,6	45,9	43,8	41,9	40,2	38,4	36,9	35,3	33,8
	Nordost	-150°	87,1	83,8	80,0	76,1	72,0	68,1	64,1	60,2	56,5	53,0	49,9	47,5	45,3	43,3	41,5	39,8	38,1	36,5	34,8
		-145°	87,1	83,8	80,3	76,5	72,7	68,8	64,9	61,2	57,6	54,3	51,5	49,2	47,0	45,0	43,1	41,2	39,5	37,7	36,0
		-140°	87,1	84,0	80,7	77,1	73,4	69,6	66,0	62,4	59,0	56,0	53,3	51,0	48,8	46,8	44,8	42,9	41,1	39,2	37,4
		-135°	87,1	84,2	81,0	77,6	74,1	70,6	67,1	63,7	60,6	57,8	55,2	52,9	50,7	48,6	46,6	44,6	42,6	40,7	38,8
		-130°	87,1	84,5	81,5	78,3	75,0	71,7	68,4	65,3	62,4	59,7	57,2	55,0	52,7	50,6	48,5	46,5	44,4	42,3	40,3
		-125°	87,1	84,7	81,9	79,1	76,0	72,8	69,9	67,0	64,3	61,6	59,3	57,0	54,8	52,6	50,5	48,4	46,2	44,0	41,9
	Ost	-120°	87,1	84,9	82,5	79,8	77,0	74,2	71,4	68,7	66,2	63,7	61,5	59,2	56,9	54,8	52,6	50,4	48,1	45,8	43,6
		-115°	87,1	85,2	83,0	80,6	78,1	75,5	72,9	70,5	68,1	65,8	63,6	61,4	59,2	56,9	54,7	52,4	50,1	47,7	45,3
		-110°	87,1	85,5	83,6	81,4	79,2	76,9	74,5	72,4	70,1	68,0	65,8	63,6	61,5	59,2	56,9	54,5	52,1	49,7	47,2
		-105°	87,1	85,7	84,1	82,3	80,3	78,3	76,3	74,2	72,1	70,0	68,0	65,9	63,7	61,5	59,1	56,7	54,2	51,6	49,1
		-100°	87,1	86,1	84,7	83,1	81,5	79,7	77,9	76,1	74,2	72,2	70,2	68,1	66,0	63,7	61,3	58,8	56,3	53,5	50,9
		-95°	87,1	86,4	85,3	84,0	82,7	81,1	79,6	77,9	76,2	74,3	72,4	70,3	68,1	65,9	63,4	61,0	58,4	55,6	52,7
Südost		-90°	87,1	86,6	85,9	84,9	83,8	82,6	81,2	79,7	78,2	76,4	74,5	72,6	70,3	68,1	65,6	63,1	60,4	57,6	54,6
		-85°	87,1	87,0	86,6	85,8	85,0	84,0	82,9	81,5	80,1	78,4	76,6	74,6	72,5	70,2	67,8	65,1	62,3	59,5	56,5
		-80°	87,1	87,3	87,1	86,7	86,2	85,4	84,5	83,3	81,9	80,4	78,7	76,8	74,6	72,3	69,9	67,1	64,3	61,3	58,2
		-75°	87,1	87,5	87,7	87,6	87,3	86,7	86,0	85,0	83,8	82,4	80,7	78,8	76,7	74,3	71,8	69,1	66,2	63,0	59,7
		-70°	87,1	87,9	88,4	88,4	88,4	88,1	87,5	86,7	85,6	84,3	82,6	80,7	78,7	76,3	73,6	70,8	67,9	64,7	61,3
		-65°	87,1	88,2	88,9	89,4	89,4	89,4	88,9	88,3	87,3	86,0	84,5	82,6	80,5	78,2	75,5	72,5	69,5	66,3	62,8
Süd		-60°	87,1	88,4	89,4	90,2	90,4	90,6	90,3	89,8	88,9	87,7	86,3	84,5	82,2	79,9	77,3	74,3	71,0	67,7	64,2
		-55°	87,1	88,7	90,0	90,9	91,4	91,8	91,7	91,2	90,5	89,4	87,9	86,2	84,0	81,5	78,8	75,9	72,6	69,0	65,4
		-50°	87,1	89,0	90,4	91,6	92,4	92,9	92,9	92,6	92,0	90,9	89,4	87,7	85,6	83,1	80,2	77,3	74,0	70,3	66,5
		-45°	87,1	89,2	90,9	92,3	93,2	93,9	94,0	93,9	93,3	92,3	90,9	89,2	87,1	84,7	81,8	78,5	75,2	71,5	67,6
		-40°	87,1	89,4	91,3	92,9	94,0	94,8	95,1	95,0	94,6	93,7	92,3	90,5	88,4	85,9	83,0	79,8	76,3	72,6	68,5
		-35°	87,1	89,6	91,8	93,5	94,8	95,7	96,1	96,1	95,7	94,9	93,6	91,8	89,6	87,0	84,2	81,0	77,3	73,4	69,3
Südwest	-30°	87,1	89,8	92,1	94,0	95,4	96,4	96,9	97,0	96,7	95,8	94,6	93,0	90,8	88,1	85,1	81,9	78,2	74,2	69,9	
	-25°	87,1	90,0	92,4	94,4	95,9	97,1	97,7	97,9	97,6	96,8	95,4	93,8	91,7	89,1	86,0	82,6	78,9	74,9	70,5	
	-20°	87,1	90,1	92,7	94,8	96,5	97,7	98,3	98,6	98,3	97,6	96,3	94,5	92,3	89,8	86,8	83,3	79,5	75,4	71,0	
	-15°	87,1	90,2	92,9	95,0	96,8	98,1	98,8	99,1	98,9	98,2	97,0	95,2	93,1	90,3	87,3	83,8	80,0	75,7	71,3	
	-10°	87,1	90,3	93,1	95,3	97,1	98,5	99,3	99,5	99,4	98,6	97,5	95,8	93,6	90,9	87,7	84,2	80,3	76,1	71,6	
	-5°	87,1	90,3	93,1	95,5	97,3	98,6	99,5	99,8	99,6	98,9	97,7	96,0	93,9	91,2	88,1	84,6	80,6	76,4	71,8	
	West	0°	87,1	90,3	93,2	95,6	97,4	98,7	99,6	100,0	99,8	99,1	97,9	96,2	94,0	91,3	88,3	84,7	80,8	76,4	71,8
		5°	87,1	90,3	93,1	95,5	97,3	98,6	99,5	99,8	99,6	98,9	97,7	96,0	93,9	91,2	88,1	84,6	80,6	76,4	71,8
		10°	87,1	90,3	93,1	95,3	97,1	98,5	99,3	99,5	99,4	98,6	97,5	95,8	93,6	90,9	87,7	84,2	80,3	76,1	71,6
		15°	87,1	90,2	92,9	95,0	96,8	98,1	98,8	99,1	98,9	98,2	97,0	95,2	93,1	90,3	87,3	83,8	80,0	75,7	71,3
		20°	87,1	90,1	92,7	94,8	96,5	97,7	98,3	98,6	98,3	97,6	96,3	94,5	92,3	89,8	86,8	83,3	79,5	75,4	71,0
		25°	87,1	90,0	92,4	94,4	95,9	97,1	97,7	97,9	97,6	96,8	95,4	93,8	91,7	89,1	86,0	82,6	78,9	74,9	70,5
	Nordwest	30°	87,1	89,8	92,1	94,0	95,4	96,4	96,9	97,0	96,7	95,8	94,6	93,0	90,8	88,1	85,1	81,9	78,2	74,2	69,9
		35°	87,1	89,6	91,8	93,5	94,8	95,7	96,1	96,1	95,7	94,9	93,6	91,8	89,6	87,0	84,2	81,0	77,3	73,4	69,3
		40°	87,1	89,4	91,3	92,9	94,0	94,8	95,1	95,0	94,6	93,7	92,3	90,5	88,4	85,9	83,0	79,8	76,3	72,6	68,5
		45°	87,1	89,2	90,9	92,3	93,2	93,9	94,0	93,9	93,3	92,3	90,9	89,2	87,1	84,7	81,8	78,5	75,2	71,5	67,6
		50°	87,1	89,0	90,4	91,6	92,4	92,9	92,9	92,6	92,0	90,9	89,4	87,7	85,6	83,1	80,2	77,3	74,0	70,3	66,5
		55°	87,1	88,7	90,0	90,9	91,4	91,8	91,7	91,2	90,5	89,4	87,9	86,2	84,0	81,5	78,8	75,9	72,6	69,0	65,4
Nord	60°	87,1	88,4	89,4	90,2	90,4	90,6	90,3	89,8	88,9	87,7	86,3	84,5	82,2	79,9	77,3	74,3	71,0	67,7	64,2	
	65°	87,1	88,2	88,9	89,4	89,4	89,4	88,9	88,3	87,3	86,0	84,5	82,6	80,5	78,2	75,5	72,5	69,5	66,3	62,8	
	70°	87,1	87,9	88,4	88,4	88,4	88,1	87,5	86,7	85,6	84,3	82,6	80,7	78,7	76,3	73,6	70,8	67,9	64,7	61,3	
	75°	87,1	87,5	87,7	87,6	87,3	86,7	86,0	85,0	83,8	82,4	80,7	78,8	76,7	74,3	71,8	69,1	66,2	63,0	59,7	
	80°	87,1	87,3	87,1	86,7	86,2	85,4	84,5	83,3	81,9	80,4	78,7	76,8	74,6	72,3	69,9	67,1	64,3	61,3	58,2	
	85°	87,1	87,0	86,6	85,8	85,0	84,0	82,9	81,5	80,1	78,4	76,6	74,6	72,5	70,2	67,8	65,1	62,3	59,5	56,5	

Abbildung 6: Einfluss von Ausrichtung und Neigung auf die Jahresstrahlungssumme, Standort Hamburg Quelle: (Mertens, 2020, S. 359)

2.2.4. Nachführung von PV-Modulen

Die höchste Leistung eines PV-Moduls wird erzielt, indem es orthogonal zur Sonnen-Direktstrahlung angebracht wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass sich die Leistung eines fest montierten Moduls mit dem Gang der Sonne über den Tag ständig verändert. Die an den Sonnengang angepasste Nachführung des Moduls zur Erzeugung der maximalen

Energieausbeute ist die logische Schlussfolgerung. So wird der Ertrag an unbedeckten Tagen deutlich erhöht, da über einen längeren Zeitraum direkte Sonnenstrahlen im 90° Winkel auf das Modul treffen können (vgl. Abbildung 7). Der Ertrag durch Diffusstrahlung an bewölkten Tagen bleibt allerdings auch bei der nachgeführten Variante fast unverändert (vgl. Abbildung 7) (Mertens, 2020). Nach Quaschning (Quaschning, 2019, S. 89) kann durch Nachführung eines Moduls an einem sonnigen Wintertag bis zu 300 % Strahlungsgewinn generiert werden.

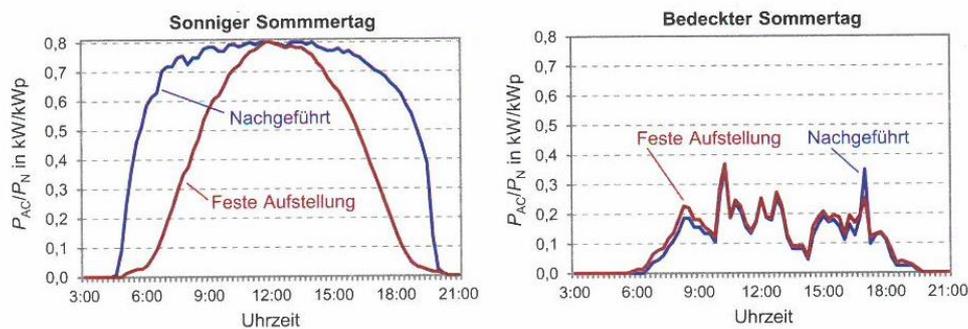


Abbildung 7: Erträge von starrer und nachgeführter PV-Anlage an zwei verschiedenen Tagen Quelle: (Mertens, 2020, S. 59) nach IBC Solar)

Die Nachführung auf täglicher Basis ist für kleine Dachanlagen aufgrund des erheblichen finanziellen Mehraufwands, der notwendigen regelmäßigen Wartung sowie des Energieaufwands für den Nachführungsmotor nicht rentabel (Quaschning, 2019, S. 90). Dennoch ist der Einfallswinkel der Sonne besonders im Hinblick auf den Betrieb einer Wärmepumpe maßgeblich, da sich der Sonnenstand nicht nur von Stunde zu Stunde ändert, sondern auch im Jahresverlauf von Winter zu Sommer (Mertens, 2020).

2.2.5. Bestrahlungsstärke auf geneigter Ebene

Die Bestrahlungsstärke auf eine geneigte Ebene ist die Summe aus direkter, diffuser und reflektierender Sonnenstrahlung. Die Berechnung der einzelnen Strahlungsanteile basiert auf Quaschning (Quaschning, 2019) ab Seite 86. Die Gesamtstrahlung auf der geneigten Ebene wird nach Gleichung (1) berechnet.

$$E_{gen} = E_{dir,gen} + E_{diff,gen} + E_{ref,gen} \quad (1)$$

Mit

$E_{dir,gen}$: direkte Strahlung auf geneigter Ebene in $\frac{W}{m^2}$

$E_{diff,gen}$: diffuse Strahlung auf geneigter Ebene in $\frac{W}{m^2}$

$E_{ref,gen}$: reflektierte Strahlung auf geneigter Ebene in $\frac{W}{m^2}$

Die Direktbestrahlung auf die geneigte Ebene wird wie folgt berechnet.

$$E_{dir,gen} = E_{dir,hor} \cdot \frac{\cos \theta_{gen}}{\sin \gamma_s} \quad (2)$$

Mit

$E_{dir,hor}$: direkte Strahlung auf horizontaler Ebene in $\frac{W}{m^2}$

$\cos \theta_{gen}$: Einfallswinkel der Strahlung auf die geneigte Ebene in *rad*

$\sin \gamma_s$: Sonnenhöhe (Elevation) in *rad*

Für die Berechnung der diffusen Strahlung auf die geneigte Ebene existieren unterschiedliche Berechnungsansätze. Hier wird der isotrope Ansatz nach Quaschnig verwendet, der auch von Mertens (Mertens, 2020, S. 55) mit dem Hinweis auf Ungenauigkeit verwendet wird.

$$E_{diff,gen} = E_{diff,hor} \cdot \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos \gamma_E) \quad (3)$$

Mit

$E_{diff,hor}$: diffuse Strahlung auf horizontaler Ebene in $\frac{W}{m^2}$

γ_E : Neigungswinkel in *rad*

Der Anteil an Reflexionsstrahlung wurde in dieser Arbeit vernachlässigt, da sie für theoretische Simulationsdaten nicht von Bedeutung ist und auch die Stärke der Reflexion stark von der Umgebung, Untergrund und Wetter abhängig ist.

2.3. Wärmepumpe

Eine Wärmepumpe ist für die Bereitstellung von Warmwasser besonders geeignet, da sie, anders als beispielsweise ein Heizstab, Strom nicht direkt in Wärme umwandelt, sondern Wärme aus der Umwelt in ihrem Temperaturniveau so anhebt, dass sie zum Beispiel zum Heizen genutzt werden kann. Dieser Prozess stellt pro verbrauchter Kilowattstunde elektrischer Energie mehrere Kilowattstunden thermischer Energie zu Verfügung (Quaschnig, 2019, S. 377 ff).

Eine Luft-Wasser Wärmepumpe gängiger Hersteller kann für jede verbrauchte Kilowattstunde elektrischer Energie bis zu 5,59 Kilowattstunden thermische Energie erzeugen. Erdsonde-Wärmepumpen oder Wasser-Wasser Wärmepumpen können sogar Leistungszahlen bis 6,96 erzielen (Quaschnig, 2019, S. 383).

2.3.1. Funktionsweise einer Kompressionswärmepumpe

Die Kompressionswärmepumpe ist die am häufigsten in Einfamilienhäusern verbaute Wärmepumpe und wird deshalb in dieser Arbeit auch ausschließlich betrachtet (Quaschnig, 2019). Abbildung 8 zeigt den Kreisprozess der Kompressionswärmepumpe.

Der Wärmepumpenkreislauf besteht grundsätzlich aus einem Verdichter, einem Expansionsventil sowie einem Verdampfer und einem Verflüssiger. Es gibt außerdem Wärmepumpen mit spezielleren Kältekreisläufen, die noch weitere Komponenten wie einen zusätzlichen Enthitzer oder Unterkühler integrieren. Hier wird allerdings ausschließlich die einfache Wärmepumpe betrachtet (Sobotta, 2018).

Mittels eines mit elektrischer Energie angetriebenen Kompressors wird ein gasförmiges Kältemittel (mit tiefer Siedepunkttemperatur) komprimiert. Durch den erhöhten Druck erhöht sich ebenfalls die Kondensationstemperatur des Kältemittels. An einem Wärmetauscher kondensiert das Kältemittel und durch die im Phasenübergang freigesetzte Energie wird das Wasser im Wärmetauscher erhitzt. Über ein Expansionsventil/Drosselventil wird das flüssige Kältemittel wieder entspannt und verdampft. Dieser Kreislauf wiederholt sich, bis zum Abschalten der Wärmepumpe (Quaschnig, 2019).

