



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg

Fakultät Life Sciences

Entwicklung und Aufbau der Steuerung und Regelung einer
Experimentalanlage zur Erforschung des kombinierten Betriebs einer
Photovoltaikanlage mit Heizstab und Sole-Wasser-Wärmepumpe zur
Trinkwarmwasserversorgung

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science (B.Sc.)

im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

Grupp, Linus

Matrikelnummer: 2073784

Hamburg

am 21.10.2015

Gutachter: Prof. Dr. Gregorzewski, Armin (HAW Hamburg)
Gutachter: Dipl. – Ing. Littwin, Matthias (ISFH)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in Zusammenarbeit mit dem Institut für Solarenergieforschung Hameln.

Kurzzusammenfassung

Am Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) wurde eine Experimentalanlage aufgebaut. Damit ist es möglich die thermischen und elektrischen Energieflüsse eines Haushalts mithilfe ausgewählter Typtage nachzubilden. Diverse Systemkonfigurationen können dabei durch den Zusammenschluss einzelner Komponenten abgebildet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der kombinierte Betrieb einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) mit Heizstab und/oder Wärmepumpe in einem Einfamilienhaushalt (EFH) nachgebildet. Die Regelung für die Nutzung von Photovoltaiküberschüssen (PV-Überschüssen) mithilfe der thermischen Komponenten wird implementiert und getestet.

Zum Schluss wird der Betrieb der Anlage mit der Regelung auf seine Sinnhaftigkeit überprüft und weitere Optionen für zukünftige Untersuchungen dieser Konfigurationen vorgeschlagen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
1. Einleitung	1
2. Stand der Technik und Rahmenbedingungen	3
2.1 Politische Rahmenbedingungen	3
2.2 Photovoltaik	5
2.3 Photovoltaik und Batteriespeicher	6
2.4 Photovoltaik und Wärmepumpe	8
2.5 Photovoltaik und Heizstab	10
3. Aufbau der Experimentalanlage	13
3.1 Photovoltaikemulator	14
3.2 Wechselrichter	15
3.3 Elektrische Lasten	15
3.4 Wärmepumpe	15
3.5 Pufferspeicher, Heizstäbe und Frischwasserstation	16
4. Festlegen der Testbedingungen	19
4.1 Elektrische Last	19
4.2 Zapfprofil	20
4.3 Solare Strahlungsdaten	22
4.4 Umgebungstemperatur und Modultemperatur	24
4.5 Photovoltaikanlage	24
5. Steuer- und Regelprogramm	27
5.1 Heizstab	29
5.2 Wärmepumpe	32
5.3 Heizstab und Wärmepumpe	33
6. Testablauf und Testergebnisse	36
6.1 Heizstab	37
6.2 Wärmepumpe	40
6.3 Heizstab und Wärmepumpe	44
6.4 Zusammenfassung der Testergebnisse	46
7. Fazit und Ausblick	49
Quellenverzeichnis	50
A. Anhang	a

Abkürzungsverzeichnis

CO₂	Kohlenstoffdioxid
PV	Photovoltaik
ISFH	Institut für Solarenergieforschung Hameln
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
Li	Lithium
WP	Wärmepumpe
HS	Heizstab
COP	Coefficient of Performance (Leistungszahl)
JAZ	Jahresarbeitszahl
SG	Smart Grid
DC	Direct Current
MPP	Maximum Power Point
ÜWB	Übergangszeit, Werktag, bedeckt
ÜWH	Übergangszeit, Werktag, heiter
WWH	Winter, Werktag, heiter
STC	Standard Test Conditions
kW_p	Kilowatt-Peak
T85%	Temperatur in 85 % relativer Höhe des Pufferspeichers
T78%	Temperatur in 78 % relativer Höhe des Pufferspeichers

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: BISHERIGE UND PROGNOSTIZIERTE KOSTENENTWICKLUNG DER EEG-VERGÜTUNG FÜR KLEINE PV-SYSTEME, HAUSHALTSTROM- UND ÖLPREISE [4]	3
ABBILDUNG 2.2: EIGENVERBRAUCHSANTEIL IN ABHÄNGIGKEIT VON LEISTUNG DES SOLARGENERATORS FÜR EINEN EINFAMILIENHAUSHALT MIT EINEM JAHRESSTROMVERBRAUCH VON 4700 KILOWATTSTUNDEN [11]..	5
ABBILDUNG 2.3: „DIREKTES LADEN“ EINES PV-SPEICHERSYSTEMS (VGL. [14]).....	6
ABBILDUNG 2.4: „VERZÖGERTES LADEN“ EINES PV-SPEICHERSYSTEMS (VGL. [14]).....	6
ABBILDUNG 2.5: „PEAK SHAVING“ EINES PV-SPEICHERSYSTEMS (VGL. [14]).....	7
ABBILDUNG 2.6: AUTARKIEGRAD IN ABHÄNGIGKEIT DER NUTZBAREN SPEICHERKAPAZITÄT UND PV-LEISTUNG NORMIERT AUF DEN JAHRESSTROMBEDARF IN MWh [18].....	7
ABBILDUNG 2.7: FUNKTIONSPRINZIP EINER WÄRMEPUMPE [23]	9
ABBILDUNG 3.1: AUFBAU DER EXPERIMENTALANLAGE MIT ALLEN ENERGETISCHEN KOMPONENTEN	14
ABBILDUNG 3.2: ABHÄNGIGKEIT ZWISCHEN SEKUNDÄRSEITIGER RÜCKLAUFTEMPERATUR, ELEKTRISCHER LEISTUNGS-AUFNAHME, THERMISCHER LEISTUNG UND COP BEIM BETRIEB DER WÄRMEPUMPE	16
ABBILDUNG 3.3: PUFFERSPEICHER DER EXPERIMENTALANLAGE MIT ALLEN ANSCHLÜSSEN.....	17
ABBILDUNG 4.1: DHW CALC HAUPTFENSTER	21
ABBILDUNG 4.2: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG ÜWB	23
ABBILDUNG 4.3: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG ÜWH.....	23
ABBILDUNG 4.4: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG WWH.....	23
ABBILDUNG 5.1: FRONTPANEL DES HAUPTPROGRAMMS	28
ABBILDUNG 5.2: EINSTELLUNGSMÖGLICHKEITEN IM LABVIEW PROGRAMM FÜR DEN HEIZSTAB	29
ABBILDUNG 5.3: REGELPROGRAMM DES HEIZSTABS	31
ABBILDUNG 5.4: EINSTELLUNGSMÖGLICHKEITEN IM LABVIEW PROGRAMM FÜR DIE WÄRMEPUMPE	32
ABBILDUNG 5.5: REGELPROGRAMM DER WÄRMEPUMPE.....	33
ABBILDUNG 5.6: REGELPROGRAMM FÜR DEN GEMEINSAMEN BETRIEB VON HEIZSTAB UND WÄRMEPUMPE.....	35
ABBILDUNG 6.1: TESTABLAUF.....	36
ABBILDUNG 6.2: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT) UND DER LEISTUNG DES HEIZSTABS (BLAU) AM TYPTAG ÜWB.....	39
ABBILDUNG 6.3: ZEITLICHER VERLAUF DER NUTZUNG DER PV-ERZEUGUNG AM TYPTAG ÜWB; ROT FÜR ELEKTRISCHE LAST, BLAU FÜR HEIZSTAB	39
ABBILDUNG 6.4: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT) UND DER LEISTUNG DES HEIZSTABS (BLAU) AM TYPTAG ÜWH	40
ABBILDUNG 6.5: ZEITLICHER VERLAUF DER NUTZUNG DER PV-ERZEUGUNG AM TYPTAG WWH; ROT FÜR ELEKTRISCHE LAST, GRÜN FÜR WÄRMEPUMPE	42
ABBILDUNG 6.6: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT) UND DER LEISTUNG DER WÄRMEPUMPE (GRÜN) AM TYPTAG WWH	42
ABBILDUNG 6.7: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT) UND DER LEISTUNG DER WÄRMEPUMPE (GRÜN) AM TYPTAG ÜWH	43
ABBILDUNG 6.8: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT) UND DER LEISTUNG DER WÄRMEPUMPE (GRÜN) AM TYPTAG ÜWB	44
ABBILDUNG 6.9: ZEITLICHER VERLAUF DER ELEKTRISCHEN LAST (ROT), DER LEISTUNG DES HEIZSTABS (BLAU) UND DER LEISTUNG DER WÄRMEPUMPE (GRÜN) AM TYPTAG WWH	45
ABBILDUNG 6.10: INS NETZ EINGESPEISTE PV-LEISTUNG AM TYPTAG ÜWH.....	45
ABBILDUNG 6.11: INS NETZ EINGESPEISTE PV-LEISTUNG AM TYPTAG ÜWB	46
ABBILDUNG 6.12: PV-EIGENVERBRAUCH DER EXPERIMENTALANLAGEN-KONFIGURATIONEN AN DEN TYPTAGEN ÜWB, ÜWH UND WWH	47
ABBILDUNG 6.13: AUTARKIEGRAD DER EXPERIMENTALANLAGEN-KONFIGURATIONEN AN DEN TYPTAGEN ÜWB, ÜWH UND WWH	47

ABBILDUNG 6.14: GESAMTSTROMVERBRAUCH INKLUSIVE DEM STROMVERBRAUCH DER WÄRMEERZEUGER AN DEN TYPTAGEN MIT DEN VERSCHIEDENEN KONFIGURATIONEN	48
ABBILDUNG A.1: ELEKTRISCHER LASTVERLAUF AM TYPTAG ÜWB.....	A
ABBILDUNG A.2: ELEKTRISCHER LASTVERLAUF AM TYPTAG ÜWH	A
ABBILDUNG A.3: ELEKTRISCHER LASTVERLAUF AM TYPTAG WWH	B
ABBILDUNG A.4: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG ÜWB	B
ABBILDUNG A.5: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG ÜWH.....	C
ABBILDUNG A.6: SOLARSTRAHLUNGSPROFIL AM TYPTAG WWH.....	C
ABBILDUNG A.7: ZAPFPROFIL DES TRINKWARMWASSERS AM TYPTAG ÜWB UND ÜWH	C
ABBILDUNG A.8: ZAPFPROFIL DES TRINKWARMWASSERS AM TYPTAG WWH.....	D

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: VERGLEICH VON BATTERIESYSTEMEN [19] [20] [21]	8
TABELLE 4.1: ENERGIEVERBRÄUCHE NACH TYPTAGEN DER VDI 4655	20
TABELLE 4.2: KENNDATEN DES PV-MODULFELDES [44].....	25
TABELLE 6.1: UNTERSUCHTE TYPTAGE MIT IHREN KONFIGURATIONEN	37
TABELLE 6.2: ERGEBNISSE DER TYPTAGE MIT DEM HEIZSTAB	37
TABELLE 6.3: ERGEBNISSE DER TYPTAGE MIT DER WÄRMEPUMPE	40
TABELLE 6.4: ERGEBNISSE DER TYPTAGE MIT HEIZSTAB UND WÄRMEPUMPE	44
TABELLE A.1: FÜR DEN PV-EMULATOR GENUTZT KENNWERTE DES PV-MODULFELDES	A

1. Einleitung

Bis vor wenigen Jahren war es in der Regel so, dass Strom- und Wärmeerzeugungssysteme zur Gebäudeenergieversorgung getrennt voneinander betrachtet wurden, selbst wenn beide gleichzeitig zusammen in einem Gesamtsystem betrieben wurden. Diese Betrachtungsweise vernachlässigt, dass auch wenn beide Systeme nicht direkt miteinander verknüpft sind, sie doch einen nicht unerheblichen Einfluss aufeinander haben. Weisen beide Systeme separat hohe Wirkungsgrade bzw. Leistungszahlen auf, kann es vorkommen, dass diese im Verbund wesentlich niedriger ausfallen als erwartet. Daher ist es wichtig Einzelsysteme zusammen zu bewerten und eine sinnvolle Kommunikation der einzelnen Komponenten von Energieerzeugungssystemen zu ermöglichen.

Seit der Wahrnehmung des Klimawandels wurde von den politischen Entscheidungsträgern eine Umstrukturierung des deutschen Energiemarkts in Angriff genommen. Geplante Veränderungen sind beispielsweise zunehmende Effizienz, intelligente Stromnetze (Smart Grids), Verringerung von Treibhausgas-Ausstoß und Senkung des Energiebedarfes. Ziele der Bundesregierung sind unter anderem bis 2020 ein 10 % geringerer Stromverbrauch im Vergleich zu 2008 und eine 40 % niedrigere CO₂-Äquivalent-Emission im Vergleich zu 1990 [1]. Um den Treibhausgas-Ausstoß zu limitieren ist eine wesentliche Maßnahme das Ersetzen von Kraftwerken basierend auf fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energien. Im Jahr 2014 hatten die erneuerbaren Energien einen Anteil von knapp 26 % an der Stromerzeugung. Die Photovoltaik (PV) steht mit ca. 6 % an dritter Stelle der erneuerbaren Energien [2].

Das Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH) betreibt eine Experimentalanlage zur Untersuchung von kombinierten elektrisch-thermischen Gebäudeenergieversorgungssystemen. Dabei wird mit realen Komponenten untersucht, welche solaren Deckungsgrade ohne Einschränkungen des Nutzerkomforts mit verschiedenen Systemkombinationen möglich sind. Mit Hilfe von gemessenen oder synthetischen Lastprofilen und PV-Erzeugungsdaten kann in der Experimentalanlage das Betriebsverhalten von einzelnen Anlagenkomponenten und der Komponenten im Verbund untersucht werden. Die Haushaltsprofil- sowie PV-Erzeugungsdaten werden genutzt, um das Betriebsverhalten der Anlage an einzelnen Tagen oder Wochen zu untersuchen. Gesteuert und geregelt wird die Experimentalanlage über ein LabVIEW-Programm (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench).

Ziel der Arbeit ist es, Betriebsstrategien für eine Steuerung und Regelung zum Betrieb einer Photovoltaikanlage in Kombination mit thermischen Erzeugern zur Warmwasserbereitung zu entwickeln. Dazu werden verschiedene Konfigurationen zur Trinkwarmwasserbereitung in der Experimentalanlage aufgebaut und in Versuchsdurchläufen untersucht. Am Ende werden basierend auf den Ergebnissen der Versuchsdurchläufe die verschiedenen Anlagenkonfigurationen und

Einleitung

Betriebsstrategien bewertet und Empfehlungen gegeben, wie ein solches photovoltaisch-thermisches Trinkwarmwassersystem sinnvoll betrieben werden kann.

2. Stand der Technik und Rahmenbedingungen

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Entwicklung der Photovoltaik im Zusammenhang mit den politischen Zielen eingegangen. Anschließend erfolgt eine Darstellung verschiedener Systemausführungen von Photovoltaikanlagen mit und ohne zusätzliche Komponenten bei Privathaushalten.

2.1 Politische Rahmenbedingungen

Mit Erreichen der Netzparität¹ (Grid Parity), also der Zeitpunkt zu dem die Erneuerbare-Energien-Gesetz-Vergütung und der Haushaltsstrompreis gleich sind, ist ein rentabler Betrieb einer PV-Anlage bei Privathaushalten aktuell und in Zukunft am ehesten mit einem hohen PV-Eigenverbrauch gegeben. In Abbildung 2.1 ist die Kostenentwicklung der EEG-Vergütung für kleine PV-Systeme, Haushaltstrom- und Ölpreise dargestellt [3].

Der PV-Eigenverbrauch EV berechnet sich aus dem Verhältnis von der im Haushalt verbrauchten PV-Energie E_{PVH} zu der insgesamt erzeugten PV-Energie E_{PV} .

$$EV = \frac{E_{PVH}}{E_{PV}} \quad (1)$$

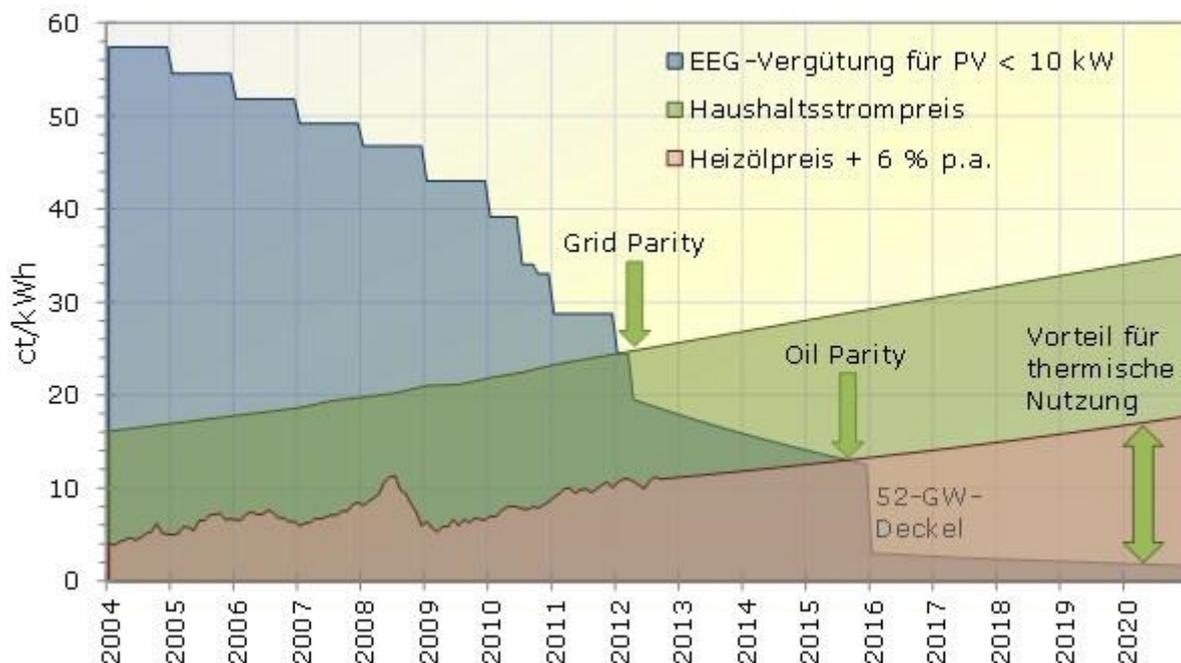


Abbildung 2.1: Bisherige und prognostizierte Kostenentwicklung der EEG-Vergütung für kleine PV-Systeme, Haushaltstrom- und Ölpreise [4]

¹ Da die Strombezugskosten für Haushaltsstrom generell am teuersten sind, wurde die Netzparität im Jahr 2012 dort zuerst erreicht.

Stand der Technik und Rahmenbedingungen

Der PV-Eigenverbrauch steigt mit sinkender PV-Leistung (s. Abbildung 2.2). Der Nachteil besonders kleiner PV-Anlagen ist jedoch, dass die spezifischen Investitionskosten deutlich höher sind als die größerer PV-Anlagen. Daher ist es sinnvoll, einen geeigneten Mittelweg zwischen PV-Anlagengröße und PV-Eigenverbrauch zu wählen.

Größtmögliche Unabhängigkeit von den Energieversorgungsunternehmen lässt sich hingegen mit einem hohen Autarkiegrad erreichen. Der Autarkiegrad steigt in der Regel mit zunehmender Größe der PV-Anlage [5]. Der Autarkiegrad A berechnet sich aus dem Verhältnis von der im Haushalt verbrauchten PV-Energie E_{PVH} und der insgesamt verbrauchten Energie der Haushaltslast E_H .

$$A = \frac{E_{PVH}}{E_H} \quad (2)$$

Der Zubau der PV-Anlagen wird von vielen Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) oder der Entwicklung neuer Technologie. Des Weiteren ist der Markt für Photovoltaik stark globalisiert. Der Wettbewerb der Unternehmen führt dazu, dass die Preise in den letzten Jahren stetig gesunken sind. So kostete eine PV-Anlage in Deutschland vor 4 Jahren noch etwa 2600 €/kW_p. Mit weiterem Abwärtstrend liegt der aktuelle Preis bei 570 €/kW_p [6]. In Verbindung mit steigenden Strompreisen² und einer kontinuierlich fallenden Einspeisevergütung für PV-Strom³ wird es für Anlagenbetreiber immer interessanter den erzeugten PV-Strom selbst zu verbrauchen.

Angefangen mit dem EEG im Jahr 2000 wurden von der Bundesregierung feste Einspeisevergütungen für PV-Strom garantiert. Dies hatte zur Folge, dass sich die Anzahl der PV-Anlagen von 2000 bis 2014 von gut 15000 auf 1,5 Mio. erhöhte [7]. Da diese Vergütung bis vor wenigen Jahren noch hoch genug war, um eine Anlage innerhalb von ungefähr 13 bis 15 Jahren zu amortisieren, wurden Anlagen zur reinen Netzeinspeisung betrieben [8]. Mit der kontinuierlichen Senkung der Vergütung auf aktuell 12,34 ct/kWh für Kleinanlagen⁴ wird der PV-Eigenverbrauch neben der Netzeinspeisung für einen ökonomisch sinnvollen Betrieb zunehmend wichtiger [9]. Um den PV-Eigenverbrauch zu maximieren ist es unabdingbar den Betrieb der PV-Anlage mit anderen Komponenten zur Gebäudeenergieversorgung zu verknüpfen. Möglichkeiten zur Verknüpfung können Wärmepumpe, Batteriespeicher und Heizstäbe sein. Damit die Rentabilität eines solchen Systems gegeben ist, müssen die Wärmegebungskosten mindestens so niedrig sein wie die konventioneller Systeme, beispielsweise einer Gasheizung. Im Jahr 2014 lag der durchschnittliche Preis bei 7,14 ct/kWh Erdgas [10]. Da zur Netzentlastung eine Abregelung der PV-Anlagen von 70 % der Nennleistung vorgegeben ist, lässt sich diese sonst verlorene Energie mit einem oben genannten System nutzen, was einen zusätzlichen Anreiz schafft.

² Innerhalb der letzten 4 Jahre um 4 ct/kWh auf 28 ct/kWh [49]

³ 2011 noch 28,7 ct/kWh, nun 12,3 ct/kWh [47] [48]

⁴ Kleinanlage bedeutet eine Leistung von ≤ 10 kW_p

2.2 Photovoltaik

Die simpelste Methode ist die PV-Anlage ohne zusätzliche Systeme zu betreiben. Favorisiert deckt die Erzeugung der PV-Anlage den eigenen Strombedarf. Werden Überschüsse produziert, wird über einen Zweirichtungszähler in das Netz eingespeist und der Strom vergütet. Ohne Veränderung des Nutzerverhaltens wird so ein PV-Eigenverbrauch von um die 30 % erreicht, sofern das Verhältnis von PV-Leistung und Jahresstromverbrauch etwa bei 1 liegt⁵. In Abbildung 2.2 wird dieser Zusammenhang deutlich.

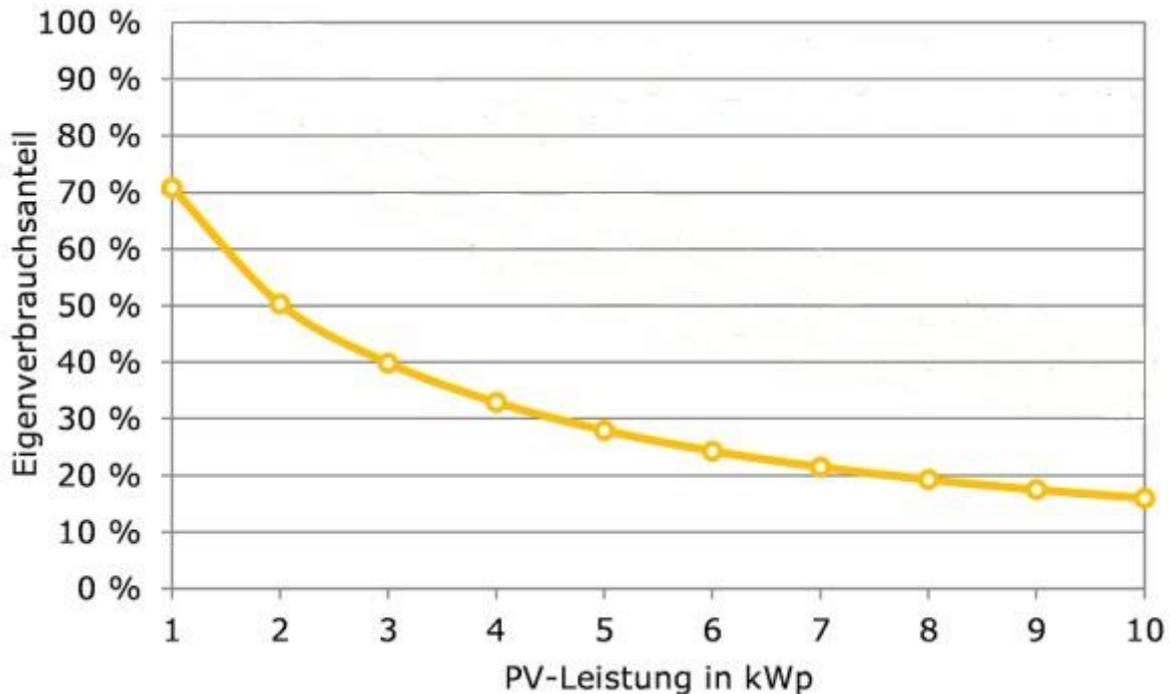


Abbildung 2.2: Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit von Leistung des Solargenerators für einen Einfamilienhaushalt mit einem Jahresstromverbrauch von 4700 Kilowattstunden [11]

Wenn bewusst Verbrauchsspitzen in den Mittag verschoben werden (z. B. Waschmaschine, Staubsaugen, Trockner), kann sich der PV-Eigenverbrauch auf bis zu 40 % steigern, da zu dieser Zeit normalerweise am meisten PV-Erzeugung auftritt. Für den maximalen Ertrag in Deutschland sollte die PV-Anlage nach Süden ausgerichtet sein und einen Neigungswinkel von um die 30° aufweisen. Durch einen größeren Neigungswinkel erhöht sich der Ertrag in den Wintermonaten, wobei sich der Jahresertrag der Anlage verringert. Es besteht außerdem die Option PV-Anlagen nachzuführen. Dies ist ein- und zweiachsig möglich. Da in Deutschland mehr als die Hälfte der Strahlung diffus ist, liegt der maximale Mehrertrag durch zweiachsige Nachführung bei 30 %. In Ländern mit höherem Anteil direkter Solarstrahlung kann der Mehrertrag 50 % überschreiten. Aufgrund der höheren Investitionskosten wird in Deutschland normalerweise auf eine Nachführung verzichtet [12].

⁵ Die Einheiten dieses Verhältnisses sind kW_p / MWh

2.3 Photovoltaik und Batteriespeicher

Grundsätzlich gibt es mehrere Betriebsvarianten, um PV-Speichersysteme zu betreiben. Die gängigste Methode ist der „netzverträgliche Betrieb“ (s. Abbildung 2.3). Dabei müssen vom Netzbetreiber gestellte Mindestanforderungen bezüglich Qualität, Sicherheit und Zuverlässigkeit eingehalten werden. Beispielsweise liegen die Grenzwerte der Frequenz der eingespeisten Spannung bei 47,5 Hz und 51,5 Hz [13]. Beim „netzdienlichen Betrieb“ (s. Abbildung 2.4) trägt das System aktiv zur Stabilisierung des Stromnetzes bei, was jedoch mit suboptimaler Ausschöpfung des Batteriesystems einhergehen kann [14]. Die unkomplizierteste Methode ist den Speicher sofort zu laden, wenn PV-Erzeugung auftritt (s. Abbildung 2.3). In dieser Betriebsweise kann es jedoch vorkommen, dass die Mittagsspitze der PV-Erzeugung das Netz trotz des Speichers belastet, da dieser bis dahin schon voll geladen sein kann. Wird ein PV-Speichersystem eigenverbrauchsorientiert betrieben, hat das kaum positive Einflüsse auf die Netze [15].

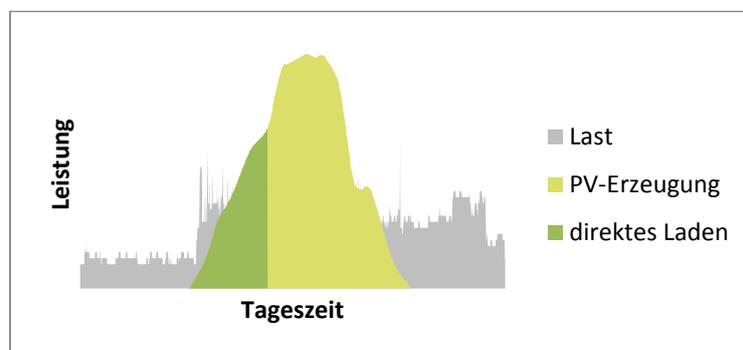


Abbildung 2.3: „direktes Laden“ eines PV-Speichersystems (vgl. [14])

Eine andere Möglichkeit ist das verzögerte Laden (s. Abbildung 2.4). Dabei wird der Batteriespeicher erst ab einer bestimmten Überschussleistung mit konstanter Leistung geladen, wodurch die Wahrscheinlichkeit deutlich größer ist, die Mittagsspitze zu verringern.

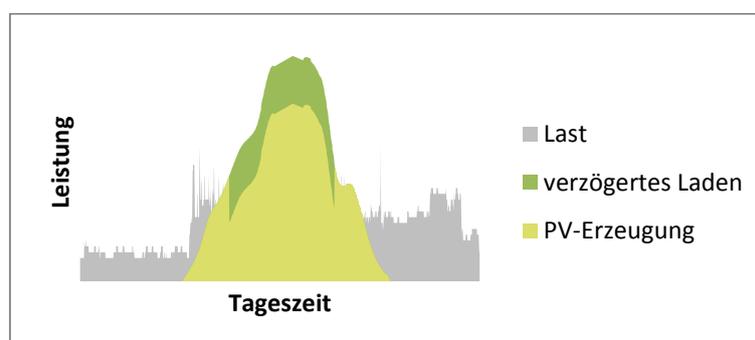


Abbildung 2.4: „Verzögertes Laden“ eines PV-Speichersystems (vgl. [14])

Stand der Technik und Rahmenbedingungen

Am netzdienlichsten ist das Peak Shaving (s. Abbildung 2.5). Der Batteriespeicher wird mit allen Überschüssen, die ab einem festgelegten Wert auftreten, geladen [14].

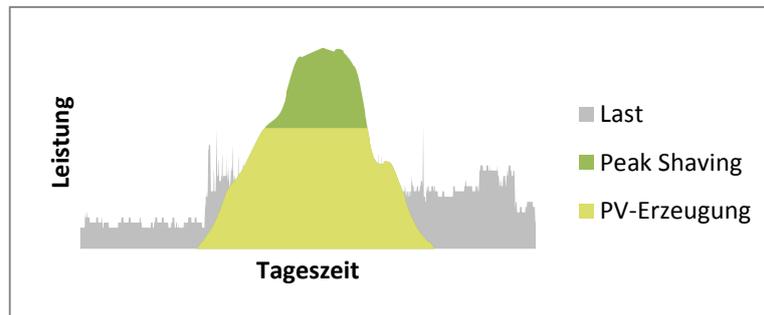


Abbildung 2.5: „Peak Shaving“ eines PV-Speichersystems (vgl. [14])

Im Hinblick auf die Abregelung bei PV-Anlagen bis 30 kW_p auf aktuell 0,7 kW/kW_p wird es mit sinkenden Preisen für Batteriespeicher immer wirtschaftlich interessanter, einen Batteriespeicher verzögert und mit Peak Shaving zu laden, um so die Abregelungsverluste zu minimieren. Aus Simulationen geht hervor, dass bei einer Abregelung auf 0,6 kW/kW_p 7 % des Jahresertrags verloren gehen [16]. Erreichbare Eigenverbrauchsanteile von PV-Speichersystemen liegen bei bis zu 90 % [17].

Abbildung 2.6 zeigt den Autarkiegrad in Abhängigkeit der nutzbaren Speicherkapazität und der PV-Leistung normiert auf den Jahresstrombedarf. Realistische Werte liegen zwischen 45 % und 60 %.

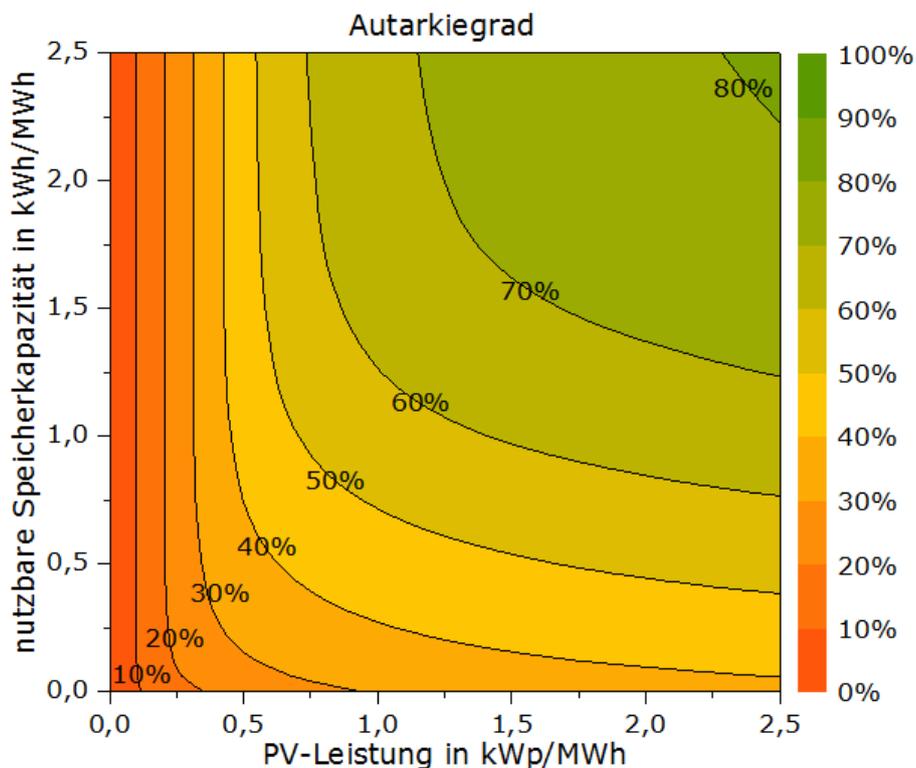


Abbildung 2.6: Autarkiegrad in Abhängigkeit der nutzbaren Speicherkapazität und PV-Leistung normiert auf den Jahresstrombedarf in MWh [18]

Marktübliche Speichersysteme basieren auf Blei- oder Lithiumbatterien, wobei jedes System seine eigenen Vorzüge hat, wie in Tabelle 2.1 zu sehen ist.

Tabelle 2.1: Vergleich von Batteriesystemen [19] [20] [21]

	Li-Ionen	Blei-Säure
Wirkungsgrad / %	93-98	70-85
Zyklenanzahl	4000-7000	1200-1500
Lebensdauer / a	ca. 20	ca. 10
Kosten / €/nutzbare kWh	2400	1800
Spezifische Energie / Wh/kg	70-200	30-40
Recycling	aufwendig	einfach

Momentan ist es jedoch noch nicht wirtschaftlich Batteriespeicher mit PV-Anlagen zu verbinden, da elektrochemisch gespeicherte PV-Energie aktuell 24-82 ct/kWh kostet. Es wird davon ausgegangen, dass sich das bis 2020 ändern könnte [12] [17]. Dies hängt damit zusammen, dass die Differenz zwischen Stromgestehungskosten von PV-Anlagen bzw. der Einspeisevergütung und dem Haushaltsstrompreis zukünftig immer größer wird, sodass es nur eine Frage der Zeit ist, bis sich ein PV-Speichersystem lohnt [22].

2.4 Photovoltaik und Wärmepumpe

Eine weitere Möglichkeit PV-Überschüsse zu nutzen liegt in der thermischen Versorgung des Gebäudes. Dies ist beispielsweise mit der Verknüpfung einer Wärmepumpe (WP) und einem Pufferspeicher möglich.

In Abbildung 2.7 ist die Funktionsweise einer Wärmepumpe dargestellt. In Schritt 1 wird aus der Quelle Wärmeenergie entzogen. Diese wird dazu genutzt ein Kältemittel zu verdampfen. Im darauf folgenden Schritt verdichtet eine elektrische Pumpe das gasförmige Kältemittel, wodurch es sich zusätzlich erhitzt. Im dritten Schritt wird über einen Wärmeüberträger Wasser mithilfe des Kältemittels erhitzt, wodurch das Kältemittel kondensiert. Das heiße Wasser kann dann im Haushalt genutzt werden, wohingegen das Kältemittel im letzten Schritt über ein Expansionsventil wieder dem Kreislauf zugeführt wird.