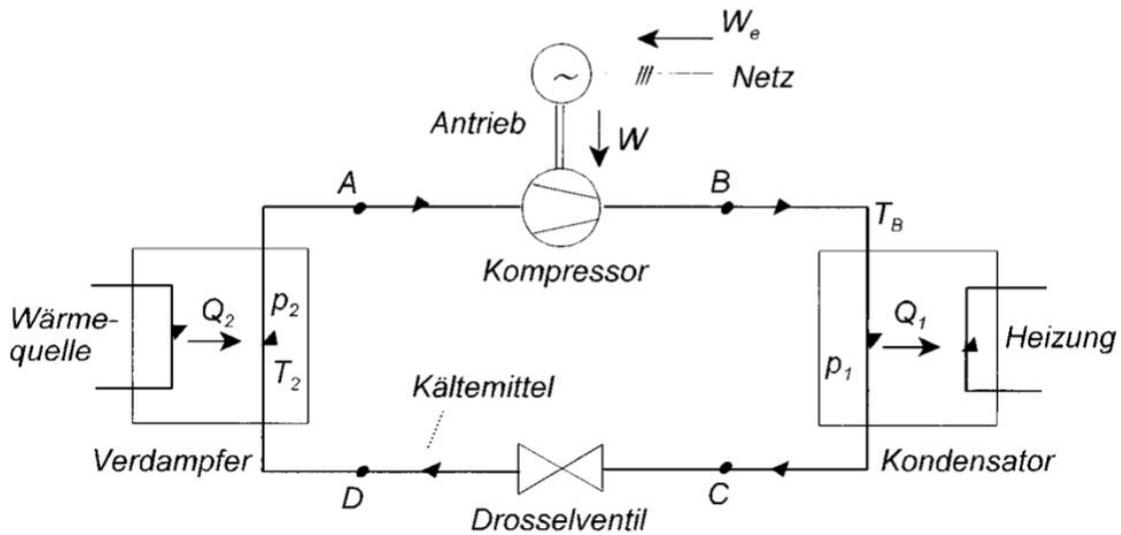


Abbildung 8: Prinzipschaltbild der Kompressionswärmepumpe Quelle: (Crastan, 2009, S. 331)

2.3.2. Theoretischer und realer Kreisprozess einer Wärmepumpe

Der ideale Kreisprozess einer Wärmepumpe, wird in Abbildung 9 als Druck-Enthalpie-Diagramm ($\log p$, h) dargestellt. Der mit ABCD bezeichnete ideale Kreisprozess beschreibt einen isobaren Vorgang im Verdampfer (D zu A), einen isentropen, reversiblen Vorgang des Kompressors (A zu B), einen isobaren Vorgang im Kondensator (B zu C) und einen isenthalpischen Vorgang des Drosselventils (C zu D).

Der reale Kreisprozess einer Wärmepumpe weicht nach Abbildung 9 von dem idealen Kreisprozess ab. Durch Reibungsverluste im Kompressionsvorgang (A zu B*) ist dieser nicht reversibel, Wärmeverluste im Kompressor und Kondensator, Druckverluste, Überhitzung des Kältemittels vor der Verdichtung kommen hinzu (Crastan, 2009, S. 325 f).

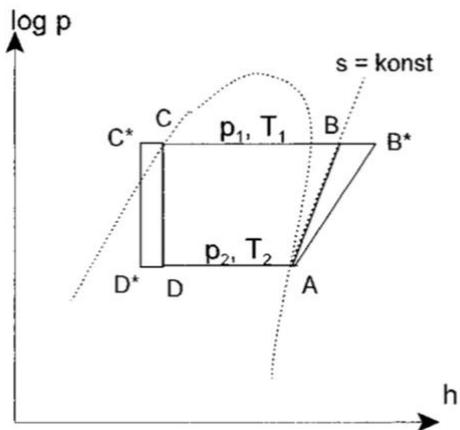


Abbildung 9: Kreisprozess der Kompressionswärmepumpe ABCD= idealisierter Kreisprozess, AB*C*D*= realer Kreisprozess
Quelle: (Crastan, 2009, S. 332)

Auf Grund der Verluste weicht die Leistungszahl (COP= Coefficient of Performance) einer realen Wärmepumpe vom idealen COP des Carnot-Prozesses ab. Diese Abweichung wird mit dem Gütegrad (η) beziffert. Der Gütegrad wird nach üblicher Definition als das Verhältnis von realem COP zu idealem COP definiert.

$$\eta = \frac{COP_{real}}{COP_{ideal}} \quad (4)$$

Der ideale COP des Carnot-Prozesses berechnet sich nach Sobotta wie folgt (Sobotta, 2018, S. 31):

$$COP_{ideal} = \frac{T_{warm}}{T_{warm} - T_{kalt}} \quad (5)$$

Mit

T_{warm} : Vorlauftemperatur inkl. Wärmeübergangstemperatur in K

T_{kalt} : Umgebungstemperatur inkl. Wärmeübergangstemperatur in K

In dieser Arbeit wird ein Gütegrad von 0,55 angenommen.

Für die in dieser Arbeit betrachteten Wärmepumpe ist die Wärmequelle die Außenluft. Durch die nicht konstante Umgebungstemperatur ändert sich der COP entsprechend. Die Luft-Wasser Wärmepumpe wurde für diese Arbeit ausgewählt, da sie einfach zu installieren ist und keine aufwändigen Genehmigungsverfahren für bspw. Tiefenbohrungen benötigt. Trotz ihrer etwas schlechteren JAZ (Jahresarbeitszahl) kann sie durchaus annehmbare Werte schaffen, die dem geringeren Investitionsaufwand entsprechen, wie im Folgenden noch gezeigt wird. Die Leistungszahl ist dabei immer abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft und der gewünschten Innenraumtemperatur.

Wichtig für den Einbau einer Wärmepumpe ist die über ein Jahr gemittelte Leistungszahl. Gerade bei Bestandsgebäuden hängt von dieser auch die Förderung einer Wärmepumpe an. Generell gilt, je niedriger die Vorlauftemperatur der Heizungsanlage und je besser die Dämmung des Gebäudes, desto höher ist auch die JAZ der Wärmepumpe, vorausgesetzt diese ist richtig dimensioniert (Quaschnig, 2019).

Die JAZ berechnet sich aus dem Verhältnis von abgegebener Wärmeleistung zu aufgenommener elektrischer Leistung und soll nach Goeke (Goeke, 2021, S. 256) für eine Luft-Wasser Wärmepumpe bei Nutzung für Heizung und Trinkwarmwasser minimal 3,3 betragen.

2.3.3. Auslegung und Regelung einer Wärmepumpe

Für diese Arbeit wird die monoenergetische Betriebsweise einer Wärmepumpe betrachtet (vgl. Abbildung 10), was bedeutet, dass Strom die einzige Energiequelle für die Wärmeerzeugung und/ oder die Trinkwarmwassererzeugung des Gebäudes ist.

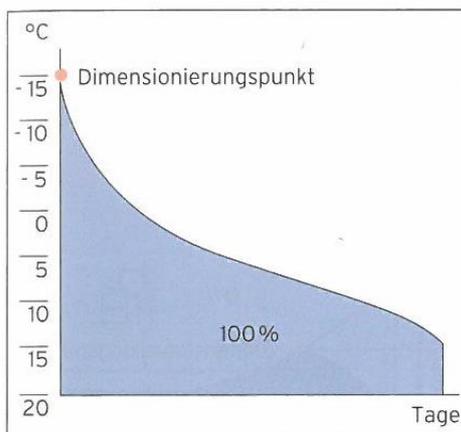


Abbildung 3.61: Monovalente Betriebsweise

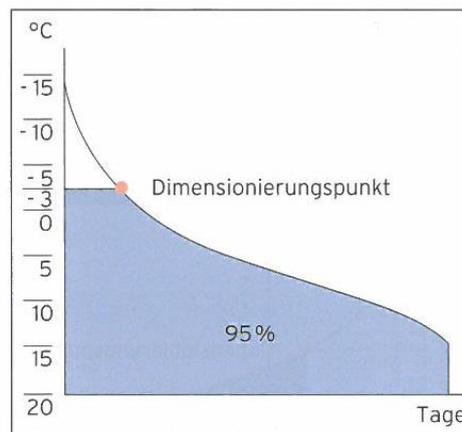


Abbildung 3.62: Monoenergetische Betriebsweise

Abbildung 10: Monovalente und Monoenergetische Betriebsweise einer Wärmepumpe Quelle: (Sobotta, 2018, S. 83)

Bis zu einer festgelegten Temperatur kann die Wärmepumpe dabei das Gebäude noch alleine mit genügend Heizwärme versorgen. Kommt es zu einer Unterschreitung dieser Temperatur, wird die Wärmebereitstellung von beispielsweise einer Elektro-Zusatzheizung unterstützt. Dieser Dimensionierungspunkt heißt Bivalenzpunkt und ist in Abbildung 11 dargestellt (Sobotta, 2018, S. 159 f).

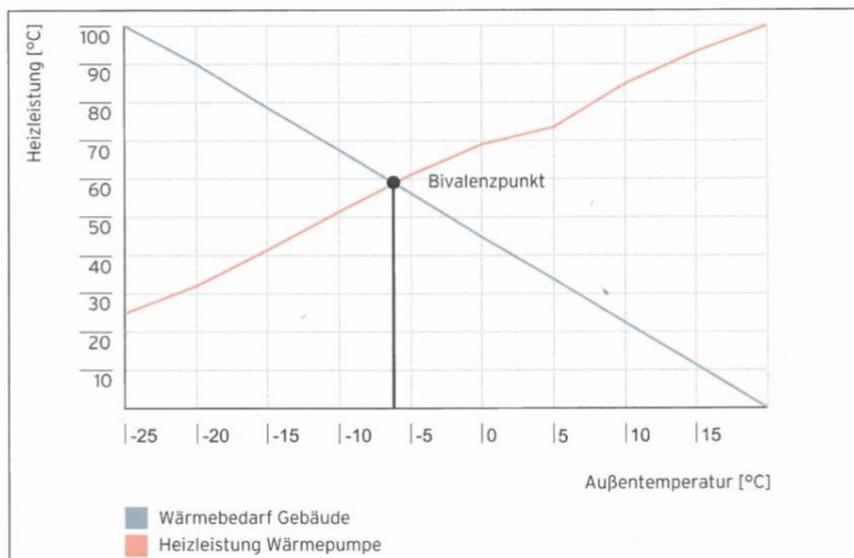


Abbildung 11: Verhältnis Wärmebedarf Gebäude zur Heizleistung der Luft/Wasser-Wärmepumpe Quelle: (Sobotta, 2018, S. 158)

Die Regelung der Wärmepumpe und auch die Dimensionierung des Bivalenzpunktes muss auf die Bedingungen, unter denen sie arbeiten soll, zugeschnitten sein. Sie regelt unter anderem die maximale Einschaltzeit pro Stunde und die Mindestlaufzeit des Kompressors unter den gegebenen Witterungsumständen (Sobotta, 2018, S. 69).

Wärmepumpen lassen unterschiedlichste Arten der Regelung zu. Nach Hersteller Vaillant regelt die Wärmepumpe abhängig von der Außentemperatur die Vorlaufsolltemperatur. Die Sollraumtemperatur kann dabei im Vorhinein eingestellt werden. Die Warmwasserbereitstellung ist von dieser Änderung der Vorlauftemperatur nicht abhängig und kann durch eine Elektro-Zusatzheizung konstant gehalten werden (Vaillant GmbH, 2020).

In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass die Wärmepumpe in ihrer Leistungsaufnahme nicht regelbar ist und lediglich mit Maximalleistung betrieben werden kann. Weiterhin wurde für diese Arbeit eine konstant zu haltende Innenraumtemperatur von 21° angenommen. Der Bivalenzpunkt wurde für eine Temperatur von -5°C festgelegt.

2.4. Energiespeicher

Die Nutzung von thermischen oder elektrochemischen Speichern kann den überschüssigen, nicht direkt verbrauchten Strom einer PV-Anlage direkt oder indirekt auffangen und so der Autarkiegrad eines Gebäudes vom öffentlichen Stromnetz durch Speicher erhöht werden. Die

Auswirkungen auf den Autarkiegrad hängen von der Größe des Systems und dessen Beschaffenheit sowie dem Verbrauch des Gebäudes ab (Goeke, 2021, S. 9 ff).

2.4.1. Thermische Speicher

Die Notwendigkeit eines thermischen Speichers bei Installation einer Wärmepumpe ist in fast allen Fällen gegeben. Überschüssige Wärme kann zwischengespeichert werden und somit die Taktung der Ein/- und Ausschaltung verringert werden.

Als thermische Speicher können viele unterschiedliche Medien wie Wasser, Gestein, Erdreich oder Sole dienen. Am häufigsten im Einfamilienhaus Bereich ist jedoch der Wasserspeicher, in dem Wärme effektiv und kostengünstig zwischengespeichert werden kann. Anhand der Speichergröße kann die zu überbrückende Zeit dem Bedarf des Gebäudes angepasst werden.

Thermische Warmwasserspeicher, in zylindrischer Grundform mit Anschlüssen für die Be- und Entladung, werden im Einfamilienhaussektor hauptsächlich als Tagespufferspeicher eingesetzt. Saisonale Speicher, die zu Nahwärmenetzen zusammengeschlossen werden, werden hier nicht betrachtet. Sinnvoll ist die Platzierung des Pufferspeichers innerhalb der thermischen Gebäudehülle, um Wärmeverluste so gering wie möglich zu halten.

Pufferspeicher werden sowohl zur Trinkwarmwasserunterstützung sowie für die Heizungsanlage genutzt. Die Hauptaufgabe des Pufferspeichers ist, den Betrieb der Wärmepumpe zu unterstützen und dafür zu sorgen, dass die Ein- und Ausschaltzeiten der Wärmepumpe in geregelten Zeitintervallen laufen können, ohne dass dabei elektrische Energie „verschenkt“ wird. Die Jahresarbeitszahl (siehe S.18 unten) der Wärmepumpe kann so verbessert und die Energiekosten dezimiert werden (Goeke, 2021, S. 6 ff).

Strom wird mit der Wärmepumpe in thermische Energie umgewandelt, im Pufferspeicher zwischengespeichert und bei Bedarf dem Heizkreislauf wieder zur Verfügung gestellt. Wie viele Stunden ein thermischer Wärmespeicher dabei überbrücken kann hängt stark mit der Gebäudebeschaffenheit zusammen. Je weniger Wärmeverluste ein Gebäude nach außen hat, desto länger kann der Pufferspeicher das Heizsystem unterstützen. Ähnlich sieht es mit den Vorlauftemperaturen der Heizung aus. Je geringer diese ist und je großflächiger die Heizkörper (Flächenheizung an Wand oder Decke) ausgelegt sind, desto tiefer kann der Speicher entladen werden und dabei noch effektiv heizen (Goeke, 2021, S. 9 f).

Der Pufferspeicher hilft außerdem bei der Überbrückung der Sperrzeiten durch den Energieversorger (Sobotta, 2018, S. 167).

Die speicherbare Wärmemenge hängt stark von der Vorlauftemperatur des Heizsystems ab. Je niedriger diese im Vergleich zur Bereitstellungstemperatur im Speicher ist, desto länger kann dem Heizsystem die Wärme zu Verfügung gestellt werden.

Die Vorlauftemperatur für Trinkwarmwasser (65°C) ist in der Regel deutlich höher als die von Heizwarmwasser und kann von einer Wärmepumpe allein nicht sinnvoll zur Verfügung gestellt werden. Die Unterstützung der WP durch einen Durchlauferhitzer oder eine kleine Gastherme, die das Temperaturniveau des im Pufferspeicher angewärmten Wassers für Trinkwarmwasser erhöhen, sind in modernen Heizanlagen keine Seltenheit.

Anders sieht es mit modernen Trinkwarmwasserversorgung aus, die kein Kaltwasser beimischen und somit auch mit einer Temperatur von 55 °C auskommen. Ein Vorteil eines solchen Systems ist die geringe Ablagerung von Kalk und anderen Ausfallstoffen, die ab 65°C Wassertemperatur deutlich in die Höhe steigen (Hartmann & Schwarzbürger, 2009, S. 48).

In dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass der thermische Pufferspeicher innerhalb der Gebäudehülle aufgestellt wird, Heizungs- und Trinkwarmwasser bereitet und Trinkwarmwasser mit einer Temperatur von 55°C zur Verfügung gestellt wird.

Arten thermischer Speicher

Es gibt unterschiedliche Arten und Betriebsweisen thermischer Wasserspeicher. Allgemein ist dabei der Wärmeüberträger im unteren Teil des Speichers angebracht, damit das erhitzte Wasser nach dem Prinzip der Schwerkraft im Speicher geschichtet wird. So kann in einem Speicher Wasser mit unterschiedlichen Temperaturniveaus zur Verfügung gestellt werden. Besonders für den einen gemeinsamen Speicher (Kombispeicher) von Heizung und Trinkwarmwasser eignet sich dieses Prinzip (Goeke, 2021).

In dieser Arbeit wird die Art des thermischen Speichers nicht genauer untersucht. Es wird aber von einem einheitlichen Temperaturniveau und räumlicher Abgrenzung von Heiz- und Trinkwarmwasser ausgegangen.

2.4.2. Elektrochemische Speicher

Elektrische Energie wird für einen von der Produktion zeitversetzten Zeitpunkt gespeichert. wiederaufladbare Batterien, Akkumulatoren, vor allem Bleibatterien und Lithium-Ionen Batterien finden in der Anwendung in Kopplung mit PV-Systemen Anwendung. Die Tendenz verschiebt sich immer mehr in Richtung Lithium-Ionen Batterien, bei Großhändlern für Photovoltaik, wie Memodo oder SegenSolar lassen sich auf Anfrage kaum noch Bleiakkumulatoren kaufen. Speichersysteme unterliegen der stetigen Weiterentwicklung zur Steigerung der spezifischen Energie und Leistung sowie der Kostenreduktion (Jossen & Weydanz, 2019, S. 193). Die Speicherung von erzeugtem PV-Strom ohne die Umwandlung in eine andere Energieform, wie z.B. thermische Energie, ist so in speziellen Fällen bereits rentabel (Mertens, 2020, S. 255 f).

Die Funktionsweise einer elektrochemischen Batterie

Abbildung 12 zeigt den Prozess der elektro-chemischen Speicherung wie er auch in Lithium Ionen Akkus funktioniert.