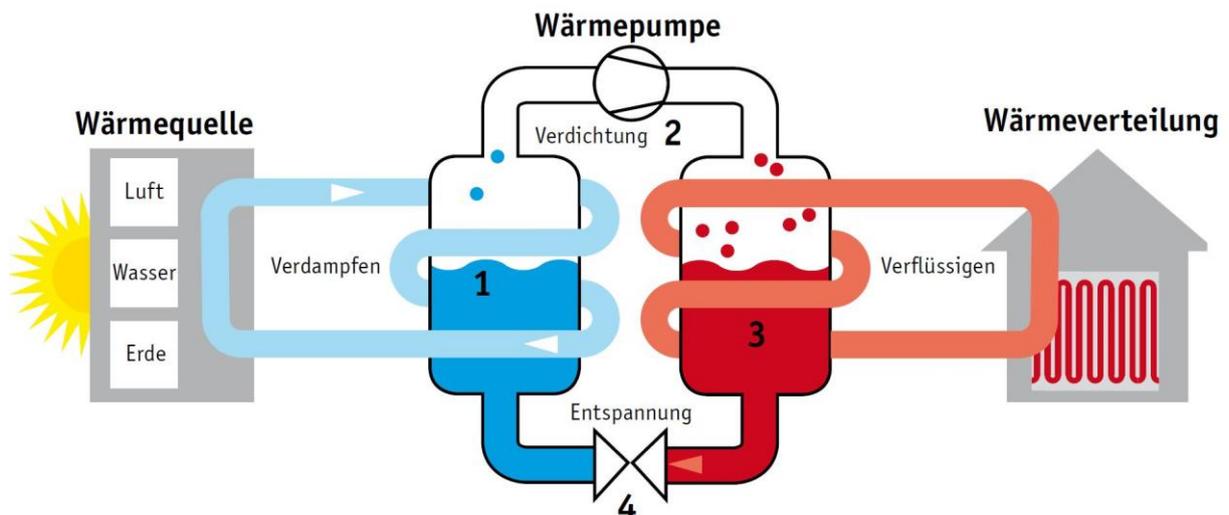


Abbildung 2.7: Funktionsprinzip einer Wärmepumpe [23]

Wie gut das Zusammenspiel von PV-Anlage und Wärmepumpe ist, wird von vielen Faktoren beeinflusst:

- PV-Anlagengröße
- Ausrichtung und Neigung der PV-Anlage
- Tag- oder nachtaktiver Haushalt (Nutzerverhalten)
- Geräteausstattung des Haushalts
- Standort
- Betriebsrahmenbedingungen der Wärmepumpe
 - Stillstandszeiten
 - Modulierbarkeit der Leistung
 - Dimensionierung der Wärmepumpe (Leistung der WP an sich und im Verhältnis zur PV-Anlage)
 - Versorgung mit Trinkwarmwasser oder auch des Heizwärmebedarfs

Da insbesondere im Winter ein großer Wärmebedarf besteht, ist es wünschenswert dort viel PV-Überschuss nutzen zu können. Im Winter ist jedoch die Quelltemperatur der Wärmepumpe am niedrigsten, wodurch die Wärmepumpe eine höhere Temperaturdifferenz überbrücken muss. Dies äußert sich in einer erhöhten Leistungsaufnahme. Daraus resultiert eine ungünstige Leistungszahl (s. Formel 3). Gleichzeitig ist im Winter die Solarstrahlung am geringsten, weshalb es im Winter am unwahrscheinlichsten ist, dass die Wärmepumpe PV-Überschüsse nutzen kann.

Je nachdem, welche Quelle von der Wärmepumpe⁶ genutzt wird, werden Wärmepumpen nicht als alleinige Wärmeerzeuger eingesetzt. Eine Zusatzheizung in Form eines Brennwertkessels wird

⁶ Mögliche Wärmequellen sind Luft, Grundwasser und Erdwärme [51]

beispielsweise bei Luft/Luft-Wärmepumpen für die besonders kalten Monate gebraucht, da dort die Leistungszahl der Wärmepumpe am niedrigsten ist, während der Heizbedarf am größten ist. Es wird zwischen Luft/Luft, Luft/Wasser, Wasser/Luft, Sole/Luft, Sole/Wasser und Wasser/Wasser Wärmepumpen unterschieden [24]. Der erste Begriff steht dabei immer für das Medium auf der Primärseite, welches die Wärme aus der Umgebung aufnimmt. Der zweite Begriff steht für das Medium, welches im Sekundärkreislauf vorhanden ist und somit die Wärme abgibt. Die sogenannte Leistungszahl (Coefficient Of Performance, COP) gibt an, wie groß das Verhältnis zwischen elektrischer Leistung und abgegebener Wärmeleistung ist.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ab}}{P_{el}} \quad (3)$$

\dot{Q}_{ab} = abgegebene thermische Leistung in kW

P_{el} = elektrische Leistungsaufnahme in kW

Dies ist jedoch nur ein Momentanwert. Entscheidender für die Charakterisierung einer Wärmepumpe ist die Jahresarbeitszahl (JAZ), welche die elektrische Energie zum Betrieb ins Verhältnis zur abgegebenen Wärmeenergie innerhalb eines Jahres setzt.

$$JAZ = \frac{Q_{ab}}{E_{el}} \quad (4)$$

Q_{ab} = abgegebene thermische Energie in kWh

E_{el} = aufgenommene elektrische Energie in kWh

Wichtig in Bezug auf den PV-Eigenverbrauch und den Autarkiegrad sind SG-Ready Schnittstelle⁷ sowie eine Nachtabsenkung der Raumtemperatur. So lassen sich bei einem energieeffizienten Neubau Autarkiegrade von knapp 60 % erreichen [25].

2.5 Photovoltaik und Heizstab

Ein Heizstab ist im Grunde nichts anderes als ein elektrischer Widerstand. Fließt durch den Heizstab ein elektrischer Strom, erwärmt er sich und gibt diese Wärme an die Umgebung oder das umgebende Fluid ab. Grundlage für die Berechnung der umgesetzten Leistung in einem Heizstab bildet das Ohm'sche Gesetz:

$$U = R * I \quad (5)$$

U = Spannung in V

⁷ Eine SG-Ready Schnittstelle ermöglicht es einer Wärmepumpe mithilfe eines Reglers sich in intelligente Netze (Smart Grids) einzubinden [50]

Stand der Technik und Rahmenbedingungen

R = elektrischer Widerstand in Ω

I = Stromstärke in A

Mithilfe dieses Gesetzes berechnet sich die Wärmeleistung eines Heizstabs wie folgt⁸:

$$P = U * I = \frac{U^2}{R} \quad (6)$$

P = elektrische Leistung in W

Wichtig bei einem gemeinsamen Betrieb von PV-Anlage und Heizstab ist, dass beide Komponenten aufeinander abgestimmt sind. So ist es kontraproduktiv, eine sehr kleine PV-Anlage mit einem leistungsintensiven Heizstab zu verbinden. Dieser würde dann entweder kaum betrieben werden können oder müsste zusätzlich mit Strom aus dem Netz betrieben werden. Momentan wird der Netzstrom in Deutschland zu einem großen Teil aus fossilen Kraftwerken erzeugt, welche Wirkungsgrade unter 50 % aufweisen. Bei dieser Art der Stromerzeugung ist demnach weniger als die Hälfte der eingesetzten Primärenergie als nutzbare Energie verfügbar (Exergie). Der größere Teil der eingesetzten Primärenergie ist nicht nutzbarer Energieverlust (Anergie). Aufgrund der höheren Wertigkeit von elektrischer Energie im Vergleich zu thermischer Energie ist ein Betrieb des Heizstabs mit Netzstrom bedenklich.

Nicht unerheblich ist die Position des Heizstabs im Pufferspeicher. Für die Sicherstellung der Trinkwarmwasserversorgung sollte der Heizstab im oberen Fünftel des Pufferspeichers positioniert werden. Um den Heizstab für die Raumheizung zu verwenden, sollte er sich eher im oberen Drittel befinden. Dies hängt mit der Wärmeschichtung in einem Speicher zusammen. Die wärmste Wasserschicht befindet sich oben. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Temperatur im Speicher. Andernfalls würde es aufgrund von Dichteunterschieden bedingt durch die Ausdehnung bei höheren Temperaturen zu unerwünschten Konvektionen und somit zu Verlusten kommen [26]. Im Optimalfall wird ein Heizstab gewählt, der stufenlos regelbar ist. So kann jede beliebige Menge an PV-Überschuss von dem Heizstab genutzt werden. Interessant ist auch, dass so die neue Abregelung bei 70 % für PV-Anlagen noch sinnvoll genutzt werden kann. Um einen Heizstab stufenlos zu regeln gibt es zwei Methoden: Zum einen die Pulsweitenmodulation und zum anderen die Phasenanschnittsteuerung. Laut den Technischen Anschlussbedingungen (TAB) dürfen Phasenanschnittsteuerungen nur bei thermischen Geräten bis 200 W angewendet werden, sodass es zu Problemen mit dem Netzbetreiber kommen kann [27]. Anders sieht es bei der Pulsweitenmodulation aus. Da diese nahezu keine störenden Netzrückwirkungen verursacht, sind damit ausgestattete Heizstäbe erlaubt. Eine andere Möglichkeit besteht darin den Heizstab in Stufen zu regeln. Das Unternehmen Solare Datensysteme

⁸ Sofern von einem Wirkungsgrad des Heizstabs von 1 ausgegangen wird

Stand der Technik und Rahmenbedingungen

sieht darin sogar Vorteile gegenüber der stufenlosen Regelung, da dabei die Verluste geringer seien [28].

Die Kombination PV + Heizstab wird bereits von einigen Herstellern beworben. Rennergy Systems AG bietet beispielsweise einen 6-stufig schaltbaren Heizstab von 1 kW bis 6 kW zum Nachrüsten für eine PV-Anlage an [29]. SolarInvert GmbH bietet dagegen einen stufenlos regelbaren Heizstab bis 6 kW mit Pulsweitenmodulation an [30]. Es gibt sogar Systeme, die ohne einen Wechselrichter direkt den Gleichstrom der PV-Anlage nutzen. Advanced Energy Industries bietet 6-12 PV-Module in Verbindung mit einem 1,5 kW Heizstab an [31]. Diese Variante ist am unflexibelsten, da die Leistung der PV-Anlage nur für Gleichstromverbraucher genutzt werden kann und somit auch nicht in das öffentliche Netz eingespeist werden kann.

3. Aufbau der Experimentalanlage

In diesem Abschnitt wird auf die Experimentalanlage und ihre Komponenten eingegangen. Zunächst wird das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten der Experimentalanlage erläutert. Im Anschluss erfolgt eine ausführlichere Beschreibung der für die durchgeführten Versuche genutzten Komponenten der Experimentalanlage.

Die Komponenten der Experimentalanlage werden über ein LabVIEW Programm geregelt. Das LabVIEW Regelprogramm wird mit Last- und Erzeugungsprofilen für PV, Trinkwasser, Heizlast sowie Umgebungstemperaturen und Einstrahlungsdaten gespeist. Innerhalb dieser Parametervorgaben arbeiten dann die einzelnen Komponenten.

Abbildung 3.1 zeigt die Verknüpfungen der einzelnen Komponenten im Systemverbund. Die Komponenten können genutzt werden, um das elektrisch-thermische Verhalten eines Haushalts in der Experimentalanlage nachzubilden. Alle elektrischen Elemente der Anlage sind mit dem hausinternen Drehstromnetz verbunden (gelb gestrichelt). Davon ausgenommen sind PV-Emulator und Batteriespeicher, welche über Gleichspannungsanschlüsse mit dem Wechselrichter verbunden sind. Im unteren Teil der Abbildung ist das Hydrauliknetz der Experimentalanlage dargestellt, wobei die roten und blauen Verbindungen die Vor- und Rückläufe der Hydraulikkomponenten zeigen.

Abhängig von vorgegebener Solarstrahlung und Temperatur generiert der PV-Emulator eine Gleichspannung eines PV-Modulfeldes. Vom PV-Wechselrichter wird die Gleichspannung des PV-Modulfeldes in dreiphasigen Wechselstrom gewandelt und die PV-Leistung zunächst in das hausinterne Stromnetz eingespeist. Diese Leistung deckt den Bedarf der elektrischen Haushaltslast. Überschüssige PV-Leistung wird in den Batteriespeicher geladen. Ist dieser gefüllt, wird der weitere PV-Überschuss in das Netz des Netzbetreibers eingespeist. Das Batteriemodul wird überwiegend aus den PV-Überschüssen geladen. Ausgleichsladungen zur Erhöhung der Batterielebensdauer erfolgen auch, wenn das PV-Modulfeld keinen Überschuss erzeugt, sodass gegebenenfalls Netzstrom dafür benötigt wird. Eine Sole-/Wasser-Wärmepumpe ist der primäre Wärmeerzeuger des Systems und wird aus einem Erdsonden-Emulator als Quelle versorgt. Die Wärmepumpe speist ihre Energie je nach Bedarf sowohl in die Trinkwarmwasserzone als auch in die Raumheizzone des Pufferspeichers ein. In drei verschiedenen Höhen befinden sich zudem Heizstäbe im Pufferspeicher, welche große PV-Überschüsse direkt als Wärme einspeichern und so den PV-Eigenverbrauch erhöhen können. Die Frischwasserstation repräsentiert die Trinkwasseranschlüsse. Dort heizt Wasser aus der Trinkwarmwasserzone des Pufferspeichers kaltes Wasser aus dem Trinkwassernetz auf, bis die gewünschte Temperatur erreicht wird. Der Heizkreisemulator bildet den Raumheizungsbedarf nach. Er entnimmt über seinen Primärkreislauf warmes Wasser aus der Raumheizzone des Pufferspeichers und führt es über einen Wärmeüberträger nach der Wärmeabgabe wieder dem Pufferspeicher zu. Im

Aufbau der Experimentalanlage

Wärmeüberträger wird die Wärme auf den Sekundärkreislauf des Heizkreis-Emulators übertragen und abgeführt.

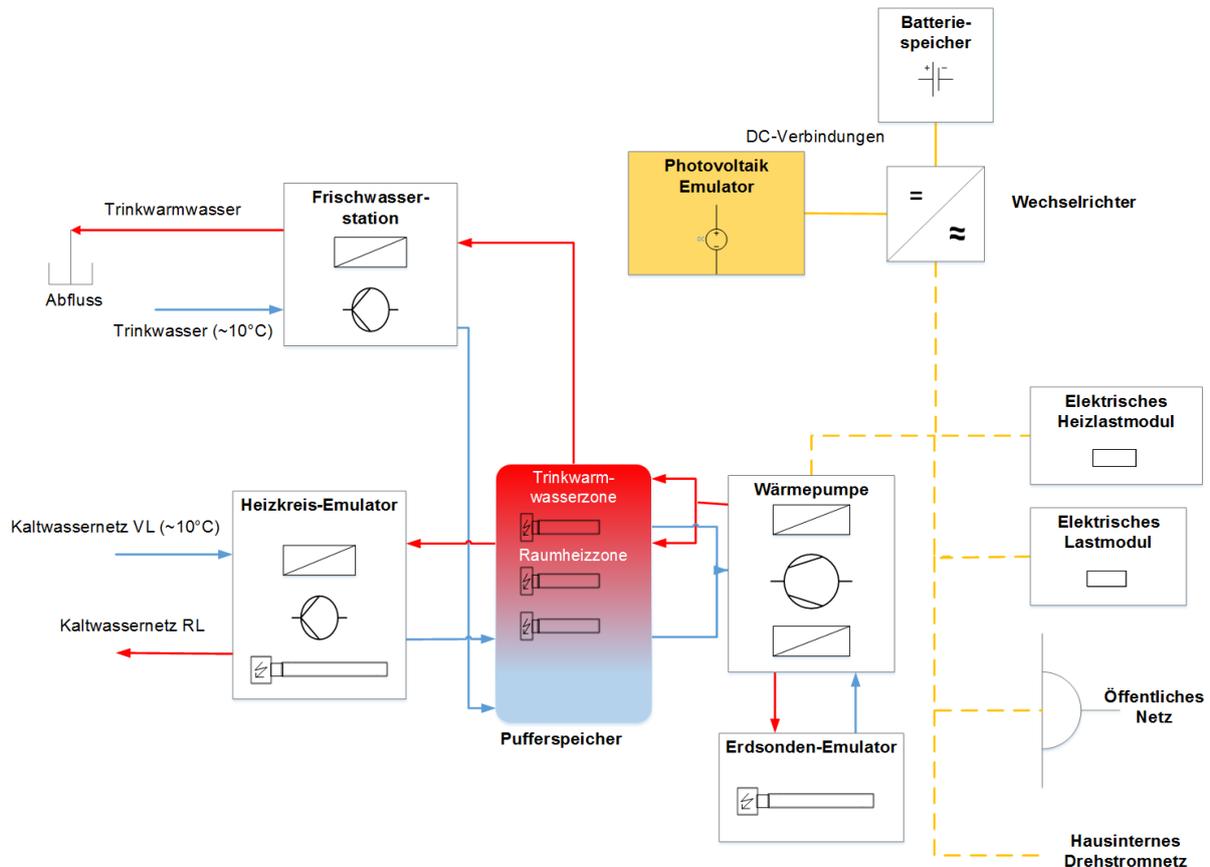


Abbildung 3.1: Aufbau der Experimentalanlage mit allen energetischen Komponenten

3.1 Photovoltaikemulator

Das PV-Modulfeld wird durch einen sogenannten PV-Emulator Typ TSD800-18 der Firma MagnaPower Electronics nachgebildet. Dabei handelt es sich um eine programmierbare DC-Stromquelle, welche mithilfe eines Gleichrichters dreiphasige Wechselspannung in eine Gleichspannung wandelt. Der PV-Emulator kann stufenlos Leistungen bis 15 kW bereitstellen [32].

Für die Versuche werden dem PV-Emulator Strom-Spannungs-Wertepaare des zu emulierenden PV-Modulfeldes übermittelt. Die Strom-Spannungs-Wertepaare errechnet das Steuerungs- und Regelungsprogramm aus den Modulkennwerten Nennspannung, Nennstrom, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Temperaturkoeffizienten (s. Tabelle A.1). Unter Berücksichtigung der jeweiligen Einstrahlung und Temperatur, welche dem PV-Emulator von dem LabVIEW-Regelprogramm übermittelt werden, errechnet der PV-Emulator daraus eine Strom-Spannungs-Kennlinie des PV-Modulfeldes durch Interpolation, wodurch der PV-Emulator alle Zustände bei wechselnden Einstrahlungsverhältnissen nachbilden kann.

3.2 Wechselrichter

Der Batteriespeicher wird in den Versuchen nicht genutzt. Daher wird auf eine genauere Darstellung zwischen dem Batteriespeicher und den anderen Komponenten wie dem Wechselrichter verzichtet.

Da eine PV-Anlage Gleichspannung erzeugt und sowohl das öffentliche Netz als auch die elektrischen Verbraucher im Haushalt mit Wechselspannung arbeiten, wird ein Wechselrichter für die Umwandlung von Gleich- in Wechselspannung benötigt.

Der Wechselrichter der Experimentalanlage ist von der Firma Kostal Solar Electric GmbH und ist für PV-Leistungen von bis zu 11 kW ausgelegt. Er besitzt zwei DC-Eingänge, welche mit 12 A und 950 V belastet werden können [33]. Der eingebaute Maximum Power Point Tracker (MPP Tracker) benötigt mindestens 180 V Spannung zum Betrieb. Er sorgt dafür, dass der PV-Anlage zu jeder Zeit die größtmögliche Leistung entnommen werden kann. Mit ändernder Solarstrahlung und Modultemperatur ändert sich auch die Strom- Spannungs-Kennlinie und somit der Punkt maximaler Leistung. Der Wechselrichter ist ein adaptiver Regler, der in Folge dieser Veränderungen den Punkt maximaler Leistung findet, indem er die Last an der PV-Anlage so einstellt, das das Produkt aus Strom und Spannung, also die Leistung, maximal wird.

3.3 Elektrische Lasten

Die elektrische Last des Haushalts wird mit drei schaltbaren Widerstandslasten der Firma STATRON Gerätetechnik vom Typ 3224.1 emuliert. Je ein Gerät wurde mit einer Phase verbunden, sodass jede Phase mit 2,2 kW belastet werden kann. Die Widerstandslasten können in 25 W Schritten geschaltet werden [34]. Die Regelung der elektrischen Lasten wurde in der Arbeit von S. Günther entwickelt [35]. Zu Beginn der Regelung wird die Leistungsvorgabe (Sollwert) aus dem Lastprofil aufgeschaltet. Daraufhin wird die Leistung der elektrischen Last mithilfe von Sensoren ermittelt. Wenn der Unterschied vom vorherigen zum aktuellen Messwert größer als 2 % ist, wird geregelt. Dazu wird die Differenz von Soll- und Istwert zu der aktuell geschalteten Leistung addiert. Treten Regeldifferenzen kleiner 25 W auf, werden diese nicht geregelt. Damit soll ein Schwingen um den Sollwert vermieden werden.

3.4 Wärmepumpe

Ein potentieller Wärmeerzeuger der Experimentalanlage ist eine Sole-Wasser Wärmepumpe der Firma Stiebel Eltron. Sie hat eine thermische Leistung von 7,8 kW bei gleichzeitiger elektrischer Aufnahme von 1,78 kW, wenn die Eintrittstemperatur der Sole (brine) bei 0°C liegt und die Austrittstemperatur des erhitzten Wassers bei 35°C liegt (B0/W35). Demzufolge liegt ihre Leistungszahl in diesem Zustand bei 4,4 [36].

Die Quelle der Wärmepumpe wird durch einen Erdsonden-Emulator nachgebildet. Er stellt die Quellentemperatur mittels eines elektrisch betriebenen Heizstabs auf konstant 3°C ein. Aus vorigen

Versuchen zur Konditionierung des Pufferspeichers mittels der Wärmepumpe wurde festgestellt, dass die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe mit Zunahme des Temperaturniveaus stetig steigt, was später in der "PV-Überschuss" Regelung berücksichtigt werden muss (s. Kapitel 5.2). In Abbildung 3.2 ist die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Temperatur dargestellt. Die rote Linie kennzeichnet die Austrittstemperatur am Rücklauf der Sekundärseite der Wärmepumpe. Die grüne Linie gibt die Leistungszahl wieder. Die thermische Leistungsabgabe am Kondensator $P_{\text{therm. Kondensator}}$ sinkt nur geringfügig bei der Konditionierung, während die thermische Leistungsaufnahme am Verdampfer $P_{\text{therm. Verdampfer}}$ sinkt stärker. Durch die zunehmende elektrische Leistungsaufnahme $P_{\text{el.}}$ sinkt nach Formel 3 die Leistungszahl.

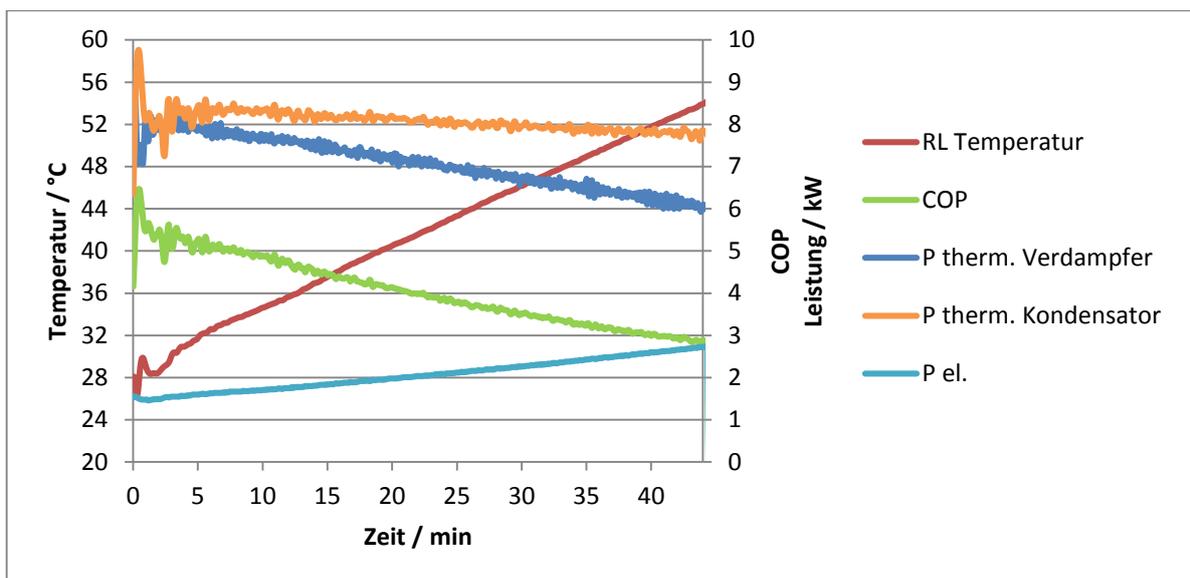


Abbildung 3.2: Abhängigkeit zwischen sekundärseitiger Rücklauf­temperatur, elektrischer Leistungsaufnahme, thermischer Leistung und COP beim Betrieb der Wärmepumpe

3.5 Pufferspeicher, Heizstäbe und Frischwasserstation

Der Pufferspeicher der Anlage umfasst 750 Liter. In den oberen 20 % befindet sich die Trinkwarmwasserzone, welche von der Frischwasserstation genutzt wird. Darunter liegt eine Trennschicht, welche die Trinkwarmwasserzone von der Raumheizzone absondert. In dieser Trennschicht bei 77,5 % relativer Höhe des Pufferspeichers befindet sich ein 2 kW Heizstab. Die Raumheizzone liegt zwischen 40 % und 77 %. Darin befinden sich ein 4,5 kW Heizstab in Höhe von 65 % und ein 6 kW Heizstab in Höhe von 45 %. Das tiefer liegende Volumen des Pufferspeichers ist ungenutzt. Alle Heizstäbe können nicht in ihrer Leistung moduliert werden, demzufolge ist nur ein an/aus Betrieb möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde am ISFH eine Anschlussbox entworfen, welche eine phasenselektive Ansteuerung der Heizstäbe ermöglicht. Dadurch können, weil das Stromsystem 3-phasig ist, drei Stufen eingestellt werden. In den Versuchen dieser Arbeit wird nur der 2 kW Heizstab genutzt, daher kann der Heizstab in 0,67 kW Schritten betrieben werden. Die

Aufbau der Experimentalanlage

nächsthöhere Option wäre der 4,5 kW Heizstab, welcher in 1,5 kW Schritten betrieben werden könnte. Da mit dem ausgewählten PV-Modulfeld (s. Kapitel 4.5) viel öfter und länger der 2 kW Heizstab genutzt werden kann, wurde nur auf diesen zurückgegriffen.

Die Frischwasserstation zur Trinkwarmwasserversorgung bezieht auf ihrer Primärseite im Vorlauf die Wärme aus der obersten Schicht des Pufferspeichers. Der Rücklauf der Primärseite speist ganz unten wieder in den Speicher ein.

Die Wärmepumpe wird in den Versuchen lediglich zur Trinkwarmwasserversorgung betrieben. Sie speist die Trinkwarmwasserzone in Höhe von 92,5 %. Der Vorlauf der Sekundärseite der Wärmepumpe bezieht sein Wasser aus einer Höhe von 80 %. In Abbildung 3.3 ist eine detaillierte Grafik des Pufferspeichers zu sehen. Dort sind alle Verbindungen eingezeichnet. Nicht genutzte Anschlüsse sind mit einem x gekennzeichnet. Der Heizkreis-Emulator wird in den Versuchen nicht genutzt, könnte jedoch für zukünftige Betrachtungen unter Einbeziehung der Raumheizzone interessant sein (s. Kapitel 7). Dementsprechend werden in den Versuchen von der Wärmepumpe nur die oberen Anschlüsse des Vor- und Rücklaufs genutzt.

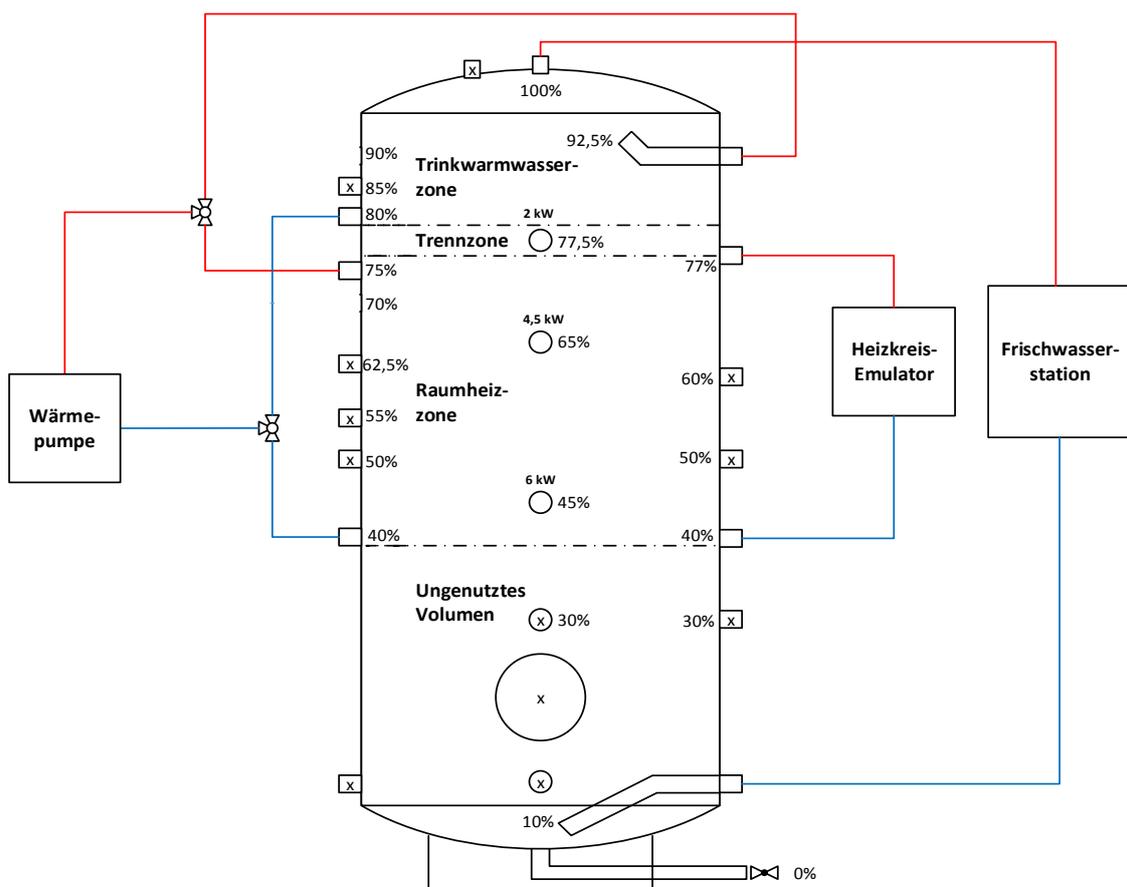


Abbildung 3.3: Pufferspeicher der Experimentalanlage mit allen Anschlüssen

Aufbau der Experimentalanlage

Um die nutzbare Speicherkapazität des Pufferspeichers bestimmen zu können, wird auf folgende Formel zurückgegriffen:

$$E = V * \rho_W * cp_W * \Delta\bar{T} \quad (7)$$

E = nutzbare Speicherkapazität in kJ

V = Volumen des betrachteten Pufferspeicherabschnitts in l

ρ_W = Dichte von Wasser in kg/l

cp_W = spezifische Wärmekapazität von Wasser in kJ/(kg*1)

$\Delta\bar{T}$ = mittlere überbrückbare Temperaturdifferenz des betrachteten Pufferspeicherabschnitts in K

Da in den Untersuchungen dieser Arbeit nur die Trinkwarmwasserzone genutzt wird, beträgt das Volumen V 20 % des Gesamtvolumens des Pufferspeichers. Wird von einer spezifischen Wärmekapazität cp_W von Wasser von 4,182 kJ/(kg*K), einer Temperaturdifferenz $\Delta\bar{T}$ von 15 K und einer Dichte ρ_W von Wasser von 1000 kg/m³ ausgegangen, errechnet sich die nutzbare Speicherkapazität im Pufferspeicher wie folgt:

$$E = 0,2 * 750 \text{ l} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 15 \text{ K} = 9409,5 \text{ kJ} = 2,61 \text{ kWh}$$

4. Festlegen der Testbedingungen

Im Folgenden wird auf die Profildaten eingegangen, mit denen die Experimentalanlage betrieben wurde. Alle Daten sollten von einem Einfamilienhaushalt mit vier Personen ausgehen. Die elektrischen Lastdaten werden aus der VDI 4655 "Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen" entnommen [37]. Des Weiteren werden die solaren Strahlungsdaten aus der Arbeit von F. Lammers genutzt, welche einen Vorschlag zur Erweiterung der VDI 4655 darstellt [38]. Das Zapfprofil für das Trinkwarmwasser wird mithilfe des Tools DHW Calc der Universität Kassel erstellt [39]. Alle Daten liegen in einer Auflösung von einer Minute vor oder werden dahingehend interpoliert.

4.1 Elektrische Last

Die VDI 4655 wurde ursprünglich für die Einschätzung von Normnutzungsgraden von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen erstellt. Dazu wurden Referenzlastprofile mithilfe von Messdaten aus Wohngebäuden erarbeitet. Für die Daten von Einfamilienhäusern wurden die Daten von 5 Referenzgebäuden ausgewertet, welche sich an 3 Standorten befinden. Die Werte der VDI 4655 liegen als gewichtete Mittelwerte vor. Es werden Energieverbrauchswerte zu elektrische Energie, Heizwärme und Warmwasser angegeben, welche von Typtag zu Typtag unterschiedlich sind. Die Unterscheidung der Typtage nach der VDI 4655 wird nun beschrieben.

Es findet eine Unterscheidung in Jahreszeit (Winter W, Übergang Ü, Sommer S), Sonn- und Werktag (S und W) und der Bewölkung (Bedeckungsgrad $< 5/8 \rightarrow$ heiter H, Bedeckungsgrad $> 5/8 \rightarrow$ bewölkt B) statt. Für die Sommerzeit wurde keine Unterscheidung nach dem Bedeckungsgrad vorgenommen, da diese Unterscheidung für die Norm irrelevant war. Es gibt also insgesamt 10 verschiedene Typtage, welche im folgenden aufgeführt sind:

ÜWH, ÜWB, ÜSH, ÜSB (bspw. Übergangszeit, Werktag, Heiter)

SWX, SSX

WWH, WWB, WSH, WSB

Die Daten für jeden Typtag liegen minütlich als relative Werte normiert vor. Nun kann ausgewählt werden, ob von einem niedrigen, mittleren oder hohen Bedarf an Energie ausgegangen wird, sodass jeder Typtag bestimmte Energieverbräuche aufweist. In Tabelle 4.1 sind die Energieverbräuche für jeden Typtag dargestellt.

Tabelle 4.1: Energieverbräuche nach Typtagen der VDI 4655

		Ü-W-H	Ü-W-B	Ü-S-H	Ü-S-B	S-W-X	S-S-X	W-W-H	W-W-B	W-S-H	W-S-B
Minimalwerte [kWh]	Strombedarf	11,57	12,23	9,13	13,29	10,21	10,84	12,48	13,05	12,83	14,27
	Heizwärmebedarf	25,93	19,25	26,55	15,80	0	0	73,01	72,79	86,87	58,03
	Warmwasserbedarf	2,45	2,63	0,30	3,48	2,00	3,87	3,34	3,49	5,10	3,66
Mittelwerte [kWh]	Strombedarf	14,79	15,79	16,68	17,73	12,54	13,19	15,62	17,03	17,35	19,96
	Heizwärmebedarf	55,68	55,97	48,74	56,71	0	0	104,18	93,99	108,74	91,87
	Warmwasserbedarf	3,94	3,96	6,35	5,40	3,46	5,34	5,12	4,76	10,26	6,65
Maximalwerte [kWh]	Strombedarf	18,95	20,01	20,99	23,56	16,93	18,30	20,55	24,83	30,77	26,13
	Heizwärmebedarf	80,88	73,69	89,57	75,09	0	0	125,24	114,19	147,97	116,31
	Warmwasserbedarf	6,51	6,35	10,20	13,95	6,73	10,28	6,94	6,56	12,90	11,53

Durch Multiplikation der Werte aus Tabelle 4.1 mit den relativen Werten ergibt sich ein minutliches Profil. In dieser Arbeit wird von einem Jahresstromverbrauch E_{el} von gut 4200 kWh ausgegangen, was laut VDI 4655 einen niedrigen Bedarf darstellt (Minimalwerte aus Tabelle 4.1). Der elektrische Lastgang an den ausgewählten Typtagen ist im Anhang abgebildet (s. Abbildungen A.1, A.2 und A.3).

Diese Profildaten sind mit einem gewissen Fehler behaftet bzw. nicht ohne Vorbehalte zu nutzen. Da die Daten nur aus Mittelwerten von 5 Referenzgebäuden gebildet wurden, ist eine statistische Unsicherheit vorhanden. Dennoch sollten die Daten ausreichend belastbar sein, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

In dieser Arbeit wird jede Anlagenkonfiguration (Heizstab, Wärmepumpe, Heizstab und Wärmepumpe) mit den Typtagen ÜWB, ÜWH und WWH untersucht. Da ausschließlich die Trinkwarmwasserzone des Pufferspeicher für die Wärmeerzeuger genutzt wird, steht nur ein begrenztes Volumen von 150 Liter zur thermischen Speicherung von PV-Strom zur Verfügung. Aus diesem Grund wird auf die Untersuchung von Sommertagen verzichtet, da im Sommer die intensivste und längste Solarstrahlung vorliegt, was in einem frühen Erreichen des Temperaturmaximums in der Trinkwarmwasserzone führen würde. Aus Zeitgründen wurde auf weitere Untersuchungen der anderen Typtage verzichtet.