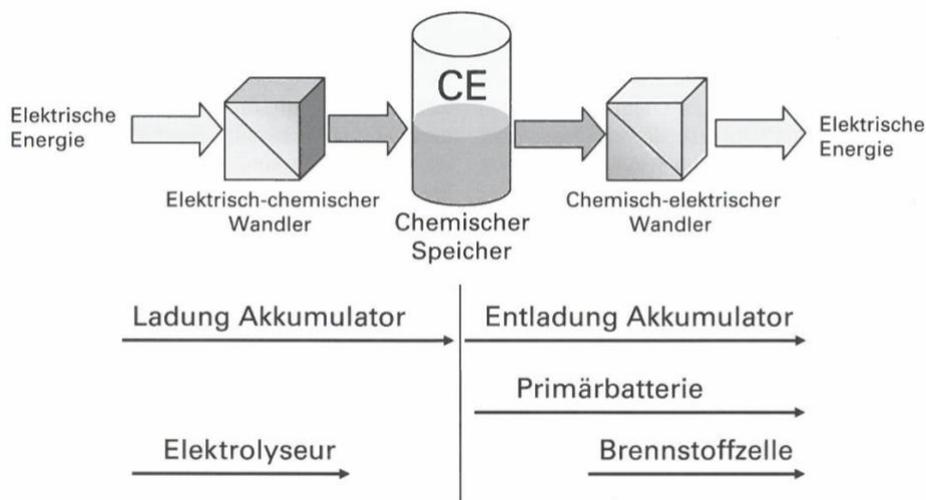


Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines elektrochemischen Speichers (CE: Chemische Energie) Quelle: (Jossen & Weydanz, 2019, S. 6)

Ein Akkumulator besteht aus einer oder mehreren wiederaufladbaren Zellen. Eine Zelle besteht aus einem Elektrodenpaar, das in ein Elektrolyt getaucht ist und einem Separator, der die Elektroden voneinander trennt, die in einem Gehäuse eingeschlossen sind. Die Elektroden beinhalten das für die sogenannte Red-Ox-Reaktion notwendige Aktivmaterial. Die Red-Ox-Reaktion macht die Speicherung von elektrischer Energie als chemische Energie möglich. An

jeweils einer der beiden Elektroden werden Elektronen abgegeben, das Aktivmaterial damit oxidiert und an der anderen Elektrode werden Elektronen aufgenommen, das Aktivmaterial damit reduziert. Das Elektrolyt fungiert dabei als Ionenleiter, durch das die Ionen transportiert werden. Die Oxidations-Elektrode heißt Anode und die Reduktions-Elektrode Kathode. Welche der beiden Elektroden dabei welche ist, hängt davon ab, ob der Akkumulator ge- oder entladen wird. Abbildung 13 zeigt eine elektrochemische Zelle während des Entladevorgangs (Jossen & Weydanz, 2019, S. 7).

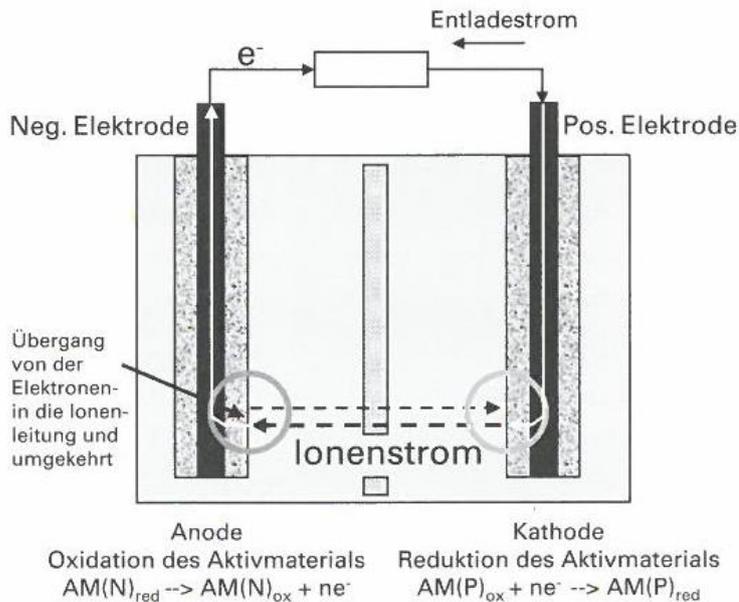


Abbildung 13: Schema einer elektrochemischen Zelle für den Fall der Entladung Quelle: (Jossen & Weydanz, 2019, S. 7)

Alterung von Lithium-Ionen Akkumulatoren

Wie bei allen elektrochemischen Batterien, verliert auch eine Lithium-Ionen-Batterie mit laufendem Alter an Kapazität. Bei 80% ihrer ursprünglichen Kapazität gilt sie als defekt (Quaschnig, 2019, S. 248). Irreversible Nebenreaktionen, die durch die hohen Spannungen von Lithium-Ionen-Batterien begünstigt werden, limitieren die Lebensdauer dieser Batterie. Die Schnelligkeit des Leistungsabfalls ist abhängig von Materialqualität, Betriebsbedingungen und Nutzverhalten durch die Besitzer*innen. Die Temperatur ist hierbei ein besonders wichtiger Faktor. So sollte die Batterie nie zu kalt oder zu heiß gelagert werden. Abbildung 14 zeigt hier den Zusammenhang zwischen Lagertemperatur und der reversiblen und irreversiblen Kapazitätsverluste in % pro Monat. Lithium-Ionen Batterien sind für den Betrieb für Temperaturen größer 0°C bis 40°C ausgelegt, daher sollten sie in Innenräumen aufgestellt werden. (Jossen & Weydanz, 2019, S.

168 f) In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Batterie bei Raumtemperatur aufgestellt wird.

Der optimale Ladezustand einer Lithium-Ionen Batterie ist bei ca. 30 bis 35%, mit dem sie auch vom Werk ausgeliefert werden (BYD Lithium Battery Company) Bei diesem Ladezustand kann die Batterie bis zu 6 Monate selbstentladen ohne Tiefenentladung (Jossen & Weydanz, 2019, S. 167).

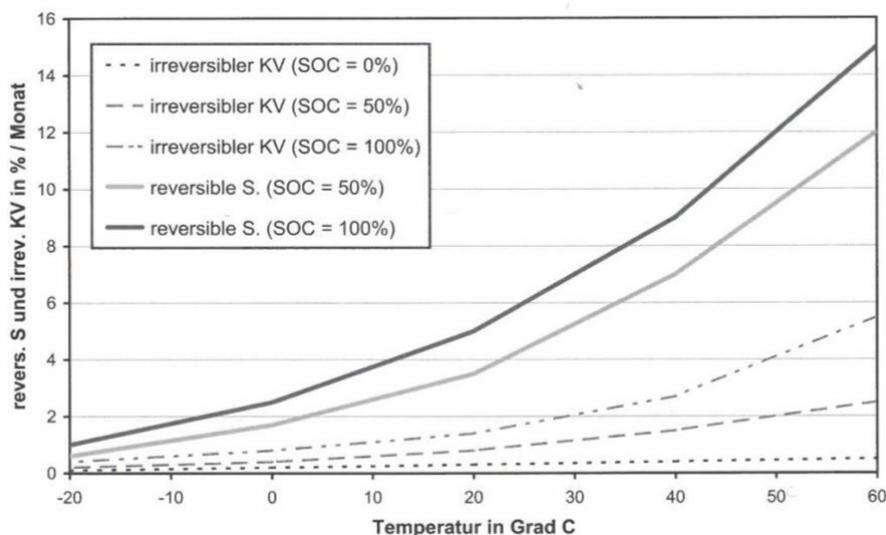


Abbildung 14: Schematische Darstellung der reversiblen Selbstentladung S und des irreversiblen Kapazitätsverlustes KV in Abhängigkeit vom Ladezustand (SOC) und der Temperatur für eine Lithium-Ionen Zelle Quelle (Jossen & Weydanz, 2019, S. 168)

Zusätzlich hat die Höhe der Laderate einen Einfluss auf die Langlebigkeit eines Lithium-Ionen Akkumulators. Je niedriger diese ist, desto mehr Ladezyklen (sowohl Voll- als auch Teilladezyklen) kann der Akkumulator durchlaufen, bevor er defekt ist (Quaschnig, 2019, S. 248).

Abhängig vom Jahresstromverbrauch sollte der Speicher so angepasst werden, dass er seine nutzbare Speicherkapazität komplett ausnutzt, ohne dabei zu tief zu entladen. Laut gängigen Herstellern können die modernen Lithium-Ionen Batterien bis zu 100% entladen werden (IBC Solar).

Für diese Arbeit wurde ein Maximalentladung bis 90% festgelegt, auf die Alterung der Batterie keine gesonderte Rücksicht genommen.

3 Methodik

Für die Simulation in dieser Arbeit wurde für ein Beispiel Bestandsgebäude, sowie für ein Beispiel Niedrigenergiehaus eine Jahressimulation der Energieverbräuche für Heizung, Haushaltsstrom und Trinkwarmwasser angelegt. Abbildung 15 zeigt das Energiefließbild der erstellten Simulation. Die blauen Beziehungen zeigen dabei den Verlauf der elektrischen Energie und die roten den Verlauf der thermischen Energie. Das System besteht aus einer PV-Anlage mit einem Batteriespeicher, einer Wärmepumpe mit Pufferspeicher und Heizstab. Für die Bereitstellung des Trinkwarmwassers ist für das Niedrigenergiehaus außerdem ein elektrischer Durchlauferhitzer vorgesehen. Bei einer Differenz zwischen Ertrag und Last des Systems gleicht der Netzanschluss diese aus.

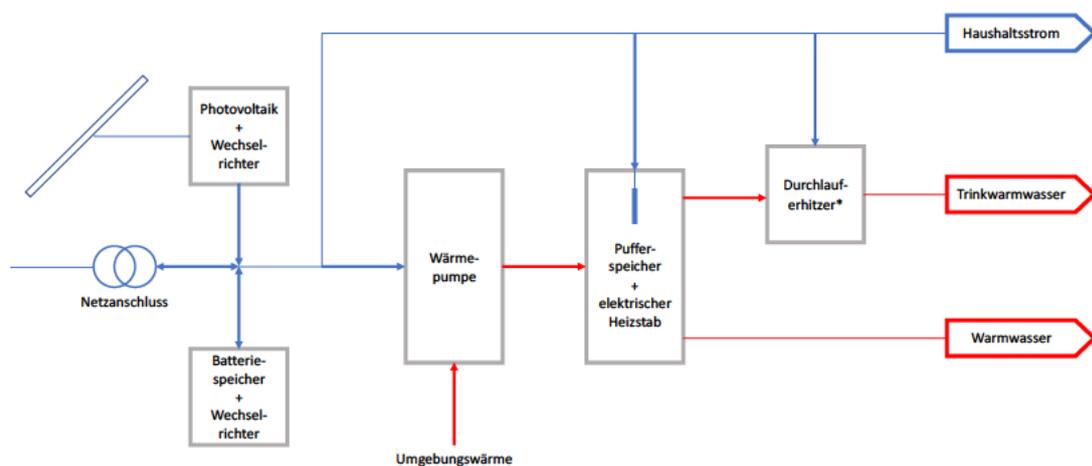


Abbildung 15: Energiefließbild der Simulationsanlage

Die Simulation berechnet den PV-Ertrag und die Verbräuche für Trinkwarmwasser, Heizenergie und Haushaltsstrom. Danach wird anhand des jeweiligen COPs der Strombedarf für die Wärmepumpe ermittelt. Der Strombedarf der Wärmepumpe ergibt sich aus dem Wärmebedarf und der Wärmebedarf ergibt sich über die VDI aus dem Heizenergiebedarf. Nach Priorisierungsreihenfolge werden die Verbraucher mit dem PV-Strom bedient. Über die Anpassung der Parameter Anstellwinkel und Batteriespeicherkapazität wird die Auswirkung auf die Eigenverbrauchsanteile ermittelt. Mit den Simulationsergebnissen wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, die die Fragestellung dieser Arbeit beantwortet.

3.1. Vergleichsgebäude

Im Folgenden werden zwei beispielhafte Einfamilienhäuser mit 150 m² Wohnfläche und 4 Bewohner*innen simuliert. Es soll zum einen ein Gebäude mit dem durchschnittlichen Energieverbrauch eines Bestandsgebäudes und zum anderen ein Gebäude mit deutlich niedrigerem Energieverbrauch, ein Niedrigenergiehaus, definiert werden.

3.1.1. Repräsentatives Bestandsgebäude

Die Gebäudetypologie, die im Rahmen des EU-Projekts Tabula entwickelt wurde, kategorisiert Bestandsgebäude nach Baujahr in Typen von A bis J. Die Zuordnung geschieht dabei über den Aufbau der einzelnen Bauteile des Gebäudes, sowie die typische Bauweise in einer bestimmten Zeit. Für die Definition des Vergleichsgebäudes wurde die Gebäudetypologie herangezogen, da sie Auskunft über die Häufigkeit der einzelnen Gebäudetypen in Deutschland gibt. Die Vergleichsgebäude sollen repräsentativ für den Gebäudebestand in Deutschland herangezogen werden. Besonders repräsentativ sind Gebäude entsprechend der Baualtersklasse E und F, denn aufgrund der hohen Bauaktivität nach dem 2. Weltkrieg sind diese am häufigsten vertreten (vgl. Tabelle 1) (Loga et al., 2015).

Tabelle 1: Wohnflächen und Häufigkeiten im Deutschen Wohngebäudebestand/ Basis-Typen/ Baujahr bis 2009, Mai 2011, Quelle: (Loga et al., 2015, S. 18)

Auswertung der Gebäude- und Wohnungszählung 2011 Stichtag: 9.5.2011		Baualtersklassen										Summe	Anteil
		bis 1860	1861 - 1918	1919 - 1948	1949 - 1957	1958 - 1968	1969 - 1978	1979 - 1983	1984 - 1994	1995 - 2001	2002 - 2009		
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Deutscher Wohngebäudebestand Baujahre bis 2009	EFH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	330	966	1.131	859	1.509	1.507	704	1.160	1.035	775	9.976	55%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	399	1.213	1.389	1.060	1.948	1.915	881	1.397	1.204	858	12.263	31%
	Wohnfläche in Mio. m ²	46	135	150	116	218	233	110	178	158	119	1.463	41%
	RH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	148	492	710	447	633	611	335	652	619	384	5.030	28%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	181	617	840	546	749	685	374	722	674	409	5.796	15%
	Wohnfläche in Mio. m ²	19	62	82	52	76	79	45	85	80	52	633	18%
	MFH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	54	442	388	356	586	412	146	309	244	85	3.023	17%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	214	2.177	1.911	2.003	3.348	2.313	852	1.826	1.390	461	16.495	42%
	Wohnfläche in Mio. m ²	16	163	129	125	225	169	64	133	104	39	1.168	33%
	GMH												
	Anzahl Wohngebäude in Tsd.	0,6	28,7	7,4	17,3	34,0	50,1	15,0	28,7	20,9	7,6	210	1%
	Anzahl Wohnungen in Tsd.	11	526	126	308	818	1.366	356	605	408	151	4.674	12%
	Wohnfläche in Mio. m ²	0,7	35,8	7,9	17,0	47,1	86,7	21,9	34,8	25,5	10,4	288	8%
Anzahl Wohngebäude in Tsd.	533	1.929	2.236	1.679	2.762	2.580	1.200	2.150	1.919	1.251	18.239		
Anteil	3%	11%	12%	9%	15%	14%	7%	12%	11%	7%			
Anzahl Wohnungen in Tsd.	806	4.533	4.265	3.915	6.863	6.279	2.463	4.550	3.675	1.880	39.228		
Anteil	2%	12%	11%	10%	17%	16%	6%	12%	9%	5%			
Wohnfläche in Mio. m²	82	396	370	309	567	569	240	431	368	220	3.552		
Anteil	2%	11%	10%	9%	16%	16%	7%	12%	10%	6%			

Gewählte Zuordnung: EFH: freistehende Ein-/Zweifamilienhäuser; RH: Ein-/Zweifamilienhäuser als Doppelhaushälfte, Reihenhäuser oder sonstiger Gebäudetyp
 MFH: Mehrfamilienhäuser mit 3-12 Wohnungen, GMH: Mehrfamilienhäuser ab 13 Wohnungen
 Die Angaben beziehen sich ausschließlich auf Wohngebäude (ohne Wohnheime, ohne "sonstige Gebäude mit Wohnraum", ohne "bewohnte Unterkünfte")

Für das Beispiel Bestandsgebäude wurde ein Jahresheizenergiebedarf gemäß eines Gebäudes der Baualterklasse E von $180 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ angesetzt (Loga et al., 2015, S. 40).

3.1.2. Niedrigenergiegebäude

Für den Begriff Niedrigenergiehaus gibt es in Deutschland keine eindeutige Definition. Als Niedrigenergiehaus gilt ein Gebäude, welches einen geringeren Jahresheizenergiebedarf aufweist, als es ein zulässiger Neubau heute täte (Diefenbach, Loga, & Born, 2005). Im GEG wird diese Verallgemeinerung nach §15 Absatz 1 folgendermaßen formuliert:

„Ein zu errichtendes Wohngebäude ist so zu errichten, dass der Jahres-Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasserbereitung, Lüftung und Kühlung das 0,75fache des auf die Gebäudenutzfläche bezogenen Wertes des Jahres-Primärenergiebedarfs eines Referenzgebäudes, das die gleiche Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung wie das zu errichtende Gebäude aufweist und der technischen Referenzausführung der Anlage 1 entspricht, nicht überschreitet.“

Die entsprechende Anlage 1 ist im Anhang des GEG zu finden und definiert Höchstwerte für Durchgangskoeffizienten.

Nach gängigen Maßstäben werden alle Gebäude mit einem Heizenergiebedarf $\leq 70 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ als Niedrigenergiehaus betitelt (Diefenbach, Loga, & Born, 2005, S. 19). Für diese Arbeit wird demnach der Grenzwert $70 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ als Heizenergiebedarf für das Niedrigenergiehaus angenommen.

Tabelle 2 stellt die beiden Vergleichsgebäude anhand der wichtigsten Parameter dar.

Tabelle 2: Die wichtigsten Parameter der Vergleichsgebäude für die Auslegung von PV, WP und Speichern

	Einheit	Bestandhaus Klasse E	Niedrigenergiehaus
Beheizte Wohnfläche	m^2	150	150
Jahresheizenergiebedarf	$\frac{kWh}{(m^2 \cdot a)}$	180	70
Dachausrichtung		Süd/Nord	Süd/Nord
Dachneigung	°	45	45
Vorlauftemperatur Heizung	°C	55	35

Temperatur Warmwasser	°C	55	55
Heizgrenztemperatur	°C	15	12
Jahresstromverbrauch	kWh	3000-6000	3000-6000
Heizenergiebedarf	kWh	27000	10500
Energiebedarf Warmwasser für 4 Personen nach VDI	kWh	2000	2000
Art der Heizung		Radiatoren	Flächenheizung

3.2. Lastprofile der Vergleichsgebäude

Die Aufteilung des Jahresstromverbrauchs, des Jahresheizenergiebedarfs und des Trinkwarmwasserbedarfs ist mittels der VDI 4655 Norm (VDI e.V., 2021) anhand der Einteilung der Tage in Typtage (TT) geschehen. In Tabelle 3 sind die unterschiedlichen Typtage dargestellt. Die VDI Norm unterscheidet in der Typtagsystematik zwischen dieser einfachen und einer abgeänderten Variante, die den Betrieb einer Photovoltaikanlage mitberücksichtigt. Da die Ertragsdaten für eine PV-Anlage in dieser Arbeit extern dazu gerechnet werden, wird hier die vereinfachte Typtagsystematik gewählt.