4.2 Zapfprofil

Für die Erstellung eines Zapfprofils der Frischwasserstation wurde ein Tool der Universität Kassel genutzt. DHW Calc dient dazu, Warmwasserzapfprofile zu erstellen, wobei im Vorfeld Eingaben gemacht werden, um das Profil seiner Nutzung anzupassen. Die Berechnung greift auf Statistiken von Haushalten zurück. In Abbildung 4.1 ist das Hauptfenster zu sehen, welches sich beim Starten des Tools öffnet. Dort können beispielsweise die zeitliche Auflösung, der durchschnittliche Wasserverbrauch pro Tag und die Anzahl der Tage des Profils eingestellt werden. Bei Auswahl des Feldes "set probability distribution" öffnet sich ein weiteres Fenster, wo Einstellungen zu Ferien, saisonalen Unterschieden im Zapfprofil und zu Wochen- und Feiertagen vorgenommen werden können. Zuletzt werden im Feld "set flow rates" Vorgaben zur durchschnittlichen Dauer einer Zapfung, dem maximalen Durchfluss einer Zapfung, dem durchschnittlichen Volumenstrom einer

Festlegen der Testbedingungen

Zapfung und der Standardabweichung gewählt werden. Im Anhang befindet sich ein Abschnitt, in dem die für diese Arbeit genutzten Einstellungen dargelegt sind (s. Einstellungen des Zapfprofils mit DHW Calc).

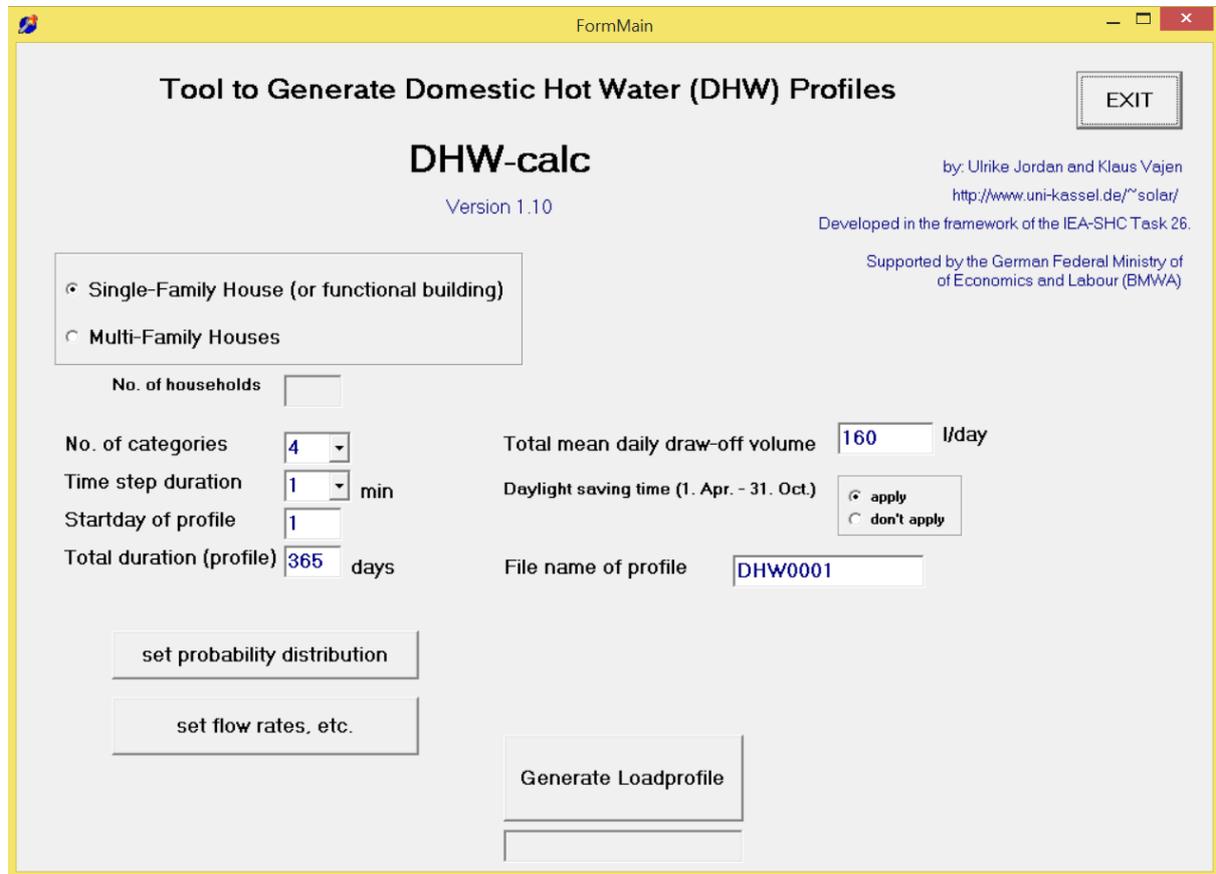


Abbildung 4.1: DHW Calc Hauptfenster

In den Einstellungen für die Erstellung des genutzten Zapfprofils wird ein durchschnittlicher Verbrauch von 160 l/d angenommen [40]. Nachdem ein Jahresprofil erstellt wird, wird für die Winterzeit und die Übergangszeit jeweils ein Tag ausgewählt, an dem die durchschnittliche Zapfmenge der durchschnittlichen Jahreszapfmenge entspricht.

Der Jahresenergieverbrauch für das Warmwasser berechnet sich wie folgt:

$$E_{WW} = 8760 \frac{h}{a} * \dot{m} * c_{pW} * (T_{in} - T_{out}) \quad (8)$$

E_{WW} = Jahresenergiebedarf für Trinkwarmwasser in kJ/a

\dot{m} = Massenstrom des Wassers in kg/h

c_{pW} = spezifische Wärmekapazität von Wasser in kJ/(kg*K)

T_{out} = primärseitige Austrittstemperatur der Frischwasserstation in °C

Festlegen der Testbedingungen

T_{in} = primärseitige Eintrittstemperatur der Frischwasserstation in °C

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die Eintrittstemperatur der Frischwasserstation 10°C und die Austrittstemperatur der Frischwasserstation 45°C beträgt. Außerdem wird von einer spezifischen Wärmekapazität von Wasser von 4,182 kJ/(kg*K) ausgegangen⁹. Die Dichte von Wasser wird auf 1000 kg/m³ für die Versuche angenommen. Die Formel für den Massenstrom lautet

$$\dot{m} = \dot{V} * \rho_W \quad (9)$$

\dot{V} = durchschnittlicher Volumenstrom in l/h

ρ_W = Dichte von Wasser in kg/l

Durch Einsetzen der entsprechenden Werte ergibt sich für den Massenstrom

$$\dot{m} = 160 \frac{l}{d} * \frac{1}{24} \frac{d}{h} * 1 \frac{kg}{l} = 6,67 \text{ kg/h}$$

Eingesetzt in Formel 8 ergibt sich der Jahresenergiebedarf für Trinkwarmwasser.

$$E_{WW} = 8760 \frac{h}{a} * 6,67 \frac{kg}{h} * 4,182 \frac{kJ}{kg * K} * (45^\circ C - 10^\circ C) = 8548008 \frac{kJ}{a} \approx 2375 \frac{kWh}{a}$$

4.3 Solare Strahlungsdaten

Für die solaren Strahlungsdaten wird auf die Ergebnisse der Arbeit von F. Lammers zurückgegriffen [38]. In der Arbeit wird die VDI 4655 um solare Strahlungsdaten erweitert. Grundlage dafür bildet eine PV-Anlage in Oldenburg, welche auf dem Dach des Next Energy EWE-Forschungszentrums steht. Sie besteht aus 8 Modulfeldern und 4 verschiedenen Modultypen. Die Dachneigung beträgt 7°. Die Daten seiner Arbeit stützen sich auf 3-jährige Messwerte. Die zeitliche Auflösung der Daten beträgt 1 Minute. Wie in Kapitel 4.1 werden nur die Daten der Typtage ÜWB, ÜWH und WWH in dieser Arbeit genutzt.

Aufgrund der Tatsache, dass unterschiedliche Modultypen als Grundlage dienen und die Module unterschiedliche Neigungen (Süd-West und Süd-Ost) aufweisen, gelten diese exemplarischen Einstrahlungsdaten auch nur für diese bestimmte Konfiguration. Dadurch entsteht ein Fehler, wenn diese Profile für abweichenden Konfigurationen verwendet werden. Weil die solare Strahlung von Jahr zu Jahr verschieden ist, ist dieser Fehler hinnehmbar.

Die genutzten Strahlungsprofile der Typtage ÜWB, ÜWH und WWH sind in den Abbildungen 4.2, 4.3 und 4.4 dargestellt.

⁹ Dieser Wert liegt bei einer Wassertemperatur von 20°C vor. Bei Änderungen der Temperatur im Bereich von 15-50°C sind die damit einhergehenden Veränderungen der spezifischen Wärmekapazität vernachlässigbar [52].

Festlegen der Testbedingungen

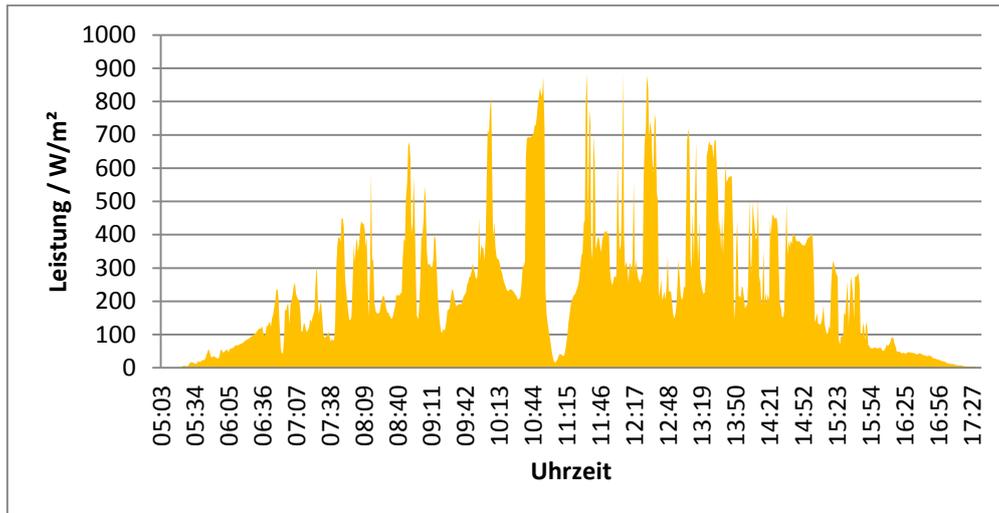


Abbildung 4.2: Solarstrahlungsprofil am Tytag ÜWB

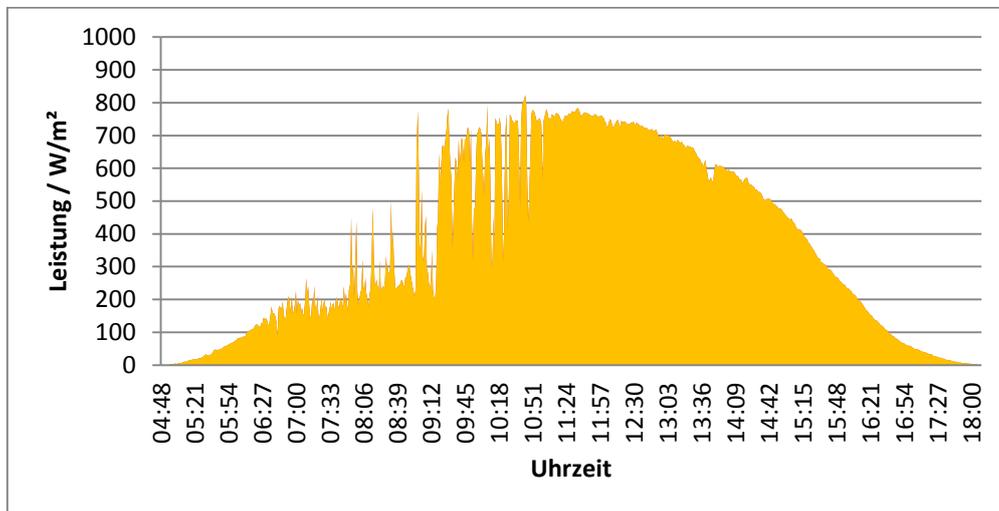


Abbildung 4.3: Solarstrahlungsprofil am Tytag ÜWH

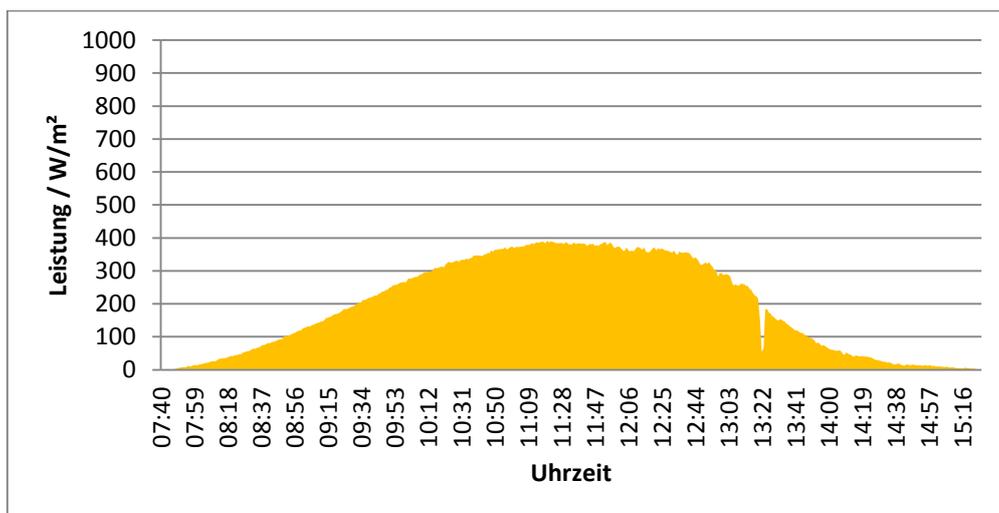


Abbildung 4.4: Solarstrahlungsprofil am Tytag WWH

4.4 Umgebungstemperatur und Modultemperatur

Damit der PV-Emulator das PV-Modulfeld realistisch nachbilden kann, werden die Umgebungstemperatur und sich daraus ergebend die Modultemperatur benötigt. Um die Modultemperatur zu bestimmen, wurde auf eine Formel, welche von der Arizona State University East entwickelt wurde, zurückgegriffen [41].

$$T_{module} = w1 * T_{ambient} + w2 * irradiance + w3 * WindSpd + const \quad (10)$$

T_{module} = Modultemperatur in °C

$T_{ambient}$ = Umgebungstemperatur in °C

$irradiance$ = Globalstrahlung in W/m²

$WindSpd$ = Windgeschwindigkeit in m/s

Die Koeffizienten $w1$, $w2$, $w3$ und $const$ sind spezifische Werte, die vom Modultyp abhängen, welcher in diesem Fall polykristallin ist (s. Kapitel 4.5). Diese Werte können einer Tabelle der Ausarbeitung der Arizona State University East entnommen werden [41].

Belastbare Temperatur- und Windgeschwindigkeitsdaten für die Berechnung der Modultemperatur wurden von der Wetterstation des ISFH aufgezeichnet. Es wurden außerdem solare Strahlungsdaten aufgezeichnet. Da alle Messwerte in 5 Minuten Schritten vorlagen, wurden jedoch nicht die von der Wetterstation aufgenommenen Strahlungswerte für die Untersuchungen dieser Arbeit verwendet. Die Strahlung kann sich durch Wolkenzug recht schnell stark verändern, was bei einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten schlecht nachgebildet werden kann. Die Temperaturen und Windgeschwindigkeiten wurden auf 1-minütige Daten linear interpoliert.

Für die Übergangszeit und die Winterzeit wurden die Daten der Temperaturen und Windgeschwindigkeiten eines Tages ausgewählt, an dem die mittlere solare Strahlung dieses Tages nahe dem Mittelwert der Solarstrahlung für die entsprechende Jahreszeit vorlag. Es wird angenommen, dass sich durch dieses Vorgehen kein großer Fehler ergeben wird, da sich Temperaturen in Deutschland recht träge ändern und die Windgeschwindigkeit mehr oder weniger zufällig ist. Bezüglich der Temperatur wurde dies überprüft, indem die Daten des ISFH mit den Daten der Universität Leipzig verglichen wurden und dort keine schnellen Temperaturänderungen festgestellt werden konnten [42]. Für die Berechnung der Modultemperatur wurde auf die solaren Strahlungsdaten aus der Arbeit von F. Lammers zurückgegriffen und in Formel 10 für $irradiance$ eingesetzt.

4.5 Photovoltaikanlage

Die emulierte PV-Anlage wird so dimensioniert, dass sie bilanziell den kompletten Strom- und Warmwasserbedarf decken könnte. Dabei wurde auf Globalstrahlungsdaten von Zürich von der

Festlegen der Testbedingungen

International Energy Agency zurückgegriffen. Dort wird eine mittlere Strahlungsenergie von 1087 kWh/(m²a) angegeben [43]. Demzufolge liegt der durchschnittliche Strahlungswert P_m bei 1087 kWh/(m²a) / 8760 h/a = 0,124 kW/m². Da sich die angegebene PV-Leistung auf die Standard Test Conditions (STC) bezieht, bei der eine Strahlung von $P_{STC} = 1$ kW/m² vorliegt, berechnet sich die PV-Anlagenleistung P_{PV} wie folgt:

$$P_{PV} = \frac{E_{el} + E_{WW}}{\frac{P_m}{P_{STC}} * 8760 \frac{h}{a}} \quad (11)$$

P_{PV} = PV-Leistung in kW

E_{el} = Jahresstrombedarf in kWh/a

E_{WW} = Jahreswarmwasserbedarf in kWh/a

P_m = mittlere solare Strahlung in kW/m²

P_{STC} = Strahlungsleistung unter STC in kW/m²

Aus den Energiebedarfen aus 4.1 und 4.2 folgt für die PV-Anlagengröße nach Formel 11:

$$P_{PV} = \frac{4200 \frac{kWh}{a} + 2375 \frac{kWh}{a}}{\frac{0,124 \frac{kW}{m^2}}{1 \frac{kW}{m^2}} * 8760 \frac{h}{a}} \approx 6 \text{ kW}$$

Als Grundlage für den PV-Emulator dienen Kenndaten der polykristallinen PV-Module Eco Line P60/240W, welche in Tabelle 4.2 aufgeführt sind.

Tabelle 4.2: Kenndaten des PV-Modulfeldes [44]

Elektrische Daten	LX-240P
Nennleistung P_{mpp} [Wp]	240
P_{mpp} -Bereich von	240
P_{mpp} -Bereich bis	246,49
Nennstrom I_{mpp} [A]	7,93
Nennspannung U_{mpp} [V]	30,3
Kurzschlussstrom I_{sc} [A]	8,47
Leerlaufspannung U_{oc} [V]	37,66
Wirkungsgrad bei STC	14,77%

25 Module ergäben genau 6 kW Leistung. Da der PV-Emulator nur einen DC-Ausgang hat und er somit nur einen oder mehrere identische parallel geschaltete Modulstränge emulieren kann, wird von

Festlegen der Testbedingungen

zwei parallelen Strängen mit jeweils 13 Modulen ausgegangen. Die Nennleistung liegt dann bei 6,24 kW.