Tabelle 3: Systematik der Typtagkategorien Quelle: (VDI e.V., 2021, S. 5)

Jahreszeit	Werktag (W)		Sonntag (S)	
	heiter (H)	bewölkt (B)	heiter (H)	bewölkt (B)
Übergang (Ü)	ÜWH	ÜWB	ÜSH	ÜSB
Sommer (S)	SWX		SSX	
Winter (W)	WWH	WWB	WSH	WSB

Je nach Standort in Deutschland sind die Typtage in unterschiedlicher Anzahl über das Jahr verteilt. Für diese Arbeit wurde der Standort Fuhlsbüttel in Hamburg gewählt, welcher sich nach VDI 4655 in Zone 3, der 15 möglichen Zonen befindet. Für Zone 3 ist das Jahresmittel der Außentemperatur 8,5 °C. Die VDI 4655 legt die 15 Testreferenzjahr(TRY)-Klimazonen

des DWD zugrunde, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch für die Auslegung der Wärmepumpe und der PV-Anlage herangezogen werden.

Der Datensatz des TRY mit Wochentagzuordnung des Kalenderjahrs 2014 inklusive der Verteilungsfaktoren der Typtage auf 15-minütiger Ebene pro Tag stehen auf der zur VDI zugehörigen CD zur Verfügung. Hier gibt es die Unterscheidung zwischen Bestandsgebäude und Niedrigenergiehaus.

3.3. Auslegung der Speichervolumen, Speicherkapazität und Wärmeverluste

3.3.1. Normheizlast

Für die Auslegung des Wärmeerzeugers und der thermischen Speicher ist die Norm-Heizlast eine berechnungsrelevante Größe. Die theoretische Bestimmung dieser wird mittels DIN EN 12831 durchgeführt. In der DIN SPEC 15378, die eine nationale Ergänzung der DIN EN 15378-1 darstellt, ist im Anhang A eine Grafik zur Abschätzung der Norm-Heizlast dargestellt (DIN SPEC 15378:2018-08, 2018, S. 50). Dies stellt allerdings nur eine vereinfachte Abschätzung der Heizlast dar. Desweiteren gilt, dass die Trinkwassererwärmung vernachlässigbar ist, sofern sie größentechnisch im Vergleich zur Heizleistung unbedeutend ist (DIN EN 12831, 2003). Da die Trinkwassererwärmung für die Beispielhäuser dieses Kriterium nach eigenem Ermessen erfüllt, wurde die dafür benötigte Leistung hier vernachlässigt. Für die in dieser Arbeit betrachteten Gebäude wurden nach Abbildung 16 folgende Werte als Norm-Heizlast festgelegt.

Bestandsgebäude: 24 kW

Niedrigenergiehaus: 8 kW

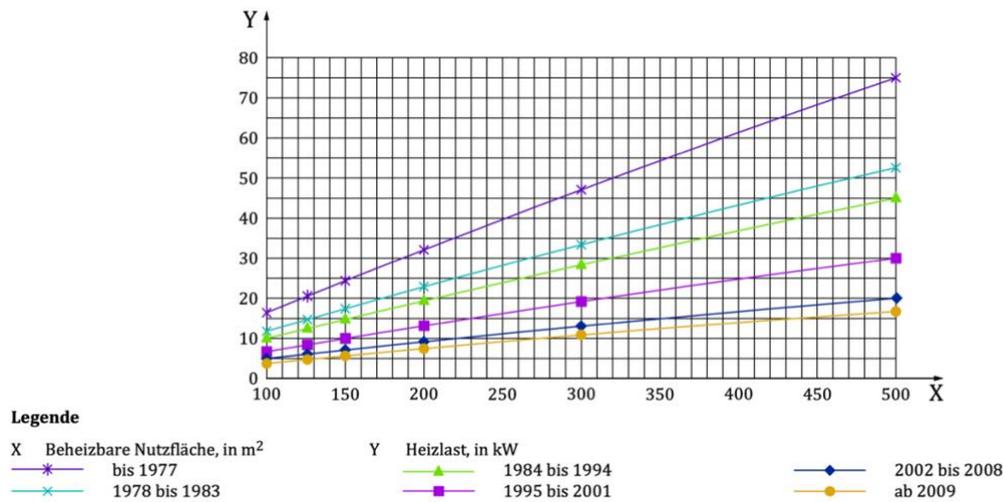


Abbildung 16: Abschätzung der Heizlast in Abhängigkeit von beheizter Fläche und Wärmeschutzstandart (Baualtersklasse) des Gebäudes- 100 m² bis 500 m² Quelle: (DIN SPEC 15378:2018-08, 2018, S. 50)

3.3.2. Speichervolumen

Je nach Wärmeerzeuger und Art und Größe der Heizflächen kann die Auslegung des Pufferspeichervolumens variieren. Gleichung 6 von Sobotta (Sobotta, 2018, S. 170) bietet die Möglichkeit, das Speichervolumen grob abzuschätzen. Sperrzeiten der Wärmepumpe durch den Energieversorger und die Wärmepumpenleistung werden hierbei berücksichtigt.

$$m = \frac{Q}{(c \cdot \Delta T)} \text{ mit } Q = P \cdot t \quad (6)$$

Mit

m : Masse des Pufferspeichers in m³

Q : Wärmeenergie

P : Heizleistung Wärmepumpe in kW

t : Überbrückungszeit in h ($t_{\min} = 20$ min; $t_{\max} = 2$ h)

$c = 1,163 \frac{Wh}{kg \cdot K} = 4180 \frac{J}{kg \cdot K}$: spezifische Wärmekapazität von Wasser

ΔT : Temperaturdifferenz zw. Vorlauf und Rücklauf in K ($\Delta T_{\min} = 5$ K; $\Delta T_{\max} = 10$ K)

Je kleiner der Pufferspeicher desto höher die Taktung der Wärmepumpe (vgl. Kapitel 2.4.1.) Es wird daher angenommen, dass der Speicher mindestens 1 h überbrücken können muss, obwohl vom Stromnetz Hamburg keine Sperrstunden für die Wärmepumpe verhängt sind.

Das Speichervolumen für das Bestandshaus wurde nach Gleichung 5 ausgerechnet.

$$m_{PS, Bestand} = \frac{20 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h}}{\left(1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K}\right)} \approx \mathbf{1,72 \text{ m}^3}$$

Das Speichervolumen für das Niedrigenergiehaus wurde nach Gleichung 5 ausgerechnet.

$$m_{PS, NEH} = \frac{6 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h}}{\left(1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 10 \text{ K}\right)} \approx \mathbf{0,52 \text{ m}^3}$$

Den marktüblichen Speichergrößen angepasst wird im Folgenden für das Bestandshaus mit einem Speichervolumen von $1,5 \text{ m}^3$ und für das Niedrigenergiehaus mit einem Speichervolumen von $0,5 \text{ m}^3$ weitergerechnet.

3.3.3. Speicherkapazität

Gleichung 7 dient der Berechnung der Speicherkapazität. (Krug & Groebert, 1983)

$$Q_{SP} = V_{SP} \cdot c \cdot \rho \cdot (\vartheta_{vor} - \vartheta_{rück}) \quad (7)$$

Mit

Q_{SP} : Speicherkapazität in J

V_{SP} : Speichervolumen in m^3

c : spezifische Wärmekapazität von Wasser in $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

ρ : Dichte von Wasser in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

ϑ_{vor} : Temperatur Vorlauf in $^{\circ}\text{C}$

$\vartheta_{rück}$: Temperatur Rücklauf in $^{\circ}\text{C}$

Die Speicherkapazität für den $1,5 \text{ m}^3$ Speicher des Bestandsgebäudes wurde nach Gleichung 7 berechnet.

$$Q_{SP, Bestand} = 1,5 \text{ m}^3 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (328,15 \text{ K} - 318,15 \text{ K})$$

$$= 62.700 \text{ kJ} = \mathbf{17,42 \text{ kWh}}$$

Die Speicherkapazität für den $0,5 \text{ m}^3$ Speicher des Niedrigenergiegebäudes wurde nach Gleichung 7 berechnet.

$$Q_{SP,NEH} = 0,5 \text{ m}^3 \cdot 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (308,15\text{K} - 298,15\text{K})$$
$$= 10.868 \text{ kJ} = \mathbf{5,81 \text{ kWh}}$$

3.3.4. Wärmeverlustkoeffizient

Durch die Temperaturdifferenz zwischen Speichertemperatur und Außentemperatur werden Wärmeverluste hervorgerufen. Um den Wärmeübergang zu erschweren und die Verluste zu minimieren, werden Pufferspeicher in der Regel mit einer Wärmedämmschicht ummantelt (Fisch et al., 2005).

Für diese Arbeit wurde die Annahme getroffen, dass der Pufferspeicher nach Gleichung 8 eine Energieeffizienzklasse A nach EU Verordnung einhalten muss (Europäische Kommission, 2013).

Warmhalteverluste für Einhaltung der Energieeffizienzklasse A

$$5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4} \quad (8)$$

Mit

S : Warmhalteverlust in W

V : Speichervolumen in Liter

Die Wärmeverluste des $1,5 \text{ m}^3$ Speichers für das Bestandsgebäude wurden nach Gleichung 8 berechnet.

$$5,5 + 3,16 \cdot 1500^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot 1500^{0,4}$$

$$64,40 \leq S < 87,72$$

Für diese Arbeit wird die Mitte dieser Spanne $S = \mathbf{76,06 \text{ W}}$ als Wärmeverlust festgelegt.

Die Wärmeverluste des $0,5 \text{ m}^3$ Speichers für das Niedrigenergiegebäude wurden nach Gleichung 8 berechnet.

$$5,5 + 3,16 \cdot 500^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot 500^{0,4}$$

$$43,46 \leq S < 59,54$$

Für diese Arbeit wird die Mitte dieser Spanne $S = 51,5 \text{ W}$ als Wärmeverlust festgelegt.

Die nach Gleichung 8 berechneten Wärmeverluste sind theoretische Werte. Reale Verluste durch bspw. Wärmebrücken an Anschlüssen und Flanschen werden nicht zureichend berücksichtigt (Fisch et al., 2005).

3.4. Auslegung der Wärmepumpe

Die Auslegung der Wärmepumpe erfolgt nach Anpassung an die Normheizlast, die in Kapitel 3.3.1. bestimmt wurde. Für das Bestandshaus wird eine Wärmepumpe mit 20 kW Heizleistung gewählt, für das Niedrigenergiehaus eine Wärmepumpe mit 8 kW. Die Leistung der Wärmepumpe für das Bestandshaus weicht mit 4 kW von der Norm-Heizlast ab, da 24 kW Wärmepumpen nicht marktüblich sind.

3.5. Regelung des Systems

Die Priorisierung des PV-Stromverbrauchs orientiert sich an den möglichen finanziellen Ersparnissen (vgl. Kapitel 2.1.). Vorrangig wird der Haushaltsstrom abgedeckt, dann wird die elektrische Zusatzheizung und schließlich die Wärmepumpe versorgt. Abbildung 17 verdeutlicht dieses Priorisierungsschema.

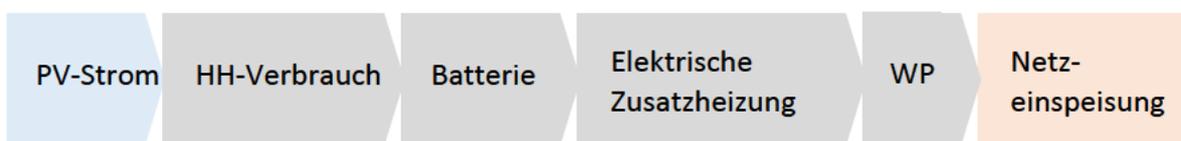


Abbildung 17: Priorisierungsschema für den Verbrauch von PV-Strom

Die Regellogik der Wärmepumpe wird in Abbildung 18 dargestellt. In den Daten des TRY treten Temperaturen unterhalb der Bivalenzpunkt-Temperatur ($-5 \text{ }^\circ\text{C}$) nicht auf, weshalb die

Zuschaltung des Heizstabs zur Unterstützung der Wärmepumpe nicht zum Einsatz kommt. In der Regellogik ist dieser Fall trotzdem berücksichtigt.

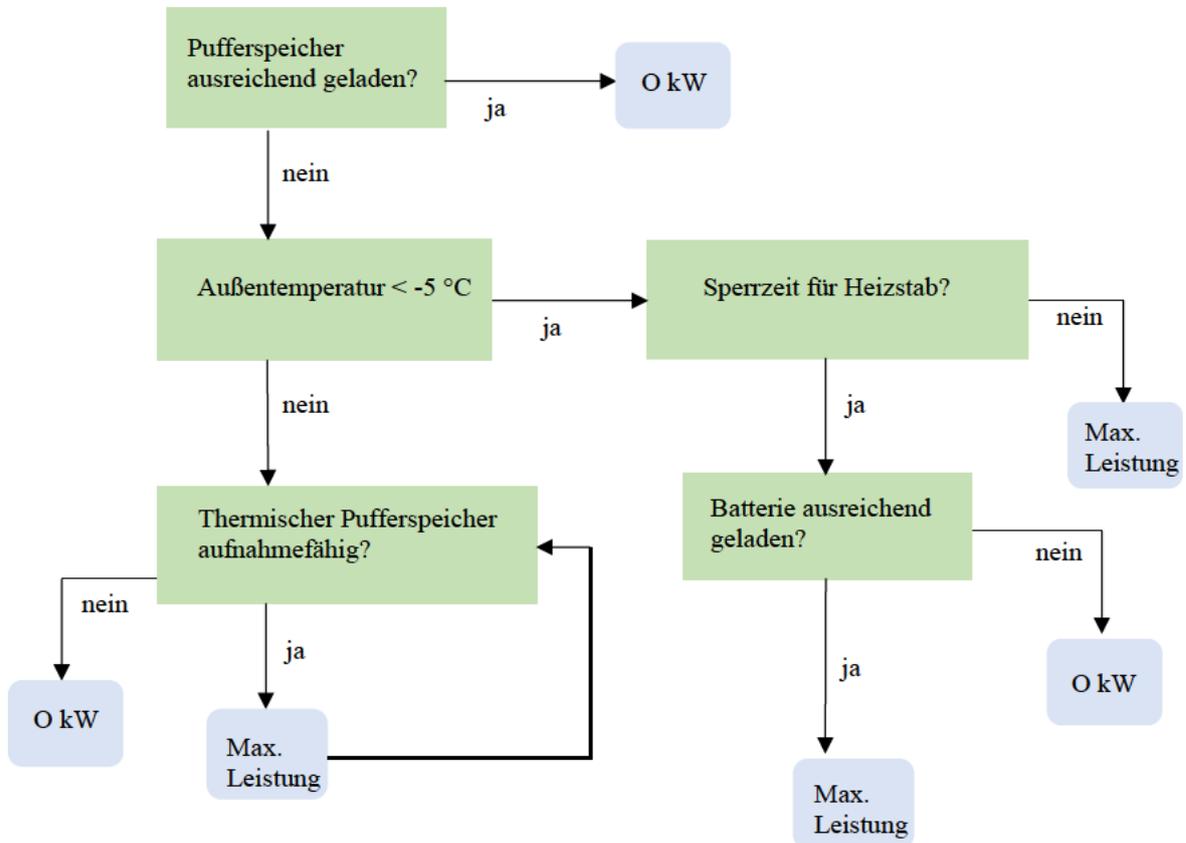


Abbildung 18: Regelungsschema der Wärmepumpe für die Vergleichsgebäude

Für das Trinkwarmwasser im Niedrigenergiehaus muss eine elektrische Zusatzheizung, hier ein Durchlauferhitzer, die Temperaturdifferenz von 20 K überbrücken, die zwischen Speichertemperatur und Bedarfstemperatur vorliegt. Die 2.000 kWh Trinkwarmwasserwärmebedarf müssen aus einer Kombination von Wärmepumpe und Durchlauferhitzer zur Verfügung gestellt werden. Für diese Arbeit wurde angenommen, dass Wärmepumpe und Durchlauferhitzer jeweils 50 % der Bedarfswärme zur Verfügung stellen. Diese Festlegung beruht auf der Annahme, dass das Wasser von 15 °C auf 55 °C erhitzt wird und die Wärmepumpe 20 K Differenz übernimmt, so auch der Durchlauferhitzer.

Also $\frac{20\text{ K}}{40\text{ K}} \approx 0,5$.

3.6. Auslegung und Dimensionierung der PV-Anlage

Aus den Daten des TRY des Deutschen Wetterdienstes (BBR, 2017) lässt sich mit der Gleichung 1 die Strahlungsintensität an einem bestimmten Ort in Deutschland simulieren. Hier wurden die Längen- und Breitengraden $9,9922^\circ$ und $53,6322^\circ$ angenommen, welche den Flugplatz Fuhlsbüttel in Hamburg markieren. Im Anschluss wurde eine PV-Anlage auf Basis dieser Daten simuliert. Festgelegt wurde eine Anlage mit 10 kWp. Nach EEG gilt für Anlagen bis einschließlich 10 kWp eine höhere Einspeisevergütung als für Anlagen größer 10 kWp (§48 Absatz 2 Satz 1, EEG). Auf Dächer von Einfamilienhäusern passen nach eigenen Erfahrungen selten größere Anlagen, somit ist es sinnvoll, hierbei darauf zu achten, dass sie diese Leistungsgrenze nicht überschreiten. Die PV-Anlage besteht aus Modulen mit folgenden Daten, deren Datenblatt im Anhang beigefügt ist.

Daten PV-Modul

$$\text{Leistung}^* = 415 \text{ W}_p$$

$$\text{Wirkungsgrad}^3 = 20,7\%$$

$$\text{Maße: L: } 2015 \pm 2 \text{ mm B: } 996 \pm 2 \text{ mm T: } 35 \pm 1 \text{ mm}$$

Die Leistung des Moduls wurde pro m^2 bestimmt, um so die nötige Fläche für eine 10 kWp Anlage zu ermitteln.

Zusammen mit dem Wirkungsgrad des Moduls, der Gesamtglobalstrahlung, der Ausrichtung in 0° Süd und den Verlusten der PV-Anlage von 14% ergibt sich die Anlagenleistung pro Zeitintervall.

3.7. Batteriespeicher Auslegung und Dimensionierung

Die Speichergröße ist nach Vorgaben der Verfügbarkeit am Markt ab 5 kWh in 2,5 kWh Schritten zu kaufen. An diese Schritte der Dimensionierung wurde sich in dieser Arbeit gehalten.

³ unter Standard Test Konditionen: Bestrahlungsstärke = $1000 \text{ W}/\text{m}^2$, Solarzellentemperatur = 25°C , AM1.5G

Hier werden Speicher von 5 bis 10 kWh miteinander anhand ihrer Auswirkungen auf den Eigenverbrauch des PV-Stroms verglichen.

4 Ergebnisse

Die Abbildung 19 zeigt den monatlichen Ertrag der 10 kWp PV-Anlage abhängig von einem Anstellwinkel zwischen 10 ° und 90 ° in direkter Südausrichtung.

Zu erkennen ist, dass in den Heizmonaten Oktober, November, Dezember, Januar und Februar Anstellwinkel mit 40 °, 50 ° und 60 ° am ertragreichsten sind. Im Rest des Jahres, mit der Ausnahme vom März, ist ein Winkel von 10 ° bis 40 ° am ertragreichsten. Anstellwinkel ab 70 ° bringen in keinem Monat einen größeren Ertrag als kleinere Anstellwinkel.

Das Ertragsplus in den Heizmonaten mit einem steileren Anstellwinkel ergibt ein größeres Defizit in den restlichen Monaten, als es einen Vorteil birgt. Diese Erkenntnis wird im Folgenden weiter untersucht.

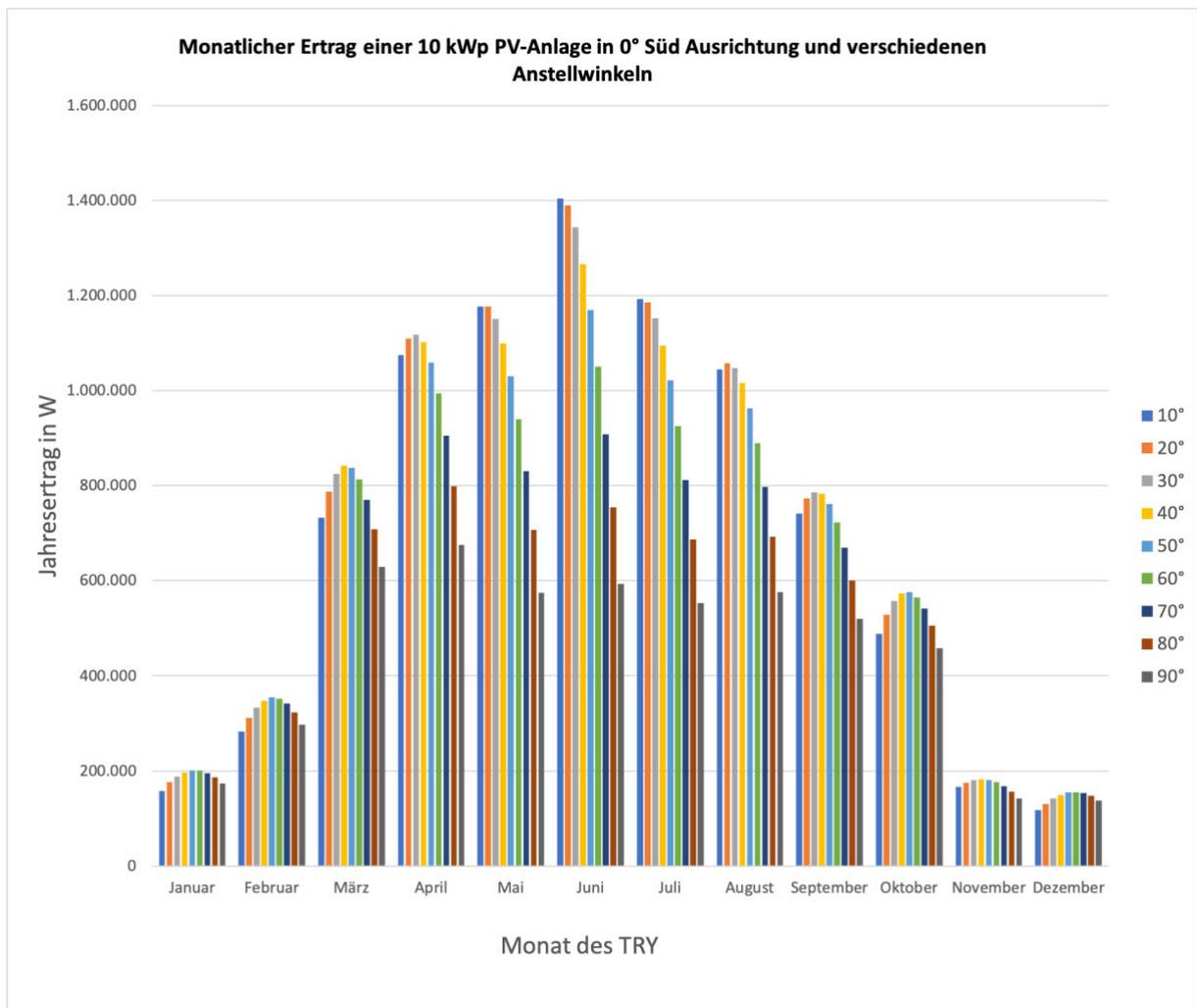


Abbildung 19: Monatlicher Ertrag einer 10 kWp PV-Anlage in 0° Südausrichtung und verschiedenen Anstellwinkeln

4.1. Bestandshaus

Tabelle 4 zeigt den Jahresertrag der 10 kWp PV-Anlage sowie den Eigenverbrauch (EV) des PV-Stroms bei Anstellwinkeln von 10° bis 70° in Abhängigkeit vom Jahresstromverbrauch sowie die Abweichung zum maximal möglichen Eigenverbrauch (Δ_{\max}) für das Bestandshaus.

Tabelle 4: Eigenverbrauch des PV-Stroms im Bestandshaus bei Anstellwinkeln von 10° bis 70° und unterschiedlichen Jahresstromverbräuchen

Anstellwinkel	Jahresertrag	Jahresstromverbrauch (kWh)							
		6000		5000		4000		3000	
°	kWh	EV* (kWh)	Δ_{\max} (kWh)	EV* (kWh)	Δ_{\max} (kWh)	EV* (kWh)	Δ_{\max} (kWh)	EV* (kWh)	Δ_{\max} (kWh)
10	8.582	3.052	-76	2.830	-76	2.666	-79	2.326	-79
15	8.718	3.085	-42	2.863	-44	2.700	-46	2.357	-47
20	8.805	3.109	-19	2.886	-20	2.724	-22	2.381	-24
25	8.842	3.123	-5	2.901	-6	2.739	-7	2.397	-8
30	8.829	3.128	0	2.906	0	2.746	0	2.405	0
35	8.766	3.122	-5	2.902	-4	2.742	-4	2.404	-1
40	8.656	3.107	-21	2.889	-17	2.730	-15	2.395	-9
45	8.506	3.084	-44	2.869	-38	2.712	-34	2.380	-24
50	8.311	3.052	-75	2.841	-66	2.686	-60	2.359	-46
55	8.070	3.012	-116	2.804	-102	2.651	-95	2.329	-75
60	7.785	2.963	-164	2.759	-147	2.609	-137	2.293	-112
65	7.458	2.906	-222	2.706	-200	2.560	-186	2.250	-155
70	7.092	2.839	-288	2.646	-261	2.502	-244	2.200	-205

* bei 0 kWh Batteriespeicher

Den höchsten Jahresertrag erreicht die PV-Anlage bei einem Anstellwinkel von 25°, den höchsten Eigenverbrauch bei einem Anstellwinkel von 30°. Der Einfluss des Anstellwinkels auf den Eigenverbrauch erhöht sich, je steiler oder flacher der Anstellwinkel des Moduls von

30 ° abweicht, dabei ist der Zuwachs der Abweichung ungleichmäßig. Weiterhin ist festzustellen, dass der Einfluss des Anstellwinkels auf den Eigenverbrauch mit sinkendem Jahresstromverbrauch fällt.

Der Eigenverbrauch teilt sich zwischen dem Verbrauch durch Haushaltsstrom und dem Verbrauch durch die Wärmepumpe auf. Der Anstellwinkel von 30 ° für den höchsten Gesamteigenverbrauch spiegelt dabei nicht den optimalen Anstellwinkel für den Eigenverbrauch durch die Wärmepumpe oder den Haushaltsstrom wieder, wie Tabelle 5 zeigt. Bei einer Anlage ohne Batteriespeicher liegt der optimale Winkel für den Eigenverbrauch für die Wärmepumpe bei 35 ° bis 40 ° und für den Haushaltsstrom bei 15 °. Daraus lässt sich schließen, dass der Anstellwinkel der Module einen größeren Einfluss auf den Eigenverbrauch durch die Wärmepumpe hat als durch den Haushaltsstrom. Ein Anstellwinkel von 30 ° erzielt somit den höchsten Gesamteigenverbrauch.

Tabelle 5: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 0 kWh Batteriespeicher (Bestandshaus)

	0 kWh Batterie		
Anstellwinkel	Eigenverbrauch bei 6000 kWh	Eigenverbrauch WP	Eigenverbrauch Haushaltsstrom
°	kWh	kWh	kWh
10	3.052	893	2.159
15	3.085	925	2.161
20	3.109	950	2.159
25	3.123	970	2.153
30	3.128	983	2.145
35	3.122	989	2.134
40	3.107	989	2.118
45	3.084	984	2.100
50	3.052	973	2.079
55	3.012	956	2.056
60	2.963	934	2.029
65	2.906	908	1.998
70	2.839	876	1.963

Durch die Integration eines Batteriespeichers (vgl. Tabelle 6), der den Eigenverbrauch für den Haushaltsstrom unterstützt, verschiebt sich der optimale Anstellwinkel für den Eigenverbrauch durch den Haushaltsstrom von 15 ° auf 30 °. Durch die Option, den PV-Strom speichern zu können, kann bei der Überproduktion von Strom ein Teil für einen späteren Zeitpunkt gespeichert werden. So verliert der Zeitpunkt der PV-Strom Produktion an Einfluss auf den Eigenverbrauch.

Tabelle 6: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 5 kWh Batteriespeicher (Bestandshaus)

Anstellwinkel	5 kWh Batterie		
	Eigenverbrauch bei 6000 kWh	Eigenverbrauch WP	Eigenverbrauch Haushaltsstrom
°	kWh	kWh	kWh
10	4.074	636	3.438
15	4.118	667	3.451
20	4.138	693	3.445
25	4.159	713	3.447
30	4.177	725	3.452
35	4.169	732	3.437
40	4.158	727	3.431
45	4.135	720	3.415
50	4.098	706	3.392
55	4.066	693	3.373
60	4.009	670	3.339
65	3.940	647	3.293
70	3.864	621	3.244

Ein Batteriespeichers hat, wie Tabelle 5 und Tabelle 6 zeigen, großen Einfluss auf den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Durch eine Batterie wächst der summierte Eigenverbrauch. Dabei steigt der Eigenverbrauchsanteil des Haushaltsstrom und der Eigenverbrauchsanteil der Wärmepumpe sinkt. Diese Ergebnisse ergeben sich aus der Priorisierung nach Abbildung 17. In Abbildung 20 wird dieser Einfluss bei einem Anstellwinkel von 30 ° und einem Jahresstromverbrauch von 6.000 kWh dargestellt. Der Anteil des Eigenverbrauchs steigt hierbei nicht proportional mit der Batteriekapazität.

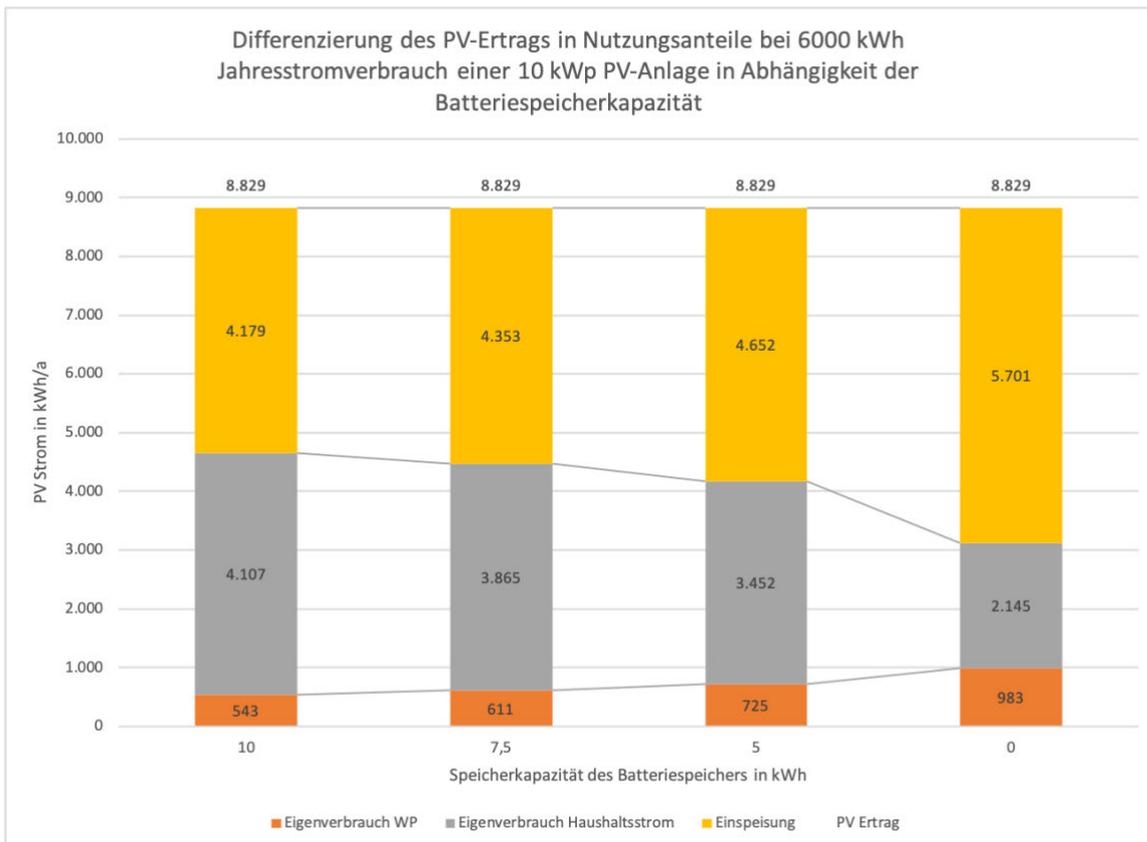


Abbildung 20: Nutzungsanteile des PV-Stroms bei 6000 kWh Jahresstromverbrauch und in Abhängigkeit der Speicherkapazität der Batterie für das Bestandshaus

Die JAZ der Wärmepumpe für das Bestandshaus liegt bei 3,3 und erfüllt damit das Kriterium für die minimale JAZ nach Kapitel 2.3.2.

4.2. Niedrigenergiehaus

Tabelle 7 zeigt den Jahresertrag der 10 kWp PV-Anlage, den Eigenverbrauch des PV-Stroms bei Anstellwinkeln von 10 ° bis 70 ° in Abhängigkeit vom Jahresstromverbrauch sowie die Abweichung zum maximal möglichen Eigenverbrauch für das Niedrigenergiehaus.

Tabelle 7: Eigenverbrauch des PV-Stroms im Niedrigenergiehaus bei Anstellwinkeln von 10° bis 70° und unterschiedlichen Jahresstromverbräuchen

Anstellwinkel	Jahresertrag bei 10 kWp	Jahresstromverbrauch (kWh)							
		6000		5000		4000		3000	
°	kWh	EV* (kWh)	Δmax (kWh)	EV* (kWh)	Δmax (kWh)	EV* (kWh)	Δmax (kWh)	EV* (kWh)	Δmax (kWh)
10	8.582	2.456	-2	2.244	-1	1.993	-1	1.718	-1
15	8.718	2.458	0	2.245	0	1.994	0	1.719	0
20	8.805	2.454	-4	2.242	-3	1.990	-3	1.716	-3
25	8.842	2.445	-12	2.234	-11	1.983	-11	1.710	-9
30	8.829	2.432	-26	2.222	-23	1.972	-21	1.700	-19
35	8.766	2.413	-45	2.206	-39	1.958	-36	1.688	-31
40	8.656	2.390	-68	2.186	-60	1.940	-53	1.673	-46
45	8.506	2.366	-92	2.165	-80	1.922	-71	1.658	-61
50	8.311	2.339	-118	2.142	-103	1.902	-91	1.641	-78
55	8.070	2.308	-150	2.116	-130	1.879	-115	1.621	-98
60	7.785	2.272	-185	2.085	-160	1.853	-141	1.599	-121
65	7.458	2.232	-225	2.051	-194	1.823	-171	1.573	-146
70	7.092	2.187	-270	2.014	-232	1.790	-204	1.545	-174

* bei 0 kWh Batteriekapazität

Den höchsten Jahresertrag erzielt die PV-Anlage bei einem Anstellwinkel von 25 °, den höchsten Eigenverbrauch bei einem Anstellwinkel von 15 °. Der Einfluss des Anstellwinkels auf den Eigenverbrauch erhöht sich, je steiler oder flacher der Anstellwinkel des Moduls von 15 ° abweicht, dabei ist der Zuwachs der Abweichung ungleichmäßig. Weiterhin ist festzustellen, dass der Einfluss des Anstellwinkels auf den Eigenverbrauch mit sinkendem Jahresstromverbrauch fällt.

Der Eigenverbrauch teilt sich zwischen Haushaltsstrom, Verbrauch für die Wärmepumpe und elektrischen Durchlauferhitzer auf. Der Anstellwinkel von 15 ° für den höchsten Gesamteigenverbrauch spiegelt dabei bis auf eine kleine Abweichung den optimalen

Anstellwinkel für den Durchlauferhitzer und den Haushaltsstromverbrauch wieder. Der optimale Anstellwinkel für den Eigenverbrauch durch die Wärmepumpe liegt bei 25 ° (vgl. Tabelle 8). Daraus lässt sich schließen, dass der Anstellwinkel der Module einen größeren Einfluss auf den Eigenverbrauch durch den Haushaltsstrom hat als auf den der Wärmepumpe.