Das nachgebildete PV-Modulfeld hat eine Neigung von 30° und ist nach Süden ausgerichtet, da so die größten Erträge für den nachzubildenden Standort Deutschland erreicht werden.

5. Steuer- und Regelprogramm

Das grundlegende Programm, welches für die Regelung der Anlage zuständig ist, wurde hauptsächlich in einer früheren Arbeit von C. Dick entwickelt [45]. Die Programmierung ist mit LabVIEW umgesetzt worden, was im Gegensatz zu den gängigen Programmiersprachen eine grafische Oberfläche hat und durchflussorientiert funktioniert.

In Abbildung 5.1 ist das Frontpanel des Hauptprogramms dargestellt, welches beim Öffnen des Programms erscheint. Ganz oben im Frontpanel ist das Feld "Bedienelemente" ausgewählt, in dem alle Einstellungen vor dem Start des Versuchs vorgenommen werden müssen. In der Registerkarte "Allgemein" werden Einstellungen bezüglich der Spalte der Außentemperatur in °C und dem Intervall der Profildaten in Minuten vorgenommen. Außerdem wird dort der Dateipfad für das genutzte Profil ausgewählt. Rechts daneben ist die Registerkarte "PV-Modul". Im Auswahlfeld "Verwenden" wird gewählt, ob der PV-Emulator für den Versuch benutzt werden soll. Falls ja, müssen Einstellungen für Nennspannung, Nennstrom, Leerlaufspannung, Kurzschlussstrom und Temperaturkoeffizienten vorgenommen werden. Zudem müssen die Spalten, in denen in der Profildatei die Modultemperatur in °C und die Totalstrahlung in W/m² angegeben sind, eingestellt werden. Darunter werden Einstellungen für die elektrische Last vorgenommen. Nur bei ausgewähltem "Verwenden" werden die elektrischen Lasten genutzt. Des Weiteren muss ausgewählt werden, ob das Lastprofil symmetrisch oder asymmetrisch nachgebildet werden soll und die entsprechenden Spalten für die Lastdaten in W in der Profildatei müssen angegeben werden. Unten rechts ist die Registerkarte "FriWa". Dort wird wiederum mit aktiviertem "Verwenden" eine Nutzung der Frischwasserstation initialisiert. Durch eintragen der Spalte, in der in der Profildatei der Volumenstrom in l/h steht, kann das Zapfprofil abgefahren werden. Auf die Registerkarten "Wärmepumpe" und "E-Heizer" wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen. Oben im Frontpanel können andere Felder wie beispielsweise "Übersicht/E-Last" ausgewählt werden. Diese sind jedoch nur relevant, während ein Versuch an der Experimentalanlage läuft. Es können zum Beispiel der Verlauf der elektrischen Last in einem Graphen dargestellt oder der aktuelle Wert des Solarstrahlungsprofil angezeigt werden. Im Feld "PV/WR/Batterie" wird die vom Regelprogramm errechnete Strom-Spannungs-Kennlinie und der Punkt auf der Kennlinie, an dem der Wechselrichter sich befindet, dargestellt.

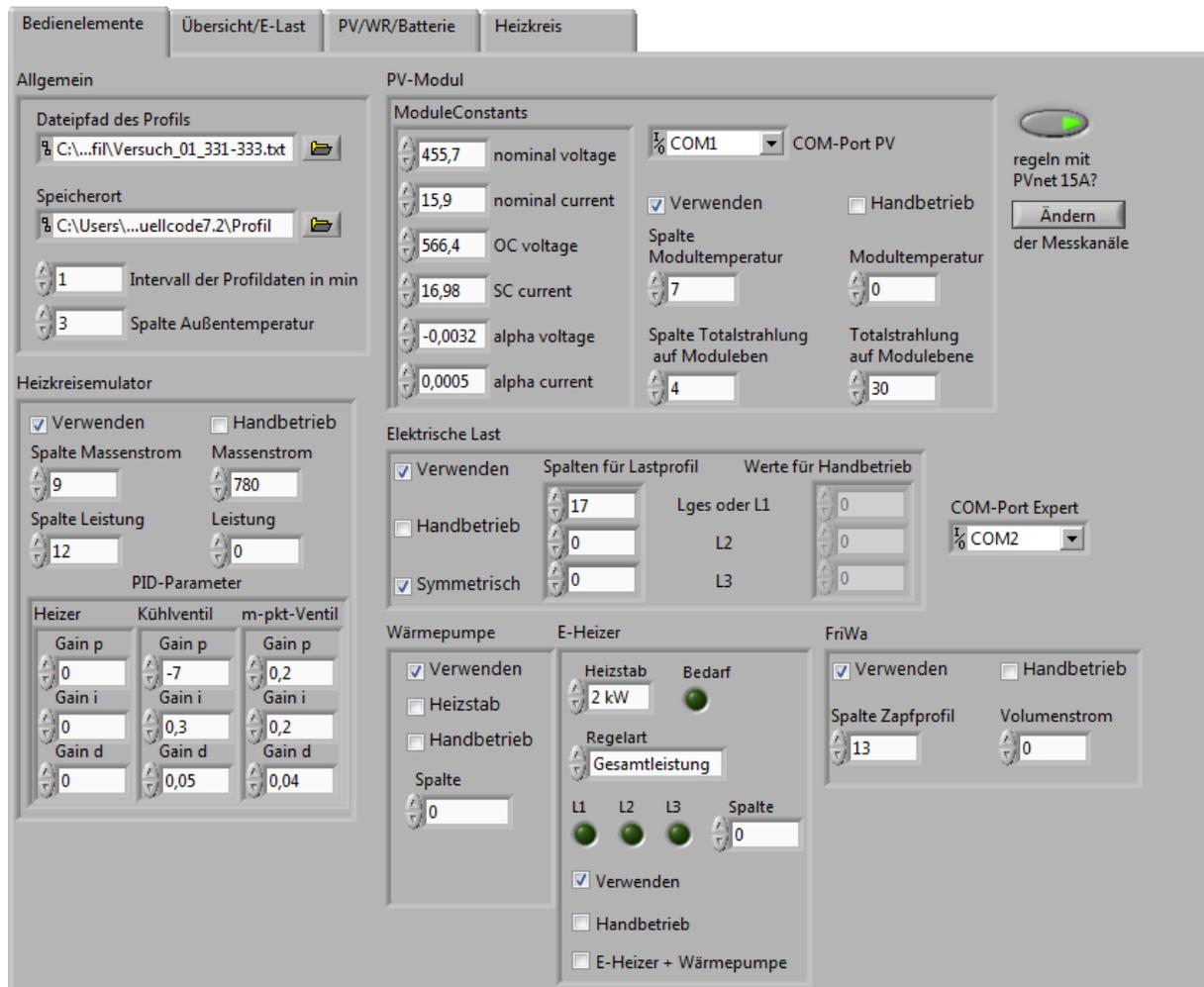


Abbildung 5.1: Frontpanel des Hauptprogramms

In dieser Arbeit wird das Programm um eine Regelung zur PV-Überschussnutzung mit Heizstäben und/oder Wärmepumpen erweitert, welche im Folgenden vorgestellt wird.

Für jede Anlagenkonfiguration gibt es zwei Betriebsmodi. Zum einen gibt es den Modus "Bedarf". Dieser wird ausgelöst, sobald die Temperatur bei 85 % Höhe des Pufferspeichers (T85%) 45°C unterschritten wird. Daraufhin wird der Wärmeerzeuger der jeweiligen Systemkonfiguration aktiviert und speist so lange Wärme in den Pufferspeicher ein, bis bei 78 % Höhe (T78%) 45°C erreicht wird.

Der andere Modus ist "PV-Überschuss". Dabei wird der Wärmeerzeuger aktiviert, sobald der Überschuss des PV-Modulfeldes ausreicht. Er wird deaktiviert, falls T85% 60°C überschreitet oder der PV-Überschuss nicht mehr ausreicht. In den nächsten Kapiteln wird auf diesen Modus noch genauer eingegangen.

T85% und T78% wurden als Eingangsparameter gewählt, weil dort Temperatursensoren im Pufferspeicher angebracht sind. Der Sensor in 78 % Höhe liegt direkt unterhalb der Trinkwarmwasserzone und kann daher gut genutzt werden um anzeigen zu lassen, wann die

Trinkwarmwasserzone konditioniert ist. Damit eine hohe Taktung des Wärmeerzeugers vermieden wird, dient T85% als Auslöser für den Modus "Bedarf".

5.1 Heizstab

In Abbildung 5.2 wird ein Ausschnitt der Registerkarte gezeigt, welches beim Starten des Regelprogramms aufgerufen wird. Dort können mithilfe von Bedienelementen die gewünschten Einstellungen für den Heizstab vorgenommen werden.



Abbildung 5.2: Einstellungsmöglichkeiten im LabVIEW Programm für den Heizstab

In dieser Arbeit wird ausschließlich der 2 kW Heizstab und falls der Heizstab alleiniger Wärmeerzeuger ist, die Regelart „Gesamtleistung“ verwendet. "Gesamtleistung" bedeutet, dass die aufaddierte Einspeiseleistung P_{Ein} der Phasen 1 bis 3 die Größe ist, welche im Modus "PV-Überschuss" entscheidend für die Aktivierung des Heizstabs ist. Die andere mögliche Regelart ist "Phasenleistung". Dabei wird im Modus "PV-Überschuss" auf jeder einzelnen Phase überprüft, ob dort die Einspeiseleistung ausreicht, um die jeweilige Phase zu aktivieren.

Bei ausgewähltem „Handbetrieb“ wird der Heizstab nicht über das Programm geregelt, sondern kann am Schaltschrank an- und ausgeschaltet werden. Das Auswahlfeld „Spalte“ dient dazu, nach abgeschlossenem Durchlauf des Profils den Pufferspeicher erneut zu konditionieren (s. Kapitel 6, Abbildung 6.2). Um den Heizstab über das LabVIEW Programm zu regeln, muss das Feld „Verwenden“ aktiviert sein.

Steuer- und Regelprogramm

In diesem und den nächsten beiden Unterkapiteln werden jeweils Flussdiagramme des Regelprogramms für den bzw. die Wärmeerzeuger aufgeführt. Die dafür benutzten Abkürzungen werden nun kurz erklärt:

HS	Heizstab
WP	Wärmepumpe
P_{Ein}	aufaddierte Einspeiseleistung der Phasen 1 bis 3
P_{Ein1,2,3}	Einspeiseleistungen der Phasen 1, 2 und 3
P_{HS}	elektrische Leistungsaufnahme des Heizstabs (2 kW)
P_{WP}	elektrische Leistungsaufnahme der Wärmepumpe (2,5 kW)

Der Ablauf des Regelprogramms für den Heizstab ist schematisch in Abbildung 5.3 dargestellt. In erster Linie wird der Heizstab zur Deckung des Trinkwarmwasserbedarfs betrieben. Fällt T85% unter 45°C wird der Heizstab so lange bei voller Leistung im Modus "Bedarf" betrieben, bis sich bei T78%¹⁰ eine Temperatur von 45°C einstellt. Damit soll sichergestellt werden, dass es keine Komforteinbußen gibt. Im Programm erfolgt die Abfrage, ob T85% unter 45°C liegt. Ist dies der Fall, werden alle Heizstapphasen aktiviert und die Variable "Bedarf" aktiviert. Durch die aktivierte Variable wird im Programm sichergestellt, dass wenn der Modus "Bedarf" aktiviert wird der Heizstab so lange betrieben wird, bis bei T78% 45°C erreicht werden. Wenn T78% bei mindestens 45°C liegt, kann kein "Bedarf" vorliegen. Die Variable "Bedarf" wird deaktiviert und in den Modus "PV-Überschuss" gegangen.

Außerhalb des Modus "Bedarf" werden eine oder mehrere Stufen des Heizstabs im Modus "PV-Überschuss" aktiviert, sobald die Einspeiseleistung P_{Ein} des Systems in Summe den Wert 2 kW / 3 = 0,67 kW überschreitet, um den PV-Eigenverbrauch zu erhöhen. Hat die Temperatur T85 % einen festgelegten Wert erreicht, wird der Heizstab ausgeschaltet, auch wenn ausreichend PV-Leistung vorhanden ist. Die Temperaturgrenze beträgt in den Versuchen 60°C. Dieses Limit wurde gewählt, da die Wärmepumpe sekundärseitig maximal 60°C im Rücklauf erzeugen kann und somit eine Vergleichbarkeit gegeben bleibt. Sollte die Einspeiseleistung in Summe 0 oder weniger betragen, werden so viele Phasen deaktiviert wie nötig sind, damit möglichst kein Strom mehr aus dem Netz bezogen wird. Das Regelprogramm setzt die Vorgaben so um, dass ein Wert "X" aus $P_{\text{Ein}} / (P_{\text{HS}}/3)$ errechnet wird. Ist X größer als 0, sollen "X" Phasen aktiviert werden, wobei "X" auch zwischen 0 und 1 liegen kann. In diesem Fall werden keine Änderungen der Heizstapphasen vorgenommen. Ist "X" hingegen kleiner als 0 ist die Einspeiseleistung 0 oder kleiner, weshalb mindestens eine Phase deaktiviert werden soll. Dies wurde durch den Ausdruck $|X| + 1$ realisiert. Ist "X" beispielsweise -1,2, so reicht es nicht aus eine Phase zu deaktivieren, um bilanziell Netzbezug zu verhindern, da eine

¹⁰ Also direkt unterhalb der Trinkwarmwasserzone

Phase mit 0,67 kW Leistung betrieben wird. Es müssen dementsprechend $\lfloor -1,2 \rfloor + 1$ Phasen deaktiviert werden.

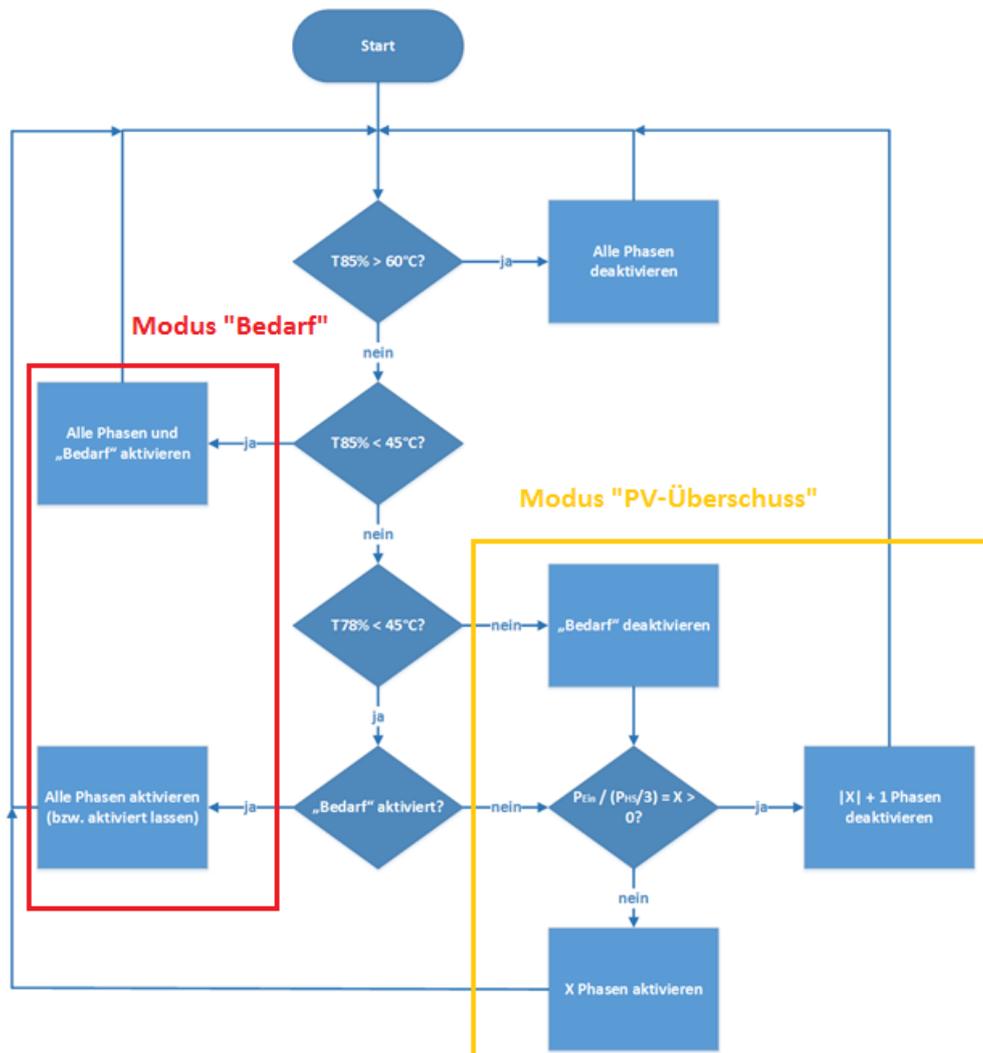


Abbildung 5.3: Regelprogramm des Heizstabs

5.2 Wärmepumpe

Auf der Registerkarte des LabVIEW-Programms für die Wärmepumpe sind teilweise die gleichen Auswahlfelder mit den gleichen Funktionen wie bei dem Heizstab in Abbildung 5.4 dargestellt. Lediglich das Feld „Heizstab“ hat momentan keine Funktion. Falls die Wärmepumpe einen integrierten Heizstab hätte, sollte dieser über diese Auswahl angesteuert werden können. Ist "Verwenden" ausgewählt, wird die Wärmepumpe über das Regelprogramm gesteuert. Bei aktiviertem "Handbetrieb" kann die Wärmepumpe über den Schaltschrank ein- und ausgeschaltet werden. Das Auswahlfeld "Spalte" dient wie bei dem Heizstab zur Nachkonditionierung des Pufferspeichers nach Ablauf des Strahlungsprofils.

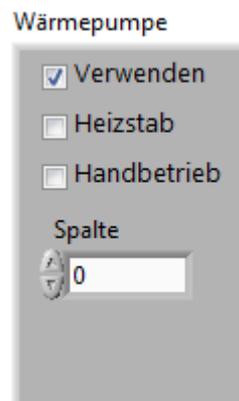


Abbildung 5.4: Einstellungsmöglichkeiten im LabVIEW Programm für die Wärmepumpe

In Abbildung 5.5 ist der Ablauf des Regelprogramms dargestellt. Im Betriebsmodus "Bedarf" soll die Wärmepumpe angeschaltet werden, sobald $T_{85\%} > 45^\circ\text{C}$ unterschreitet. Sie soll ebenfalls so lange betrieben werden, bis bei $T_{78\%} > 45^\circ\text{C}$ erreicht werden. Das Regelprogramm aktiviert die Wärmepumpe und die Variable "Bedarf", falls $T_{85\%} < 45^\circ\text{C}$ fällt. Die aktivierte Variable stellt sicher, dass wenn der Bedarf ausgelöst wird, die Wärmepumpe so lange betrieben wird, bis $T_{78\%} > 45^\circ\text{C}$ erreicht. Vom Hersteller wird geraten, dass nach dem Ausschalten der Wärmepumpe eine Stillstandszeit von 5 Minuten berücksichtigt wird, was in dem Regelprogramm umgesetzt wurde.

Des Weiteren wird außerhalb des Modus "Bedarf" der Modus "PV-Überschuss" für die Wärmepumpe genutzt. Als Einschaltwert in diesem Modus wurde eine Einspeiseleistung P_{Ein} von 2,5 kW angenommen, da dieser Wert aus vorigen Versuchen zur Konditionierung des Pufferspeichers in den benötigten Temperaturbereichen als Durchschnittswert der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe vorlag (s. Abbildung 3.2). Bei eingeschalteter Wärmepumpe muss $P_{\text{Ein}} \leq -0,5 \text{ kW}$ sein, damit die Wärmepumpe ausgeschaltet wird. Grund dafür ist, dass sich die Leistungsaufnahme der Wärmepumpe ab dem Startzeitpunkt aufgrund des mit der Zeit steigenden Temperaturniveaus stetig erhöht und so die Wahrscheinlichkeit für eine hohe Taktung verringert wurde (s. Abbildung 3.2).

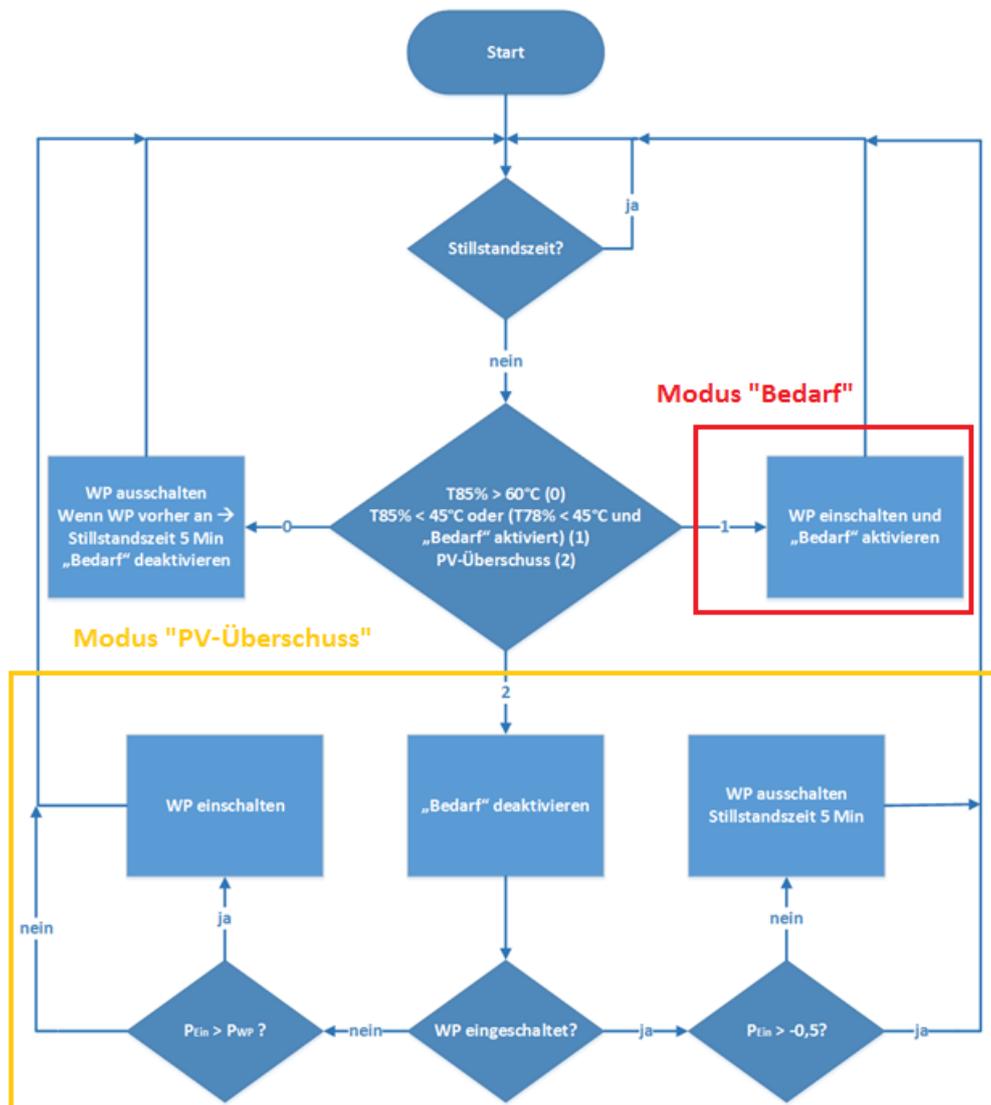


Abbildung 5.5: Regelprogramm der Wärmepumpe

5.3 Heizstab und Wärmepumpe

Für den gemeinsamen Betrieb erhält die Wärmepumpe Vorrang vor dem Heizstab, da diese den Strom wesentlich effektiver nutzen kann. Für den Modus "Bedarf" wird immer die Wärmepumpe verwendet, sollte keine Stillstandszeit vorliegen. Liegt hingegen ein "Bedarf" vor und die Wärmepumpe hat Stillstandszeit, so wird der Heizstab bei voller Leistung genutzt. Die Ein- und Ausschaltkriterien für diesen Modus sind identisch zu denen aus den vorigen Kapiteln (s. Kapitel 5.1 und 5.2).

Auch im Modus "PV-Überschuss" wird die Wärmepumpe bevorzugt genutzt. Bei $P_{\text{Ein}} < 2,5 \text{ kW}$ werden die Heizstabstufen genutzt. Falls $P_{\text{Ein}} + P_{\text{HS}}^{11}$ größer als 2,5 kW ist, wird die Wärmepumpe eingeschaltet. Sobald die Wärmepumpe eingeschaltet ist, werden die Heizstabphasen nicht mehr nach

¹¹ $P_{\text{HS}} = 0 \text{ kW}$ bei ausgeschaltetem HS; bei aktivierten Phasen beträgt P_{HS} entsprechend 0,67 kW, 1,34 kW oder 2,01 kW

der gesamten Einspeiseleistung eingeschaltet, sondern nach der Regelart "Phasenleistung" (s. Kapitel 5.1). Dadurch soll verhindert werden, dass die Heizstabphasen immer ein- und ausgeschaltet werden. Dieses unerwünschte Szenario soll an einem Beispiel erläutert werden.

Die Wärmepumpe ist eingeschaltet und auf jeder Phase liegt eine Einspeiseleistung von 0,3 kW vor. Bei der Regelart „Gesamtleistung“ würde daraufhin die erste Phase vom Heizstab eingeschaltet werden, weil insgesamt 0,9 kW Überschuss vorliegt. Im folgenden Regeldurchgang liegt dann eine Einspeiseleistung auf Phase 1 von -0,37 kW vor. Da die Wärmepumpe Vorrang vor dem Heizstab hat und im gemeinsamen Betrieb von Heizstab und Wärmepumpe zu möglichst keinem Zeitpunkt im "PV-Überschuss" Modus auf keiner Phase Strom aus dem Netz bezogen werden soll, wird somit die Heizstabphase deaktiviert und im nächsten Durchgang würde es wieder von vorne beginnen.

Bei negativen Einspeiseleistungen wird die Wärmepumpe ausgeschaltet und falls der Überschuss danach noch ausreicht, die Heizstabphasen weiter mit der Regelart "Gesamtleistung" genutzt (s. Kapitel 5.1). In Abbildung 5.6 ist der Ablauf des Regelprogramms zu sehen.

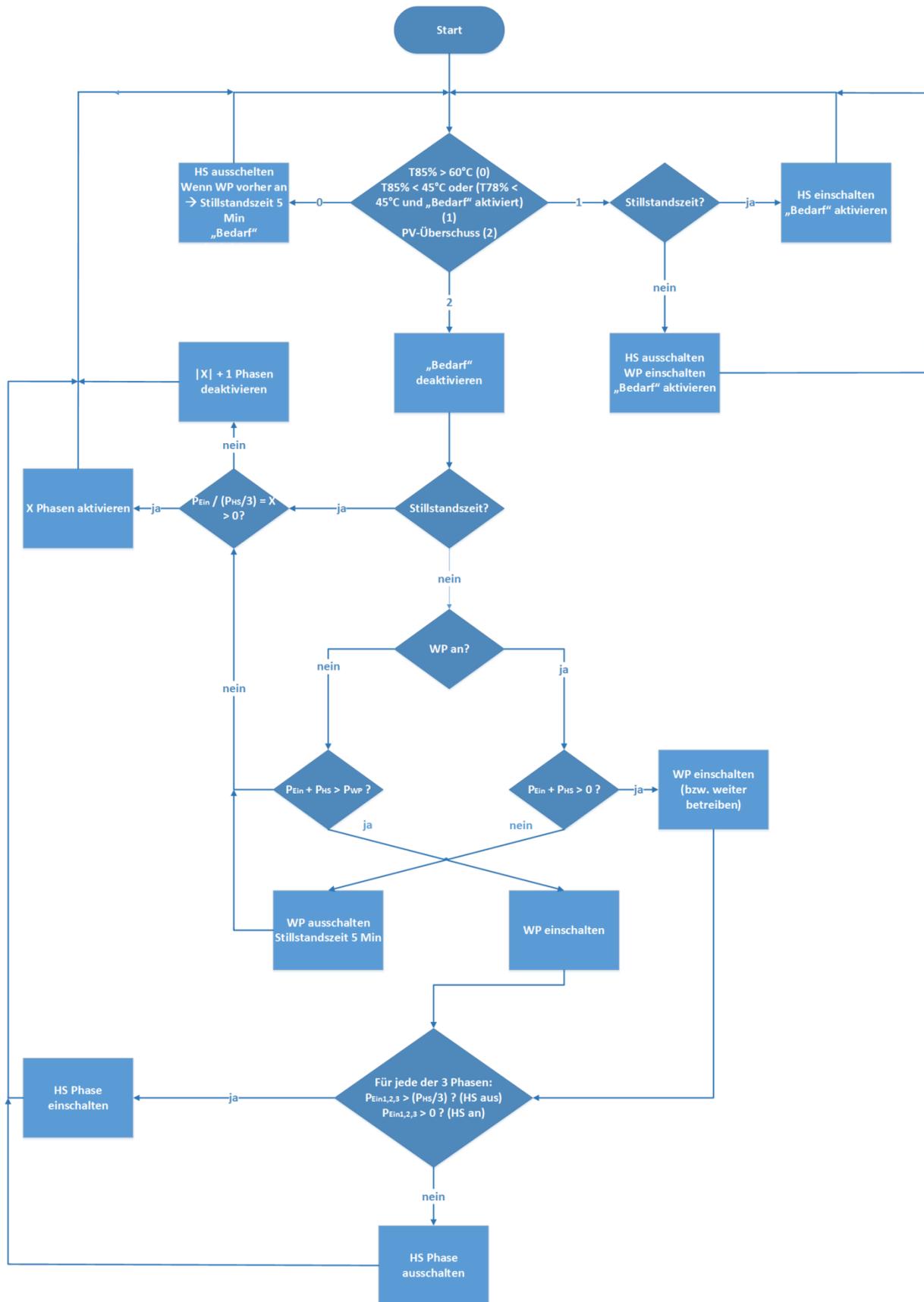


Abbildung 5.6: Regelprogramm für den gemeinsamen Betrieb von Heizstab und Wärmepumpe

6. Testablauf und Testergebnisse

Ein durchgeführter Test läuft immer nach dem gleichen Schema ab. Zunächst wird die Trinkwarmwasserzone des Pufferspeichers konditioniert. Dazu wird der für den Versuch genutzte Wärmeerzeuger betrieben, bis T78% bei 45°C liegt. Die darunter liegenden Temperaturen werden nicht berücksichtigt¹². Anschließend wird der Versuch mit den erstellten Profildaten durchgeführt. Zu Beginn werden alle Zapfungen ab 0:00 Uhr des Tages ohne die dazwischen liegenden Zeiten abgefahren. Sobald im Profil Solarstrahlung vorliegt, wird das Profil so lange in Echtzeit¹³ betrieben, bis keine Solarstrahlung mehr für diesen Tag vorhanden ist. Danach werden wiederum die Zapfungen bis 23:59 Uhr vorgenommen, ohne die Zeiten zwischen den Zapfungen zu simulieren. Sollte nach Abschluss des Profils T78% unter 45°C liegen, so wird der Pufferspeicher danach wieder konditioniert, damit bei allen Versuchen die gleichen Start- und Endbedingungen vorliegen. Dieser Ablauf ist zusammenfassend in Abbildung 6.1 dargestellt.

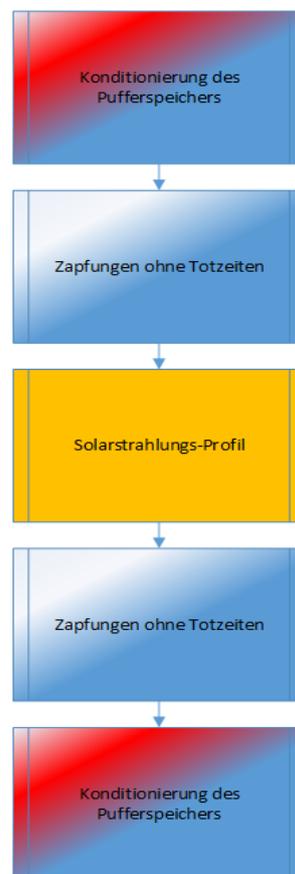


Abbildung 6.1: Testablauf

¹² Die Temperaturen in den darunter liegenden Schichten unterschieden sich um durchschnittlich 3°C vom ersten Versuch bis zum letzten Versuch. Der dadurch entstandene Fehler wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt

¹³ Mit Echtzeit ist in diesem Fall gemeint, dass das Profil ohne Unterbrechung in realer Zeit simuliert wurde

Insgesamt wurden neun Versuche durchgeführt. Jede Systemkonfiguration wurde mit den Typtagen ÜWH, ÜWB und WWH getestet, wie in Tabelle 6.1 zu sehen ist.

Tabelle 6.1: Untersuchte Typtage mit ihren Konfigurationen

Heizstab	Wärmepumpe	Heizstab und Wärmepumpe
ÜWB	ÜWB	ÜWB
ÜWH	ÜWH	ÜWH
WWH	WWH	WWH

6.1 Heizstab

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der drei Tests mit dem Heizstab dargestellt. Alle Werte sind, wenn nicht anders gekennzeichnet, für den ganzen Tag angegeben. Damit ist auch die Konditionierung des Pufferspeichers nach Ablauf des Profils in den Werten inbegriffen. Da für die Berechnung des Autarkiegrads für den gesamten Tag keine Messwerte der elektrischen Last des ganzen Tages vorliegen, werden für die Zeiten außerhalb des gemessenen Profils die ursprünglichen Profildaten der VDI 4655 als Lastdaten angenommen. Diese Angaben gelten auch für die folgenden Kapitel 6.2, 6.3 und 7.

Die Typtage WWH und ÜWB weisen schon ohne den Heizstab relativ hohe Eigenverbräuche von 35 % und knapp 29 % auf. Mithilfe des Heizstabs werden diese auf fast 77 % und gut 68 % gesteigert. Dadurch werden an diesen Tagen nur wenige PV-Überschüsse von 1,56 kWh und 4,13 kWh in das Netz eingespeist. Anders sieht es bei dem Typtag ÜWH aus. Da dort insgesamt über 24 kWh Energie von der PV-Anlage erzeugt werden, ist der PV-Eigenverbrauch mit dem Heizstab von gut 40 % wesentlich geringer als an den anderen Tagen. Dies ist zu großen Teilen der Temperaturgrenze von 60°C im Pufferspeicher geschuldet. Schon ab 11:03 Uhr des Versuchstags ist diese Grenze erreicht, sodass ab diesem Zeitpunkt nur noch wenig PV-Überschuss durch den Heizstab genutzt werden kann.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der Typtage mit dem Heizstab

Typtag	ÜWB	ÜWH	WWH
PV-Erzeugung (nach Wechselrichter) / kWh	13,95	24,71	7,08
Eingespeiste Energie / kWh	4,13	14,26	1,56
Energieverbrauch HS gesamt / kWh	6,45	7,02	4,99
Energieverbrauch HS aus PV-Erzeugung / kWh	5,53	5,41	2,95
Energieverbrauch HS aus Netz / kWh	0,91	1,61	2,04
PV-Eigenverbrauch ohne HS / %	28,91	18,69	35,26
PV-Eigenverbrauch mit HS / %	68,59	40,58	76,90
Autarkiegrad zu Strahlungszeiten / %	76,82	80,14	54,43
Autarkiegrad / %	51,40	54,02	31,27

Nicht überraschend ist, dass der Heizstab an dem Typtag WWH den größten Bezug aus dem Netz von 2,04 kWh hat. Interessant ist, dass der Netzbezug für den Heizstab am Typtag ÜWH größer ist als am Typtag ÜWB. Dies hat mehrere Gründe. Am Typtag ÜWH werden 10 Liter mehr gezapft als am Typtag ÜWB, obwohl die Übergangstage dasselbe Zapfprofil verwenden. Zudem spielt der Zeitpunkt der Zapfung eine entscheidende Rolle. Wird viel am frühen Morgen gezapft ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass früh am Morgen schon der Modus "Bedarf" auslöst, während noch keine PV-Überschüsse vorhanden sind. Ein weiterer Grund ist, dass zwar versucht wurde vor jedem Versuch den Pufferspeicher zu konditionieren, dies jedoch in der Durchführung nicht optimal funktioniert hat. So liegt T85% am Anfang des Typtags ÜWB bei 47°C, wohingegen die Anfangstemperatur am Typtag ÜWH dort bei 46,5°C startet. Die Differenz von T78% liegt zu Beginn beider Tage bei ca. 0,15 K. Wird von einem linearen Temperaturverlauf ausgegangen, so ergibt sich eine mittlere Temperaturdifferenz von 0,36 K. Mithilfe von Formel 7 kann die Energiedifferenz E_{Dif} in der Trinkwarmwasserzone des Pufferspeichers zu Startbeginn der beiden Typtage quantifiziert werden.

Das Volumen V wird folgendermaßen berechnet:

$$V = (0,85 - 0,78) * 750 \text{ l} = 52,5 \text{ l}$$

Eingesetzt in Formel 7 ergibt sich eine Energiedifferenz von

$$E_{Dif} = 52,5 \text{ l} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 0,36 \text{ K} = 79,04 \text{ kJ} = 0,022 \text{ kWh}$$

Bei einem durchschnittlichen Energieverbrauch für Warmwasser von 2375 kWh / 365 d = 6,51 kWh/d fallen die 0,022 kWh kaum ins Gewicht, sodass der entstandene Fehler vernachlässigbar ist.