Tabelle 8: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 0 kWh Batteriespeicher (Niedrigenergiehaus)

0 kWh Batterie				
Anstellwinkel	Eigenverbrauch bei 6000 kWh	Eigenverbrauch WP	Eigenverbrauch DLE	Eigenverbrauch Haushaltsstrom
°	kWh	kWh	kWh	kWh
10	2.456	204	192	2.060
15	2.458	207	192	2.059
20	2.454	209	191	2.054
25	2.445	210	189	2.046
30	2.432	209	188	2.034
35	2.413	208	187	2.018
40	2.390	206	185	1.998
45	2.366	204	183	1.979
50	2.339	201	180	1.958
55	2.308	198	177	1.934
60	2.272	194	173	1.906
65	2.232	189	168	1.875
70	2.187	183	163	1.842

Durch die Integration eines Batteriespeichers (vgl. Tabelle 9), der den Eigenverbrauch für den Haushaltsstrom unterstützt, verschiebt sich der optimale Anstellwinkel für den Eigenverbrauch durch den Haushaltsstrom von 10 ° auf 15 °, für den Eigenverbrauch durch die Wärmepumpe von 25 ° auf 35 ° bis 40 ° und für den Durchlauferhitzer von 10 ° bis 15 ° auf 20 °. Der Einfluss des Anstellwinkels ist hierbei für den Eigenverbrauch durch den Haushaltsstrom größer als für den Eigenverbrauch durch die Wärmepumpe.

Tabelle 9: Anteile am Eigenverbrauch des PV-Stroms von Wärmepumpe und Haushaltsstrom bei 5 kWh Batteriespeicher (Niedrigenergiehaus)

5 kWh Batterie				
Anstellwinkel	Eigenverbrauch bei 6000 kWh	Eigenverbrauch WP	Eigenverbrauch DLE	Eigenverbrauch Haushaltsstrom
°	kWh	kWh	kWh	kWh
10	3.453	112	111	3.230
15	3.471	114	111	3.245
20	3.469	117	112	3.240
25	3.467	118	111	3.238
30	3.460	120	110	3.230
35	3.441	121	110	3.211
40	3.422	121	108	3.193
45	3.394	120	106	3.168
50	3.372	118	104	3.149
55	3.336	117	102	3.117
60	3.300	114	99	3.088
65	3.264	109	96	3.058
70	3.207	105	93	3.009

Ein Batteriespeichers hat, wie Tabelle 8 und Tabelle 9 zeigen, großen Einfluss auf den Eigenverbrauch des PV-Stroms. Durch eine Batterie wächst der summierte Eigenverbrauch. Dabei steigt der Eigenverbrauchsanteil des Haushaltsstroms und der Eigenverbrauchsanteil der Wärmepumpe sinkt. Diese Ergebnisse ergeben sich aus der Priorisierung nach Kapitel 3.5.. In Abbildung 21 wird dieser Einfluss bei einem Anstellwinkel von 30 ° und einem Jahresstromverbrauch von 6.000 kWh dargestellt. Der Anteil des Eigenverbrauchs steigt hierbei nicht proportional mit der Batteriekapazität.

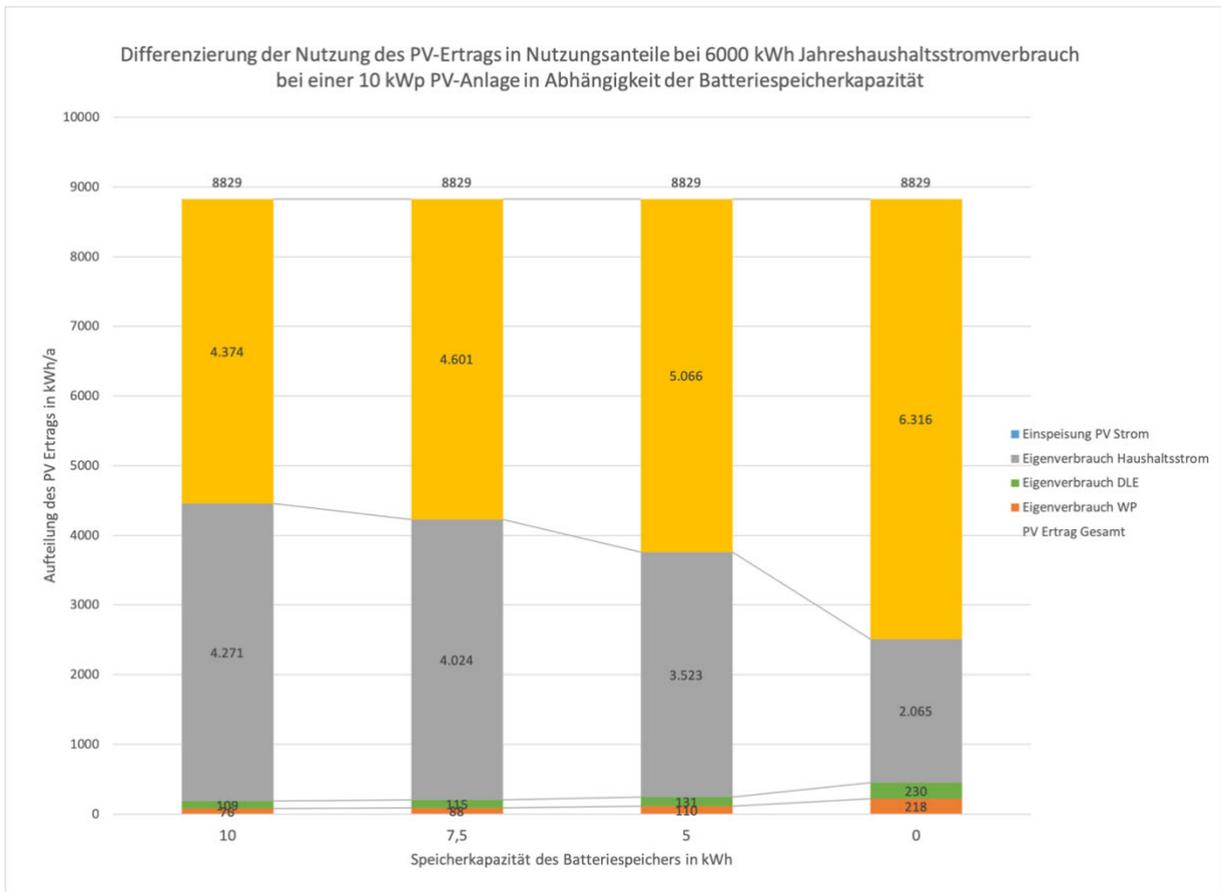


Abbildung 21: Nutzungsanteile des PV-Stroms bei 6000 kWh Jahresstromverbrauch und in Abhängigkeit der Speicherkapazität der Batterie für das Niedrigenergiehaus

Die JAZ der Wärmepumpe für das Niedrigenergiehaus liegt bei 4,7 und erfüllt damit die minimale JAZ nach Kapitel 2.3.2..

4.3. Wirtschaftlichkeitsanalyse des Systems ohne und mit Optimierung des Anstellwinkels

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung beruht gemäß Tabelle 10 auf folgenden Annahmen:

Tabelle 10: Parameter für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

Einspeisevergütung	Ct/ kWh	6,8
Strompreis Haushalt	Ct/kWh	35
Strompreis WP	Ct/kWh	25
Nettopreis 10 kWp PV-Anlage inkl. Montage	€	23.286
Nettopreis je 2,5 kWh Speicherkapazität	€	2.000
Montage Speicher	€	2000
Jahresertrag bei entsprechendem Anstellwinkel	kWh	Siehe Tabelle 4 und Tabelle 7
Eigenverbrauch	kWh	Siehe Tabelle 4 und Tabelle 7

So ergibt sich für die 10 kWp Anlage mit unterschiedlichen Speichergrößen bei einem Hausstromverbrauch von 6.000 kWh pro Jahr ohne die Annahme einer progressiven Strompreisentwicklung nach Tabelle 11 und Tabelle 12 die Wirtschaftlichkeitsberechnung. Die Mehrkosten für die Anpassung des Montagegestells für den optimierten Anstellwinkel wurden mit 1.000 € festgelegt. Tabelle 11 zeigt die Amortisationszeiten, sowie die theoretische Rendite der Anlage bei 45 ° und bei 30 ° für das Bestandshaus.

Tabelle 11: Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Bestandshaus für vorhandenen und optimierten Anstellwinkel

	Bestandshaus							
	6000 kWh Haushaltsstromverbrauch							
	45° Anstellwinkel				30° Anstellwinkel			
Speicherkapazität Batterie in kWh	0	5	7,5	10	0	5	7,5	10
Amortisationszeit in a	16,15	16,69	17,08	17,63	16,42	17,03	17,14	17,74
Theoretische Rendite über 20 Jahre in %	1,19	0,99	0,85	0,67	1,09	0,87	0,83	0,64

Tabelle 12 zeigt die Amortisationszeiten, sowie die theoretische Rendite der Anlage bei 45 ° und bei 15 ° bis 25 ° für das Niedrigenergiehaus.

Tabelle 12: Wirtschaftlichkeitsberechnung für das Niedrigenergiehaus für vorhandenen und optimierten Anstellwinkel

	Niedrigenergiehaus							
	6000 kWh Haushaltsstromverbrauch							
	45° Anstellwinkel				15° bis 25° Anstellwinkel			
Speicherkapazität Batterie (kWh)	0	5	7,5	10	0	5	7,5	10
Amortisationszeit	17,28	18,18	18,14	18,54	17,67	18,31	18,17	18,84
Theoretische Rendite über 20 Jahre	0,79	0,5	0,51	0,4	0,66	0,46	0,5	0,31

Die detaillierte Wirtschaftlichkeitsberechnung befindet sich in Anhang 3 und Anhang 4.

5 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

5.1. Auswertung

Anhand der Ergebnisse konnte gezeigt werden, dass die optimale Ausrichtung der PV-Anlage von Höhe und Lastgang des Hausverbrauchs abhängt. Außerdem erzielt das Bestandshaus, unabhängig vom Jahresstromverbrauch und Batteriespeicherkapazität, deutlich höhere Eigenverbrauchsanteile als das Niedrigenergiehaus. Dies liegt am höheren Jahresheizenergiebedarf und damit höheren Stromverbrauchs durch die Wärmepumpe. Tabelle 13 verdeutlicht dieses Ergebnis für die PV-Anlage bei einem Anstellwinkel von 25° (Anstellwinkel für den höchsten Gesamtertrag).

Tabelle 13: Anteil Eigenverbrauch der 10 kWp PV-Anlage bei 25° Anstellwinkel

Jahresstromverbrauch (kWh)	Bestand		NEH	
	Anteil Eigenverbrauch (%)		Anteil Eigenverbrauch (%)	
	0 kWh	5 kWh	0kWh	5kWh
	6.000	35	47	28
5.000	33	44	25	37
4.000	31	44	22	34
3.000	27	31	19	29

Der Jahreshaushaltsstromverbrauch und der PV-Ertrag sind für beide Häuser gleich. Lediglich der Lastgang des Stromverbrauchs unterscheidet sich. Dabei ist der Lastgang des Haushaltsstroms des Bestandshauses besser an die Ertragskurve der PV-Anlage angepasst als die des Niedrigenergiehauses. Bei einem Jahreshaushaltsstromverbrauch von 6.000 kWh kann das Bestandshaus unabhängig vom Anstellwinkel jährlich ca. 600 kWh mehr Strom selbst verbrauchen als das Niedrigenergiehaus. Diese Differenz ist auch unabhängig von der Batteriespeicherkapazität. Die Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen für die Woche vom 1.1. bis 7.1. des TRY den Stromverbrauch durch Wärmepumpe, Haushalt und Durchlauferhitzer für die Vergleichsgebäude, sowie den Stromertrag durch die PV-Anlage. Es ist zu erkennen, dass beim Niedrigenergiehaus große Lastspitzen durch den Durchlauferhitzer

entstehen. Diese Lastspitzen entstehen zu Zeiten ohne PV-Ertrag. Im Gegensatz dazu entsteht die Last durch die Wärmepumpe beim Bestandshaus hauptsächlich zu Stunden mit PV Ertrag. Diese Erkenntnisse können den größeren Eigenverbrauch des Bestandshauses erklären.

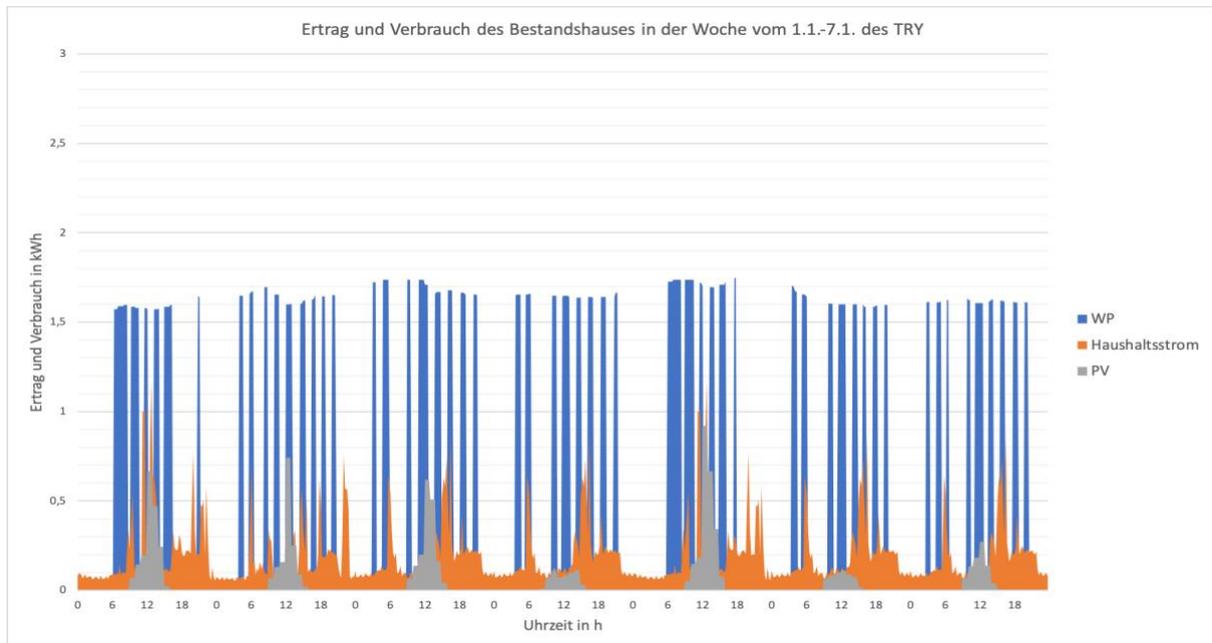


Abbildung 22: PV-Stromertrag und Stromverbrauch durch Wärmepumpe und Haushalt des Bestandshauses für eine Woche des TRY

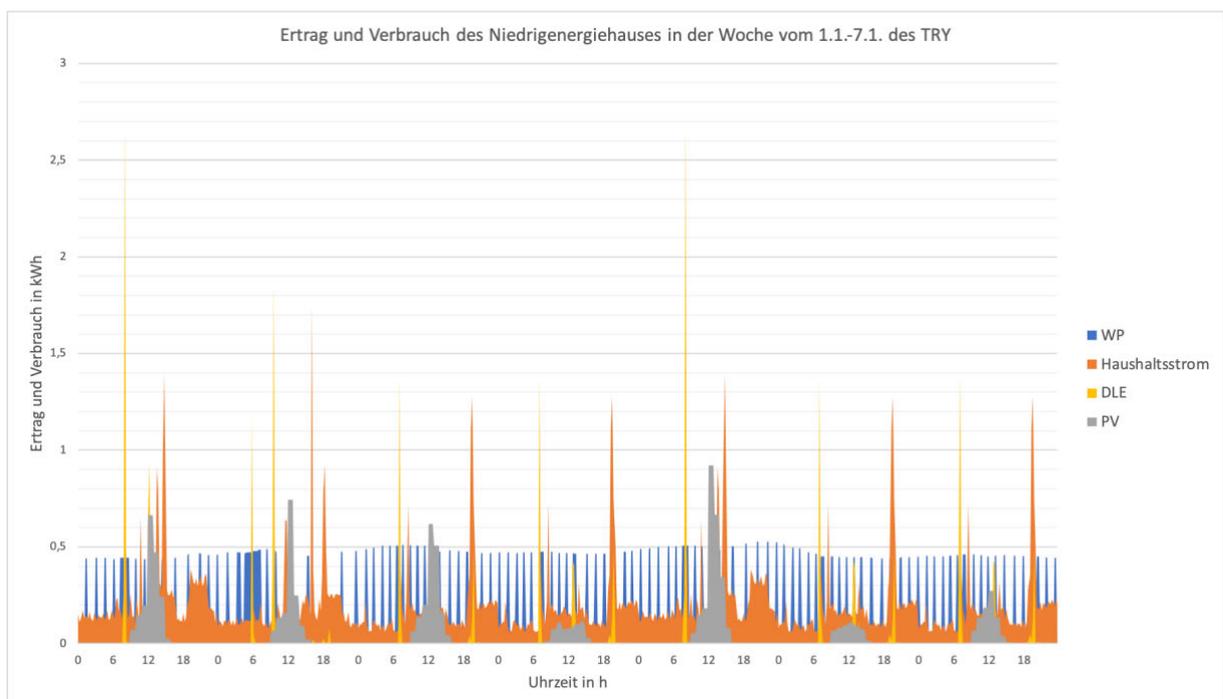


Abbildung 23: PV-Stromertrag und Stromverbrauch durch Wärmepumpe, Durchlauferhitzer und Haushalt des Niedrigenergiehauses für eine Woche des TRY

Weiterhin ist zu erkennen, dass das Bestandshaus den optimalen Eigenverbrauch bei einem deutlich steileren Anstellwinkel erzielt als das Niedrigenergiehaus. Die Abweichungen des Eigenverbrauchs in Abhängigkeit vom Anstellwinkel belaufen sich nach Tabelle 14 und Tabelle 15 zwischen 10 ° und 55 ° allerdings auf nur 1 bis 2 Prozent. Dies verhält sich für alle Jahresstromverbräuche so.

Die Zusammensetzung des Eigenverbrauchs durch die Anteile des Haushaltsstroms und Wärmepumpenstroms bzw. Durchlauferhitzerstroms ändert sich mit dem Anstellwinkel. Je größer der Strombedarf der Wärmepumpe, desto mehr wirkt sich der Anstellwinkel auf dessen Anteil des Eigenverbrauch aus. Allgemein kann gesagt werden, dass der Gesamteigenverbrauch der 10 kWp Anlage unter 55 ° weitestgehend unabhängig vom Anstellwinkel ist.

Tabelle 14: Prozentualer Anteil von Wärmepumpe und Haushalt am Eigenverbrauch für Anstellwinkel von 10° bis 70° und 0 kWh Batteriespeicher für das Bestandshaus

6000 kWh und 0 kWh Batterie				
Anstellwinkel	Jahresertrag bei 10 kWp	Anteil WP am EV	Anteil HHS am EV	Anteil EV am Gesamtertrag
°	kWh	%	%	%
10	8.582	10,4	25,2	35,6
15	8.718	10,6	24,8	35,4
20	8.805	10,8	24,5	35,3
25	8.842	11,0	24,4	35,3
30	8.829	11,1	24,3	35,4
35	8.766	11,3	24,3	35,6
40	8.656	11,4	24,5	35,9
45	8.506	11,6	24,7	36,3
50	8.311	11,7	25,0	36,7
55	8.070	11,8	25,5	37,3
60	7.785	12,0	26,1	38,1
65	7.458	12,2	26,8	39,0
70	7.092	12,3	27,7	40,0

Tabelle 15: Prozentualer Anteil von Wärmepumpe Durchlauferhitzer und Haushalt am Eigenverbrauch für Anstellwinkel von 10° bis 70° und 0 kWh Batteriespeicher für das Niedrigenergiehaus

6000 kWh Jahresstromverbrauch und 0 kWh Batterie NEH					
Anstellwinkel	Jahresertrag bei 10 kWp	Anteil WP am EV	Anteil DLE am EV	Anteil HHS am EV	Anteil EV am Gesamtertrag
°	kWh	%	%	%	%
10	8.582	2,4	2,2	24,0	28,6
15	8.718	2,4	2,2	23,6	28,2
20	8.805	2,4	2,2	23,3	27,9
25	8.842	2,4	2,1	23,1	27,7
30	8.829	2,4	2,1	23,0	27,5
35	8.766	2,4	2,1	23,0	27,5
40	8.656	2,4	2,1	23,1	27,6
45	8.506	2,4	2,1	23,3	27,8
50	8.311	2,4	2,2	23,6	28,1
55	8.070	2,5	2,2	24,0	28,6
60	7.785	2,5	2,2	24,5	29,2
65	7.458	2,5	2,3	25,1	29,9
70	7.092	2,6	2,3	26,0	30,8

5.2. Diskussion

Die Ergebnisse müssen unter einigen Aspekten differenziert betrachtet werden, denn sie beruhen auf Annahmen, die in der Praxis abweichen können.

Daten des Testreferenzjahres

Die Auslegung der Wärmepumpe und der Pufferspeicher beruhen auf den Annahmen der VDI Norm und der Wetterdaten des TRY. Extremwetter Bedingungen wurden dabei nicht berücksichtigt. Unter der Maßgabe einer hundertprozentigen Versorgung des Gebäudes mit genug Wärme auch bei Extrembedingungen können sich die Dimensionierungen der Komponenten und damit die Energieverbräuche ändern. Die Annahme des TRY, dass zu keinem Zeitpunkt Temperaturen von -5 °C herrschen, ist in der Realität nicht tragbar. Das

Zuschalten des Heizstabs ab dieser Bivalenzpunkttemperatur hat dann einen großen Einfluss auf die Energiebilanz der Simulation.

Die Strahlungs- und Temperaturdaten des TRY werden stündlich ausgegeben, was erhebliche Mängel in der Simulation des PV-Ertrags verursacht. Zumal die Verbrauchsdaten für die Energieverbräuche der VDI 4655 viertelstündlich ausgegeben werden.

Anstellwinkel

Auf Grund der Tatsache, dass die Anstellwinkel für die Simulation in 5 ° Abständen betrachtet wurden, kann es sein, dass der optimale Winkel für den Ertrag und den Eigenverbrauch zwischen den hier als optimal ermittelten Winkeln liegt.

In gängiger Literatur wird 35 ° häufig als der optimale Anstellwinkel für PV-Anlagen gelistet, wie auch Abbildung 6 zeigt.

Dabei ist der Einfluss der Diffusstrahlung bedeutend, diese macht für den Standort Hamburg deutlich mehr als die Hälfte der Jahresglobalstrahlung aus (Mertens, 2020, S. 45). In dieser Arbeit wurde das isotrope Modell für die Ermittlung der Diffusstrahlung verwendet. Laut Quaschnig ist dies „nur für grobe Abschätzungen oder bei bedecktem Himmel“ geeignet (Quaschnig, 2019, S. 87). Damit kann bereits hier eine Ungenauigkeit in der Rechnung aufgetreten sein, die sich zwar gleichmäßig durch das gesamte Modell zieht, dennoch Einfluss auf die Ermittlung des optimalen Anstellwinkels nimmt. Durch den hohen Anteil der Diffusstrahlung in Hamburg kann es also sein, dass die Mehrausbeute der Diffusstrahlung bei einem flacheren Winkel die Mehrausbeute der Direkteinstrahlung eines steileren Winkels übertrifft.

Abweichungen von einer perfekten Südausrichtung wurden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt miteinbezogen. Eine Ost-West-Ausrichtung hätte den Vorteil, dass die Ertragskurve besser über den Tag verteilt ist. Zwar gibt es dabei im Jahresertrag Einbußen gegenüber einer Südanlage (IBC Solar, 2014), dennoch wäre der Einfluss des Ost-West Ertragsprofils auf den Eigenverbrauchsanteil spannend.

Flachdächer wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Dennoch können die Ergebnisse aus dieser Arbeit darauf schließen lassen, dass sich eine flache Aufständigung von bspw. 10° am besten eignet, denn hierbei entstehen die geringsten Verschattungen der Module untereinander. Außerdem kann die Himmelsrichtung der Anlage im idealen Fall frei gewählt werden. Unterstützend für diese Aussage ist die monatliche Ertragsberechnung einer PV-Anlage in Westausrichtung für unterschiedliche Anstellwinkel im Anhang 1.

Der Nutzen des Mehrertrags bei steilen Anstellwinkeln ab 50° in den Heizmonaten ist nur für sogenannte Inselanlagen interessant, die besonders in diesen Monaten die maximal mögliche Energie benötigen (Quaschnig, 2019, S. 90).

Gütegrad der Wärmepumpe

Der in dieser Arbeit angenommene Gütegrad von 0,55 ist in der Realität etwas zu hoch angesetzt. Für Luft-Wasser Wärmepumpen ist nach (Zogg, 2009) ein Gütegrad von 0,35 realistischer. Nach heutigem Standard sind auch Luft-Wasser Wärmepumpen mit einem Gütegrad bis 0,46 zu finden (Vaillant, 2021). Der schlechtere Gütegrad bewirkt eine deutliche Verschlechterung der JAZ auf die Simulation der Anlage. Durch den höheren Stromverbrauch könnte der Eigenverbrauchsanteil durch den Verbrauch der Wärmepumpe steigen und somit die Wirtschaftlichkeit positiv beeinflussen.

Regelung der Wärmepumpe

Eine stufenlose Regelung der Wärmepumpe wurde nicht betrachtet, da sie den Umfang dieser Arbeit deutlich überschritten hätte. Eine stufenlose Regelung hätte den Vorteil, dass die Last besser an den Ertrag der PV-Anlage angepasst werden könnte. Auch der Einfluss der Überladung des Pufferspeichers (mehr als 33° bzw. 55°) bei überschüssigem PV-Strom wurde hier nicht mit einbezogen. Durch eine besser auf den PV-Ertrag angepasste Regelung könnten bessere Eigenverbrauchsanteile erzielt werden.

Ebenso verhält es sich mit der Raumtemperatur. Auch hier wurde eine konstante Raumtemperatur vorausgesetzt. Die Regelung der Wärmepumpe kann deutlich differenzierter betrachtet werden, wenn die Vorlauftemperatur an die Außentemperatur angepasst wird.

Sperrzeiten

Auf den Einfluss von Sperrzeiten und auf die Dimensionierung der Komponenten, gerade des Pufferspeichers, wurde hier nicht eingegangen, da es in Hamburg keine Sperrzeiten für die Wärmepumpe gibt. In anderen Bundesländern kann dieser Einfluss aber relevant sein.

Kaskadenschaltung der Zähler

Die Kaskadenschaltung der Stromzähler ist noch keine Standardverdrahtung und muss extra beantragt werden. Für den Fall, dass die PV-Anlage nicht an beide Zähler angeschlossen werden kann, muss abgewogen werden, für welchen Verbrauch sie besser geeignet ist. Dies hängt vom individuellen Verbrauch ab.

Kosten für die Optimierung des Anstellwinkels

Die in dieser Arbeit angenommenen 1.000 € für die Optimierung des Anstellwinkels sind eine nicht gestützte Annahme. In der Realität kann der Kostenfaktor hierfür deutlich darüber liegen, was das Vorhaben noch unwirtschaftlicher macht.

6 Fazit

Die Anpassung des Lastgangs eines Gebäudes an den Stromertrag durch die PV-Anlage ist sinnvoll. So kann mehr Strom direkt verbraucht werden ohne eine vorherige Zwischenspeicherung. Teure Batteriespeicherkapazität kann so eingespart werden.

Der optimalen Anstellwinkel für den Betrieb einer Wärmepumpe konnte in dieser Arbeit nur ansatzweise ermittelt werden. Durch die Limitierung des vorhandenen Platzes auf dem Dach kann nur eine begrenzte Menge an elektrischer Energie selbst produziert werden. Aufgrund der Priorisierung des Haushaltsstroms und der zugehörigen Batterie kann die WP und der DLE nur vom PV-Strom profitieren, wenn genügend Überschuss vorhanden ist. Den Anstellwinkel demnach für den Verbrauch durch eine Wärmepumpe zu optimieren, erzielt einen zu vernachlässigenden Eigenverbrauchszuwachs.

Besitzt das betrachtete Gebäude eine Dachschräge zwischen 10° und 50° und entsprechend viel Platz für eine 10 kWp Anlage, ist es bei einem Jahreshaushaltsstromverbrauch zwischen 3.000 kWh und 6.000 kWh nicht notwendig den Anstellwinkel zu optimieren. Nach der Wirtschaftlichkeitsberechnung ergibt die Optimierung des Anstellwinkels keinen Vorteil.

Die optimale Auslegung einer PV-Anlage für den Betrieb einer Wärmepumpe gibt es unter den genannten Voraussetzungen nicht, solange es unterschiedliche Tarife für Haushaltsstrom und Wärmepumpe gibt. Aus wirtschaftlicher Sicht ist somit lediglich die optimale Ausrichtung für den Eigenverbrauch durch den Haushaltsstrom sinnvoll. Und dieser ist bei einer Anlagengröße von 10 kWp zwischen 10° und 55° Dachneigung und damit Modulanstellwinkel konstant.

Mit steigenden Stromkosten kann sich die Wirtschaftlichkeit der PV-Anlage noch ändern.

Die Zusammenhänge und Einflüsse des Zusammenspiels von PV, Wärmepumpe und Speichern auch der Gebäudetypen wird aus dieser Arbeit deutlich. Auf genaue Zahlen sollte

sich hierbei allerdings nicht verlassen werden. Eine genaue Rechnung für jede betrachtete Anlage ist in jedem Fall empfehlenswert.

Die Ambivalenz zwischen Bedarf und Ertrag von PV-Strom von Winter zu Sommer kann im Einfamilienhaussektor nicht mit Pufferspeichern oder nur unter sehr großem Aufwand überbrückt werden. Allerdings besteht zwischen der Wärmepumpe und einer Klimaanlage aus thermodynamischer Sicht kein Unterschied (Dohmann, 2016). Es kann demnach mit Hinblick auf die zukünftige Klimaveränderung sinnvoll sein, den überschüssigen Strom im Sommer zu Kühlung eines Gebäudes zu nutzen. Für die Kühlung liegen Erzeugung und Verbrauch optimal zueinander.

Desweiteren gibt es bereits Anbieter, die Anlagenbetreiber*innen die Einspeisung ihres Überschussstroms in eine sogenannte Stromcloud anbieten. So können diese Ihren Überschuss an Strom aus dem Sommer im Winter zu einem günstigen Tarif zurückkaufen. Wie genau dafür gesorgt wird, dass der zurückgekaufte Strom aus erneuerbaren Energien stammt, ist nicht komplett transparent. (SENEC)

Die Zusammenschaltung mehrerer Häuser zu einem Quartier, welches über einen saisonalen Speicher verfügt, in den alle Gebäude im Sommer einspeisen, ist mit der Weiterentwicklung der Energiewende voraussichtlich immer nachgefragter und attraktiver.

7 Ausblick

Auf Grund der Begrenzung des Umfangs dieser Bachelorarbeit mussten viele Annahmen und Parameter festgelegt werden. Einige der Parameter, die noch genauer betrachtet und differenziert werden könnten, sollen in diesem Ausblick beleuchtet werden.

Den Einfluss einer viertelstündlichen Simulation der Strahlungsdaten auf den PV-Strom Ertrag und Verbrauch wäre näher an der Realität als die stündlichen Daten des Deutschen Wetterdienstes.

Das TRY bietet Datensätze für Extremwetterbedingungen, sowie zukunftsweisende Wetterbedingungen an. Die Simulation die aus dieser Bachelorarbeit entstanden ist mit diesen Datensätzen noch einmal durchzuführen und die Auswirkungen auf die Ergebnisse zu vergleichen, könnte ein realeres Bild schaffen.

Weiterhin könnte der Einfluss der Größe der Pufferspeicherkapazität auf den Lastgang der Wärmepumpe interessant sein.

Eine Anpassung der PV-Anlagengröße für den Stromverbrauch eines Gebäudes wurde in dieser Arbeit vernachlässigt, hat aber einen großen Einfluss auf die Rentabilität und den Eigenverbrauchsanteil.

Ob die Erträge mit der Verwendung von anderen Modellen für die Berechnung des Diffusstrahlungsanteils höher sind und damit der Eigenverbrauch steigt, könnte ebenfalls eine interessante Weiterforschung sein.

Es wurde in der Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einem konstanten Strompreis gerechnet. Verschiedene Modelle der Progression des Preises und die daraus folgenden Auswirkungen auf die Rentabilität könnten noch genauer betrachtet werden.

Die Regelung der Wärmepumpe für den optimalen Eigenverbrauch des PV-Stroms durch das Gebäude zu erforschen, könnte Teil einer weiterführenden Arbeit darstellen.

Literaturverzeichnis

- BBR. (2017). Testreferenzjahr-Datensatz 2017. (B. f. (DWD), Hrsg.) Link für den Download: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2013/testreferenzjahre/01-start.html?pos=2#doc2799182bodyText4>.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. (10. 03 2022). *Versorgungssicherheit stärken- Abhängigkeit reduzieren*. Abgerufen am 20. 07 2022 von Kurzpapier Stärkung der Sicherheit: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/papier-starkung-versorgungssicherheit.html>
- Bundesregierung. (02. 05 2022). *Gesetzentwurf der Bundesregierung 'Osterpaket'*. Von Entwurf eines Gesetzes zu Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weiteren Maßnahmen im Stromsektor: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/016/2001630.pdf> abgerufen
- BYD Lithium Battery Company. (kein Datum). *BYD Battery-Box HV Modulerweiterung*. Abgerufen am 10. 08 2022 von file:///Users/s17/Downloads/5201300037_BYD%20Battery-Box%20H5.1_Installationsanleitung%20-%20Erweiterung%20Batteriekapazit%C3%A4t_DE.pdf
- Crastan, V. (2009). *Elektrische Energieversorgung 2 Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik, alternative Stromerzeugung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung* (2., bearbeitete Auflage Ausg.). Berlin: Springer Verlag.
- Diefenbach, N., Loga, T., & Born, R. (30. 08 2005). *Wärmeversorgung für Niedrigenergiehäuser -Erfahrungen und Perspektiven-. Eine Untersuchung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung*. Darmstadt.
- DIN EN 12831. (08 2003). *Heizungsanlagen in Gebäuden, Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast*. Beuth Verlag.
- DIN SPEC 15378:2018-08. (08 2018). *Inspektion von Wärmeerzeugern, Heizungs- und Trinkwasserwärmungsanlagen - Nationale Ergänzung zur DIN EN 15378-1:2017-09*. Beuth Verlag.
- Dohmann, J. (2016). *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- EEG. (2022). *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21.Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2022 (BGBl. I S. 1353) geändert worden ist*.
- Eiselt, J. (2013). *Optimal Energie sparen beim Bauen, Sanieren und Wohnen Ein vergleichbarer Index aller Maßnahmen*. Wiesbaden: Springer Verlag GmbH.
- Europäische Kommission. (18. 02 2013). *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 812/2013 DER KOMMISSION. zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energieeffizienzzeichnung von Warmwasserbereitern, Warmwasserspeichern und Verbundanlagen aus Warmwasserbereitern und Solareinrichtungen*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32013R0812&from=DE>.
- Fisch et al., N. (2005). *Wärmespeicher* (4., erweiterte und vollständig überarbeitete Auflage Ausg.). (C. weitere Autoren: Sasse, H. Schnürer, & M. Bodmann, Hrsg.) Berlin: TÜV Media GmbH.

- GEG. (2020). *Gebäudeenergiegesetz vom 8. August 2020 (BGBl. I S. 1728), das durch Artikel 18a des Gesetzes vom 20. Juli 202 (BGBl. I S. 1237) geändert worden ist.*
- Goeke, J. (2021). *Thermische Energiespeicher in der Gebäudetechnik Sensible Speicher, Latente Speicher, Systemintegration* (1. Auflage Ausg.). Wiesbaden: Springer Vieweg Wiesbaden.
- Hartmann, F., & Schwarzburger, H. (2009). *Systemtechnik für Wärmepumpen Solar-und Umweltwärme für Wohngebäude*. München: Hüthig & Pflaum.
- IBC Solar. (2014). *Blogserie "Gewerblicher Eigenverbrauch" Teil IV: Eigenverbrauch optimieren – Einfluss von Ost-West-Ausrichtung und Anlagengröße*. Abgerufen am 08 2022 von Auswirkung der Anlagenausrichtung: <https://www.ibc-blog.de/2014/02/blogserie-gewerblicher-eigenverbrauch-teil-iv-eigenverbrauch-optimieren-einfluss-von-ost-west-ausrichtung-und-anlagengroesse/>
- IBC Solar. (kein Datum). *IBC Solar*. Abgerufen am 15. 08 2022 von BYD Battery-Box Premium HVS 5.1: https://shop.ibc-solar.de/products/de/shop/PV/Speicher/BYD_Speicher/BYD-Battery-Box-Premium-HVS-5-1/?card=27385
- Jossen, A., & Weydanz, W. (2019). *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen* (2., überarbeitete Auflage Ausg.). Göttingen: Cuvillier Verlag.
- Krug, N., & Groebert, L. (1983). *Planungs- und Installationshandbuch Wärmepumpenheizung*. Essen: Vulkan-Verlag.
- Loga et al., T. (10. 02 2015). Deutsche Wohngebäudetypologie. *Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden, 2. erweiterte Auflage*. (I. I. Umwelt, Hrsg.) Darmstadt: weitere Autoren: Stein, Britta; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf.
- Mertens, K. (2020). *Photovoltaik Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis 5., aktualisierte Auflage*. München: Carl hanser Verlag.
- Quaschnig, V. (2019). *Regenerative Energiesysteme: Technologie-Berechnung-Klimaschutz* (10., aktualisierte und erweiterte Auflage Ausg.). München: Hanser Verlag.
- Roth et al., A. (2022). Wärmepumpen statt Erdgasheizungen: Umstieg durch Ausbau der Solarenergie unterstützen. (D. I. (DIW), Hrsg.) *DIW Wochenbericht, Vol. 89*(Iss. 22), pp. 311-320. Von DIW Wochenbericht. abgerufen
- SENEC. (kein Datum). *SENEC*. Abgerufen am 07 2022 von <https://senec.com/de/produkte/senec-cloud>
- Sobotta, S. (2018). *Praxis Wärmepumpe Technik, Planung, Installation* (3., überarbeitete und erweiterte Auflage Ausg.). (D. D. V., Hrsg.) Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Vaillant . (05 2021). *Technisches Datenblatt aroTherm plus*. Abgerufen am 08 2022 von <https://www.vaillant.de/downloads-1/prospekte-2/systembroschuere/vaillant-systembroschuere-luftwasser-waermepumpen-2092159.pdf>
- Vaillant GmbH. (2020). *Vaillant Installations- und Wartungsanleitung*. Abgerufen am 28. 07 2022 von <https://www.vaillant.de>
- VDI e.V. (07 2021). *VDI 4655. Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwarmwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen*. (V. D. e.V., Hrsg.) Düsseldorf: Beuth Verlag.
- Walker, A. (21. 07 2022). *SüdWest Presse*. Abgerufen am 08 2022 von Wann werden Gasheizungen in Deutschland verboten?:

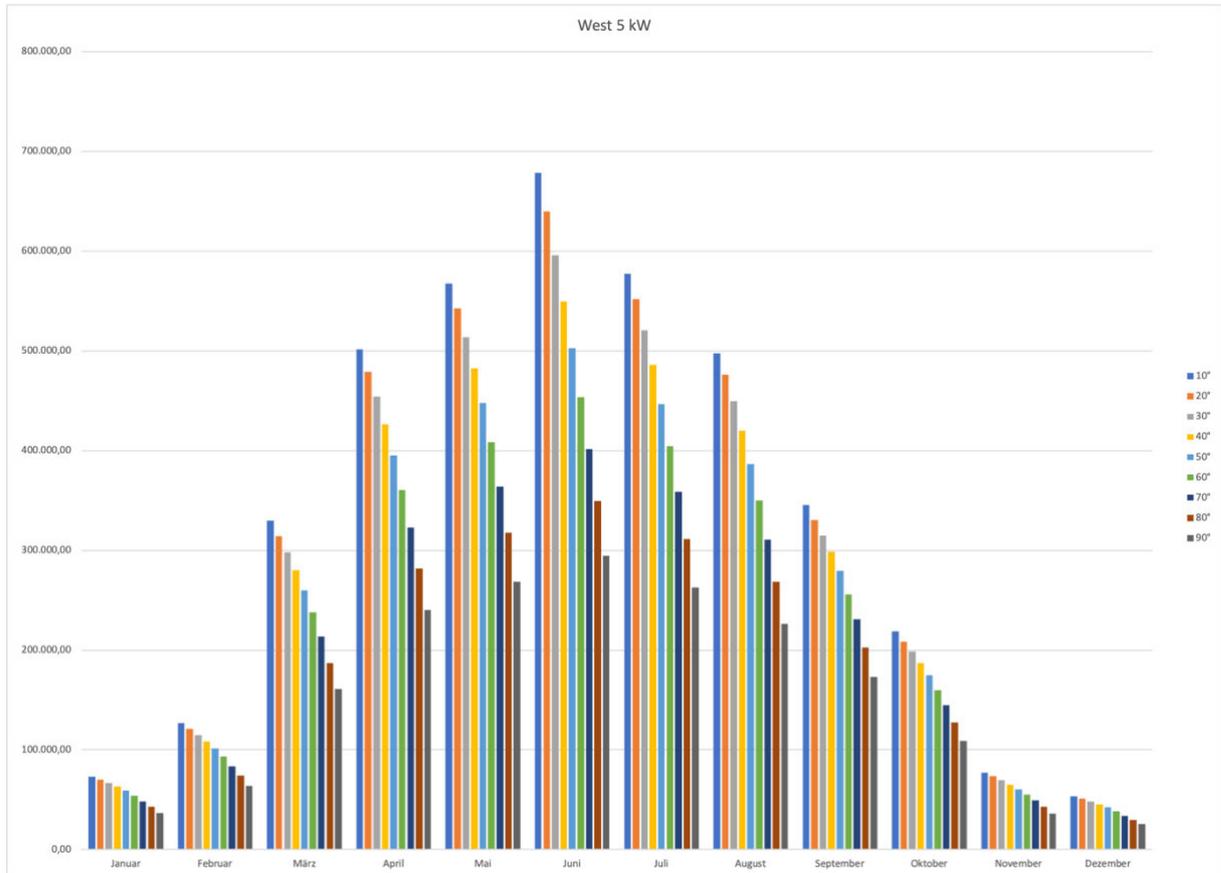
<https://www.swp.de/panorama/gasheizung-austauschen-verbot-ab-2024-65450919.html>

Wirth, H. (07. 17 2022). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland*. (F. ISE, Hrsg.)
Abgerufen am 02. 08 2022 von www.pv-fakten.de

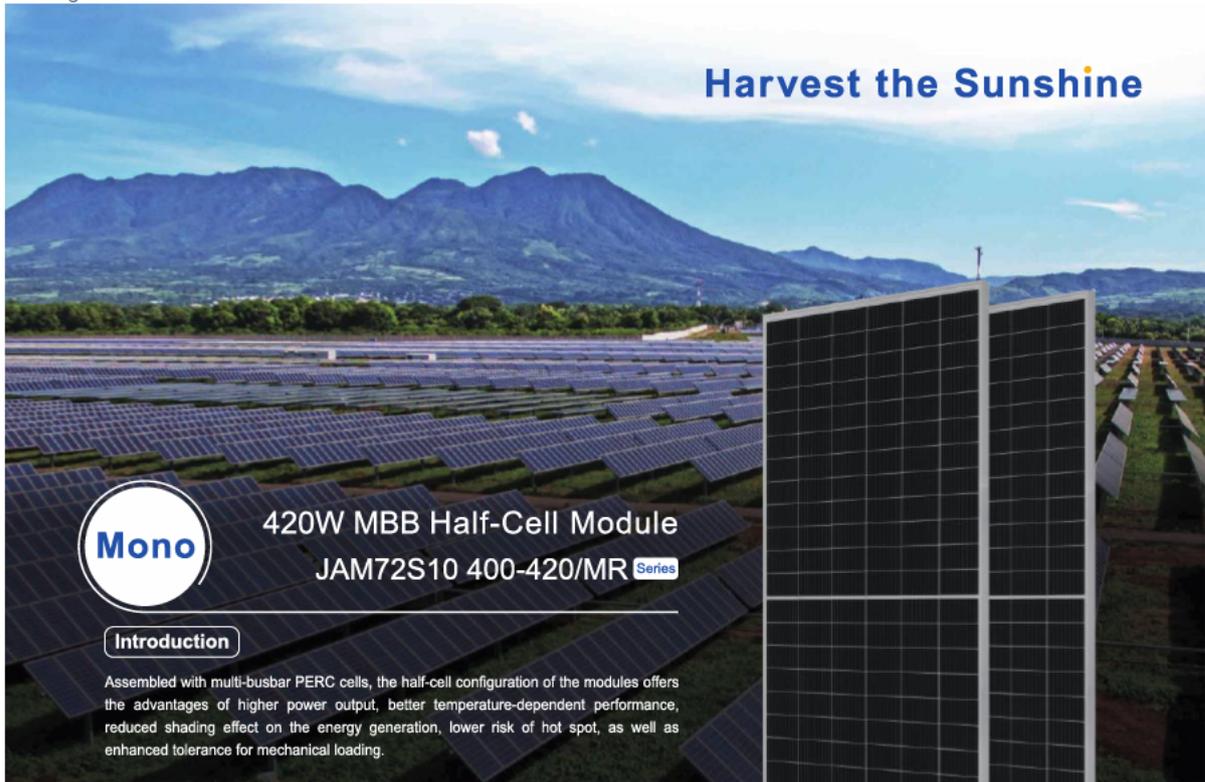
Zogg, M. (07. 09 2009). *Zertifikatslehrgang ETH in angewandten Erdwissenschaften
"Geothermie"- die Energie des 21. Jahrhunderts*". Abgerufen am 08 2022 von
https://www.zogg-engineering.ch/Publi/WP_ETH_Zogg.pdf

Anhang

Anhang 1: 5 kWh PV-Anlage in Westausrichtung



Die x-Achse zeigt die Monate des TRY und die y-Achse den Ertrag in W.



420W MBB Half-Cell Module
JAM72S10 400-420/MR Series

Introduction

Assembled with multi-busbar PERC cells, the half-cell configuration of the modules offers the advantages of higher power output, better temperature-dependent performance, reduced shading effect on the energy generation, lower risk of hot spot, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.



Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss



Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- 12-year product warranty
- 25-year linear power output warranty



■ JA Linear Power Warranty ■ Industry Warranty

Comprehensive Certificates

- IEC 61215, IEC 61730, UL61215, UL61730
- ISO 9001: 2015 Quality management systems
- ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems
- IEC 62941: 2019 Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Quality system for PV module manufacturing



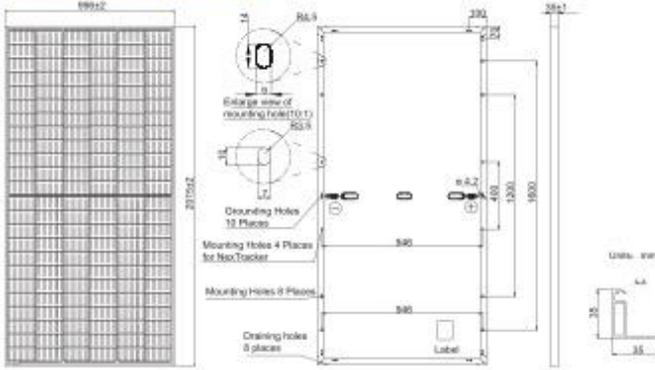
JASOLAR

www.jasolar.com

Specifications subject to technical changes and tests.
 JA Solar reserves the right of final interpretation.



MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	22.4kg±3%
Dimensions	2015±2mm×996±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC), 12AWG(UL)
No. of cells	144 (6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	MC4-EVD2/ QC 4, 10-35
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+)/400mm(-); Landscape: 1200mm(+)/1200mm(-)
Packaging Configuration	31pcs/pallet 682pcs/40HQ Container

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S10-400/MR	JAM72S10-405/MR	JAM72S10-410/MR	JAM72S10-415/MR	JAM72S10-420/MR
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	400	405	410	415	420
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	49.58	49.86	50.12	50.41	50.70
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	41.33	41.60	41.88	42.18	42.47
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	10.33	10.39	10.45	10.51	10.56
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	9.88	9.74	9.79	9.84	9.89
Module Efficiency [%]	19.9	20.2	20.4	20.7	20.9
Power Tolerance	0→±5W				
Temperature Coefficient of I _{sc} (α _{Isc})	+0.044%/°C				
Temperature Coefficient of V _{oc} (β _{Voc})	-0.272%/°C				
Temperature Coefficient of P _{max} (γ _{Pmp})	-0.350%/°C				
STC	Irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C, AM1.5G				

Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.
*For NexTracker installations static loading performance: front load measures 2400Pa, while back load measures 2400Pa.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

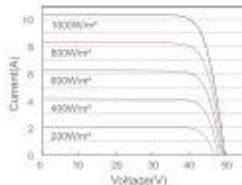
TYPE	JAM72S10-400/MR	JAM72S10-405/MR	JAM72S10-410/MR	JAM72S10-415/MR	JAM72S10-420/MR
Rated Max Power(P _{max}) [W]	302	308	310	314	318
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	46.41	46.65	46.91	47.16	47.38
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	38.65	38.90	39.16	39.41	39.60
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	8.25	8.31	8.36	8.41	8.46
Max Power Current(I _{mp}) [A]	7.81	7.87	7.92	7.97	8.03
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G				

OPERATING CONDITIONS

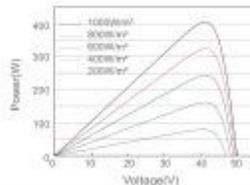
Maximum System Voltage	1000V/1500V DC(IEC)
Operating Temperature	-40°C→+85°C
Maximum Series Fuse	20A
Maximum Static Load Front*	5400Pa(112 lb/ft ²)
Maximum Static Load Back*	2400Pa(50 lb/ft ²)
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II
Fire Performance	UL Type 1

CHARACTERISTICS

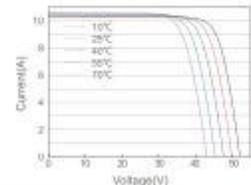
Current-Voltage Curve JAM72S10-405/MR



Power-Voltage Curve JAM72S10-405/MR



Current-Voltage Curve JAM72S10-405/MR



Premium Cells, Premium Modules

Version No. : Global_EN_20220512A



**Ertragsberechnung PV
Inbetriebnahme**

**Bachelorarbeit Bestandshaus
September 2022**

Diese Zahlen müssen dann aus der Excel kommen!

	0° Süd	45°	45°	45°	30°	30°	30°	30°	30°
Vergütungssätze									
C/kWh	35								
Einpeisung	8,60								
Ausrichtung		45°	45°	45°	30°	30°	30°	30°	30°
zugrundegelegter Jahresstromverbrauch		14.893	14.893	14.893	14.893	14.893	14.893	14.893	14.893
Speicher									
Speicherkapazität		nein	ja						
		0,00	5,00	7,50	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Anlagengröße									
spez. Jahresertrag		851	851	851	851	851	851	851	851
Anteil Eigenverbrauch	%	36	49	52	54	54	54	53	53
Autarkiegrad	%	21	28	30	31	31	30	31	31
Laufzeit***	a	20	20	20	20	20	20	20	20
Ertrag									
jährlich		8.506	8.506	8.506	8.506	8.506	8.506	8.506	8.506
davon Eigenverbrauch		3.062	4.168	4.423	4.593	4.593	4.593	4.593	4.680
Stromkostenersparnis									
Wärmepumpenstrom	€	4.899	3.543	3.096	2.526	2.526	2.527	2.808	2.808
Haushaltsstrom	€	14.576	24.216	26.627	28.616	28.616	27.425	28.828	28.828
Gesamt (20 a)	€	19.475	27.758	29.723	31.142	31.142	27.640	30.352	31.636
Vergütung									
jährlich		468	373	351	336	372	402	372	357
Gesamt (20 a)	€	9.363	7.461	7.023	6.730	6.730	8.049	7.442	7.138
Nettopreis Anlage	€	23.286	29.386	31.386	33.386	33.386	30.387	32.387	34.387
Gewinn in 20 Jahren	€	5.553	5.834	5.360	4.486	4.486	5.303	5.408	4.368
Amortisation									
ohne Berücksichtigung von Strompreisenänderungen	Jahre	16,15	16,69	17,08	17,63	17,63	17,03	17,14	17,74
theoretische Rendite	%	1,19	0,99	0,85	0,67	0,67	0,87	0,83	0,64



**Ertragsberechnung PV
Inbetriebnahme**

**Bachelorarbeit Niedrigenergiehaus
September 2022**

Diese Zahlen müssen dann aus der Excel kommen!

	0° Süd,	45°	45°	45°	45°	15°	15°	20°	25°
Vergütungssätze									
Ct/kWh									
Einspeisung	8,60								
Ausrichtung	0° Süd,	45°	45°	45°	45°	15°	15°	20°	25°
Strompreis Haushalt	25								
Strompreis WP									
Strom für Heizung und TWW	2516								
Strom für DLE	1000								
Haushaltsstrom	6000								
zugrundegelegter Jahresstromverbrauch		8.516	8.516	8.516	8.516	8.516	8.516	8.516	8.516
Speicher									
Speicherkapazität		nein	ja						
		0,00	5,00	7,50	10,00	10,00	5,00	7,50	10,00
Anlagengröße		10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
spez. Jahresertrag		851	851	851	851	851	872	881	884
Anteil Eigenverbrauch	%	28	40	45	48	48	40	44	46
Autarkiegrad	%	28	40	45	48	48	41	45	48
Laufzeit	a	20	20	20	20	20	20	20	20
Ertrag									
jährlich	kWh	8.506	8.506	8.506	8.506	8.506	8.718	8.805	8.840
davon Eigenverbrauch	kWh	2.392	3.402	3.828	4.083	4.083	3.487	3.874	4.066
Stromkostensparnis									
Wärmepumpenstrom	€	1.072	680	574	408	408	523	581	407
Haushaltsstrom + DLE	€	15.338	22.864	25.990	28.009	28.009	23.678	26.577	27.896
Gesamt (20 a)	€	16.410	23.545	26.564	28.417	28.417	24.201	27.158	28.302
Vergütung									
jährlich	€	527	439	402	380	380	450	424	411
Gesamt (20 a)	€	10.534	8.778	8.047	7.608	7.608	8.997	8.481	8.211
Nettopreis Anlage	€	23.286	29.386	31.386	33.386	33.386	30.387	32.387	34.387
Gewinn in 20 Jahren	€	3.658	2.937	3.225	2.639	2.639	2.812	3.253	2.126
Amortisation	Jahre	17,28	18,18	18,14	18,53	18,53	18,31	18,17	18,84
ohne Berücksichtigung von Stromerhöhungen									
theoretische Rendite	%	0,79	0,50	0,51	0,40	0,40	0,46	0,50	0,31