Des Weiteren ist das Strahlungsprofil sehr unterschiedlich. Sogar bei dem insgesamt strahlungsintensivsten Typtag ÜWH sind die ersten Stunden am Morgen und Vormittag nicht ergiebig genug, als dass der Heizstab dort gut genutzt werden kann (s. Abbildung 4.3).

Die hohen PV-Eigenverbräuche an den Typtagen ÜWB und WWH hängen zum einen damit zusammen, dass insgesamt deutlich seltener und kürzer hohe Leistungen¹⁴ erzeugt werden als an dem Typtag ÜWH. Durch die viel längere Erzeugung von Leistungen nahe der Leistung der Lasten wird weniger PV-Strom eingespeist. Des Weiteren korreliert an den beiden Tagen oft zeitgleich PV-Erzeugung und der Lastenverlauf. In Abbildung 6.2 ist der Verlauf der elektrischen Lasten am Typtag ÜWB aufgeführt. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 6.3, in der die von der PV-Erzeugung gedeckten Lasten dargestellt sind, wird die Korrelation von Lastenverlauf und PV-Erzeugung deutlich. Ein Großteil der Flächen der Abbildungen deckt sich, was den Autarkiegrad von 51,4 % widerspiegelt.

¹⁴ In diesem Fall Leistungen ab 2 kW

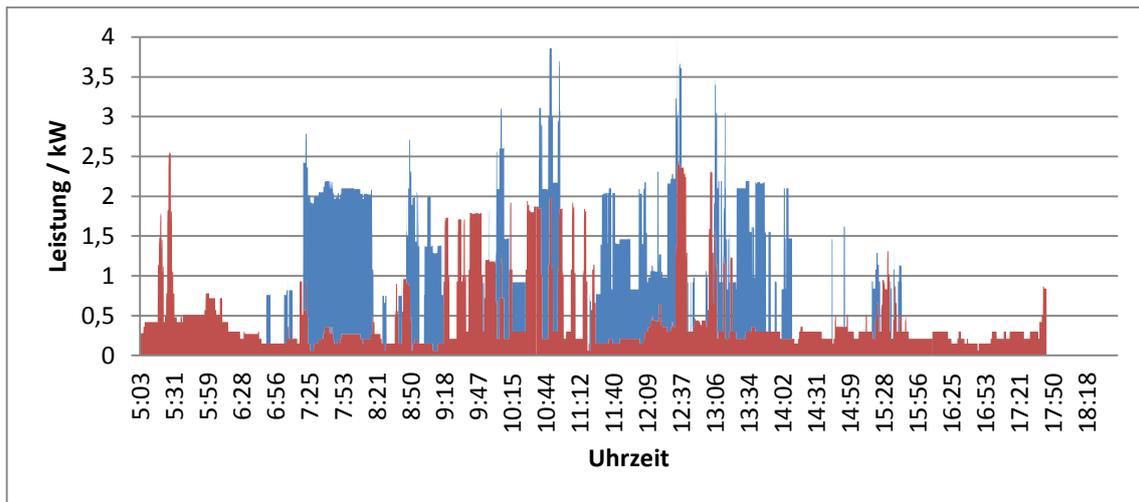


Abbildung 6.2: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot) und der Leistung des Heizstabs (blau) am Typtag ÜWB

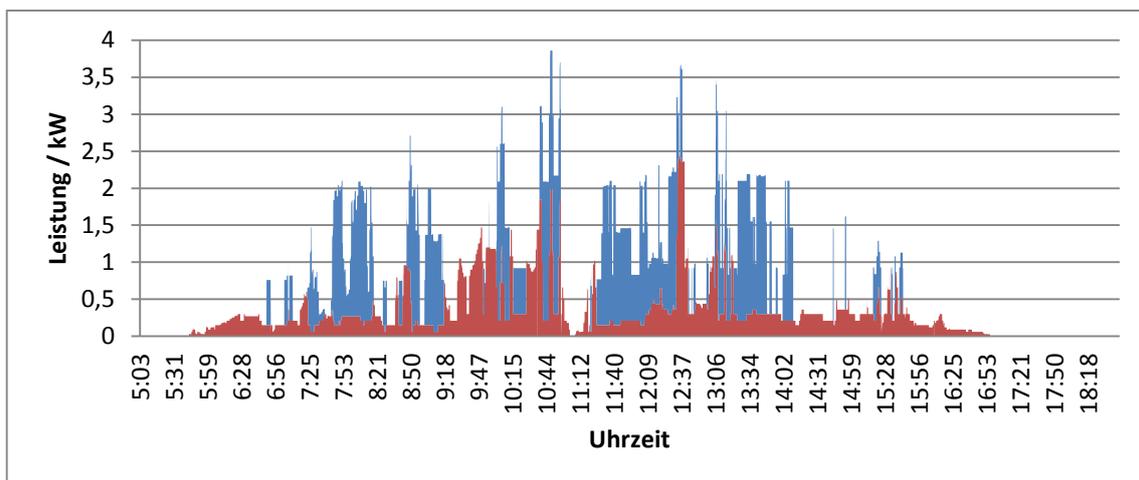


Abbildung 6.3: zeitlicher Verlauf der Nutzung der PV-Erzeugung am Typtag ÜWB; rot für elektrische Last, blau für Heizstab

In Abbildung 6.4 ist der Lastverlauf des Typtags ÜWH zu sehen. Es wird zwar ein hoher Autarkiegrad, jedoch ein relativ geringer PV-Eigenverbrauch erzielt. Am Anfang des Tages wird noch nicht so viel PV-Strom erzeugt (s. Abbildung 4.3). Ab ca. 09:30 Uhr wird viel erzeugt, was dazu führt, dass sehr bald die Speichertemperatur im Trinkwarmwasserbereich bei 60°C liegt. Deshalb kann der erzeugte Strom, wird von der elektrischen Last abgesehen, nicht mehr im Haushalt verwertet werden. Ab ca. 12 Uhr wird der Heizstab bis ca. 16 Uhr oft nur eine Minute oder kürzer betrieben. Von den PV-Überschüssen könnte der Heizstab durchgehend betrieben werden, aber die Temperaturgrenze von 60°C ist erreicht und die Wärme wird nicht genug durch Zapfungen genutzt, als dass die Temperatur im Pufferspeicher signifikant sinken würde. Daher wird der Heizstab immer wieder nur kurz mit den PV-Überschüssen betrieben, wenn die Wärmeverluste des Pufferspeichers die Temperatur weit genug abgekühlt haben.

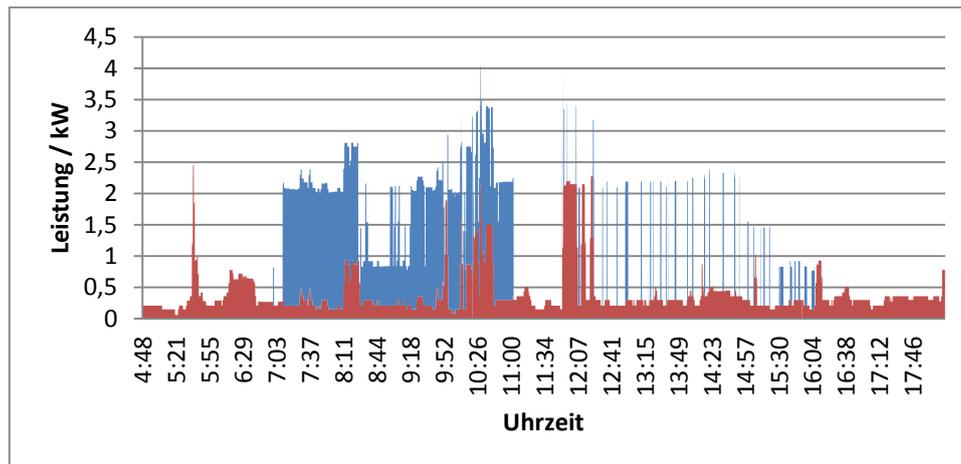


Abbildung 6.4: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot) und der Leistung des Heizstabs (blau) am Typtag ÜWH

6.2 Wärmepumpe

Zusammenfassend sind in Tabelle 6.3 die Ergebnisse der Tests mit der Wärmepumpe dargestellt. Der PV-Eigenverbrauch erhöht sich durch den Gebrauch der Wärmepumpe am stärksten am Typtag ÜWB; von 29 % auf 42 %. An den anderen Typtagen sind Steigerungen von 10 % (ÜWH) und 3 % (WWH) zu verzeichnen.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Typtage mit der Wärmepumpe

Typtag	ÜWB	ÜWH	WWH
PV-Erzeugung (nach Wechselrichter) / kWh	13,72	24,73	7,08
Eingespeiste Energie / kWh	7,62	17,16	4,19
Energieverbrauch WP gesamt / kWh	2,26	3,31	1,64
Energieverbrauch WP aus PV-Erzeugung / kWh	1,72	2,49	0,22
Energieverbrauch WP aus Netz / kWh	0,53	0,82	1,42
PV-Eigenverbrauch ohne WP / %	29,61	18,65	35,42
PV-Eigenverbrauch mit WP / %	42,18	28,73	38,58
Autarkiegrad zu Strahlungszeiten / %	70,14	80,79	41,09
Autarkiegrad / %	40,12	47,83	19,43

Der im Vergleich geringe PV-Eigenverbrauch am Typtag ÜWH von 28,7 % ist vorwiegend der internen Regelung der Wärmepumpe geschuldet. Ein Grund für die Abschaltung der Wärmepumpe ist eine sekundärseitige Vorlauftemperatur von ca. 57°C, da höhere Temperaturen schädlich für die Wärmepumpe sein können. Die sekundärseitige Rücklauftemperatur beträgt zum Zeitpunkt des Abschaltens 61°C. Um 9:52 Uhr des Typtags passiert es das erste Mal, dass sich die Wärmepumpe abschaltet, obwohl der PV-Überschuss noch ausreicht sie damit weiter zu betreiben. Zu diesem Zeitpunkt liegt T78% bei 57°C, T85% bei 59°C und T100% bei 59°C. Das Wasser im Bereich des Pufferspeichers von T85% könnte also laut Abschaltkriterien des Regelprogramms noch um 1°C

erwärmt werden. Bei einem angenommenen linearen Temperaturverlauf in der Trinkwarmwasserzone liegt die mittlere Temperaturdifferenz zu 60°C von T85% bis T100% bei 0,84 K. Die dadurch nicht speicherbare Energie beziffert sich laut Formel 7 auf

$$E_{Dif} = 15 \% * 750 \text{ l} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 0,84 \text{ K} = 395,20 \text{ kJ} = 0,110 \text{ kWh}$$

Diese Energiemenge entspricht 3,32 % des Energieverbrauchs der Wärmepumpe. Da am Typtag ÜWH 24,73 kWh von dem PV-Modulfeld erzeugt werden und davon 17,16 kWh ins Netz eingespeist werden, hätte eine zusätzliche Speicherung von 0,110 kWh kaum Auswirkung auf PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad.

Der größte Netzbezug zum Betrieb der Wärmepumpe findet am Typtag WWH statt und beträgt 1,42 kWh, wohingegen an den Typtagen der Übergangszeiten Netzbezüge unter 1 kWh vorliegen. Am Typtag ÜWH ist der Netzbezug für die Wärmepumpe höher als am Typtag ÜWB. Dies liegt zum einen daran, dass der Pufferspeicher nicht identisch konditioniert werden konnte. Der Grund dafür sind Turbulenzen, die die Wärmepumpe bei der Einspeisung in die Trinkwarmwasserzone verursacht. Der Typtag ÜWH startete mit knapp 47°C bei T85%, während der Typtag ÜWB mit über 50°C bei T85% begann. In diesem Fall ist die Energiedifferenz E_{Dif} deutlich größer als bei Kapitel 6.1. Wird wiederum von einem linearen Temperaturverlauf in der Pufferspeicherzone von 78% bis 85% Höhe ausgegangen, ergibt sich folgende Energiedifferenz laut Formel 7:

$$E_{Dif} = 52,5 \text{ l} * 1 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * \text{K}} * 2,36 \text{ K} = 518,15 \text{ kJ} = 0,144 \text{ kWh}$$

Diese Energiedifferenz entspricht 4,35 % des Energieverbrauchs der Wärmepumpe am Typtag ÜWH. Dennoch ist die Vergleichbarkeit der Typtage ÜWB und ÜWH dadurch nicht bedeutend beeinträchtigt.

Zum anderen wird die Wärmepumpe insgesamt am Typtag ÜWH 36 Minuten mit Netzbezug betrieben. Am Typtag ÜWB hingegen wird die Wärmepumpe 23 Minuten mit Netzbezug betrieben. Dies hängt damit zusammen, dass die Regelung für den Modus "PV-Überschuss" so eingestellt wurde, dass sobald die Wärmepumpe mithilfe des PV-Überschusses eingeschaltet wurde, eine negative Einspeiseleistung von -0,5 kW das Ausschaltkriterium ist (s. Kapitel 5.2). Die Wärmepumpe kann am Typtag ÜWH länger innerhalb dieser negativen Grenze betrieben werden als am Typtag ÜWB, was den größeren Netzbezug erklärt.

Am Typtag WWH reicht der PV-Überschuss zu keiner Zeit aus, um die Wärmepumpe damit zu betreiben. Um 11:28 Uhr wird die Wärmepumpe angeschaltet, um die Bedarfsdeckung zu garantieren. Zu dieser Zeit liegt auch das Maximum der PV-Erzeugung des Tages vor, weshalb während der Bedarfsdeckung durchschnittlich 1,73 kW aus der PV-Erzeugung für die Wärmepumpe genutzt

Testablauf und Testergebnisse

werden können, was 71,03 % der durchschnittlichen Wärmepumpenleistung entspricht. In Abbildung 6.5 ist die Nutzung der PV-Erzeugung für die Haushaltslasten am Typtag WWH aufgeführt.

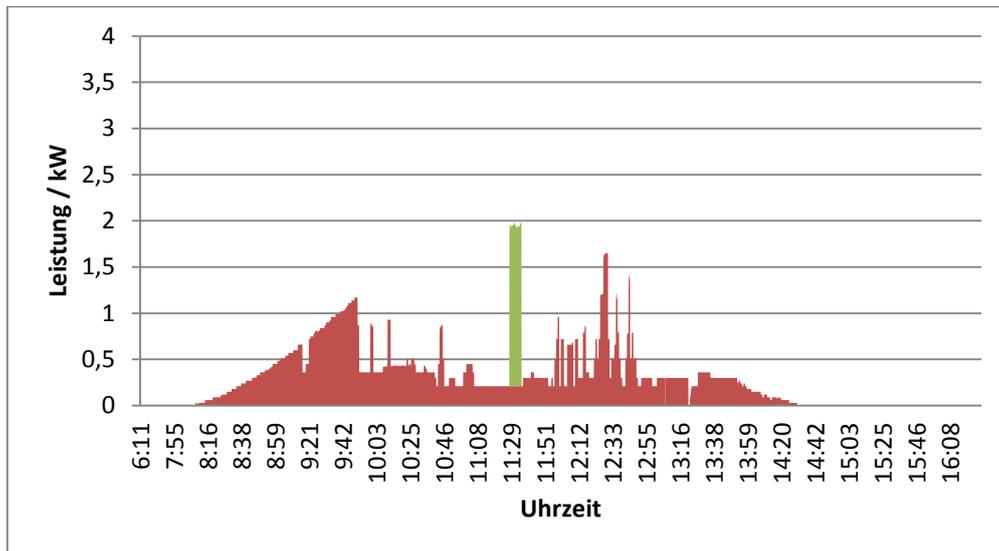


Abbildung 6.5: zeitlicher Verlauf der Nutzung der PV-Erzeugung am Typtag WWH; rot für elektrische Last, grün für Wärmepumpe

Im späteren Verlauf des Tages wird die Wärmepumpe noch zwei Mal für die Komfortsicherung angeschaltet. Ein Mal um 14:53 Uhr und ein Mal um 15:42 Uhr. Nach Beendigung des Profils erfolgt die Konditionierung des Pufferspeichers, wie in Abbildung 6.6 dargestellt.

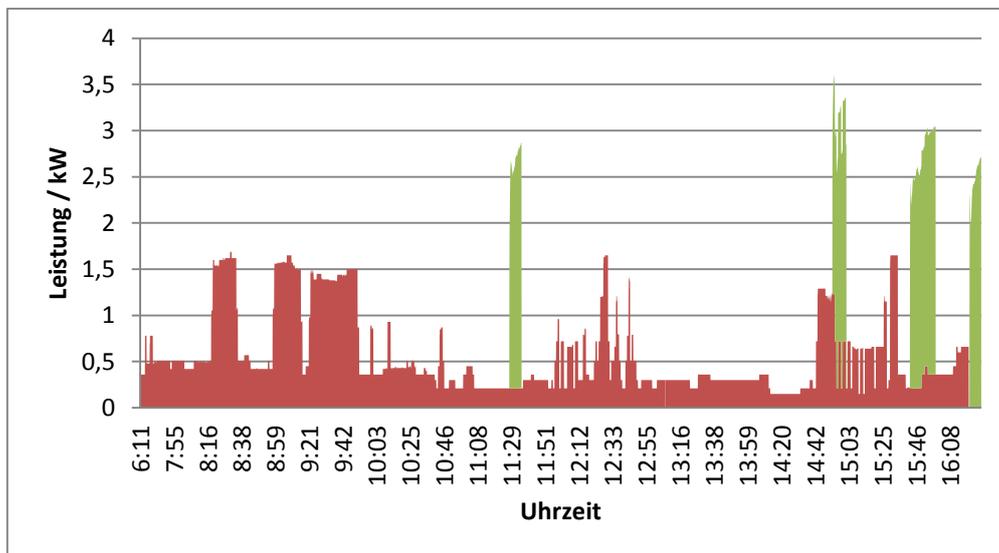


Abbildung 6.6: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot) und der Leistung der Wärmepumpe (grün) am Typtag WWH

Am Typtag ÜWH treten ab ca. 10:30 Uhr bis 14:05 Uhr alle 5 Minuten kurze Phasen auf, in denen die Wärmepumpe mit PV-Überschüssen betrieben wird. Die PV-Überschüsse reichen in dieser Zeit eigentlich aus, um die Wärmepumpe wesentlich länger am Stück zu betreiben. Die elektrische

Leistung der Wärmepumpe ist jedoch deutlich höher als 2,5 kW, da das Temperaturniveau der Trinkwarmwasserzone in diesem Zeitraum zwischen 55°C und 60°C liegt. Daher wird die Wärmepumpe ab einer Einspeiseleistung von 2,5 kW eingeschaltet, hat aber eine viel höhere Leistungsaufnahme, wodurch sehr schnell das Ausschalkriterium von -0,5 kW Einspeiseleistung unterschritten wird und die Wärmepumpe ausgeschaltet wird. Mehrfach sorgt auch die interne Regelung der Wärmepumpe für ein Ausschalten, da die Vorlauftemperatur zu warm ist. In diesem Zeitraum können deswegen nur noch wenig PV-Überschüsse für die thermische Speicherung genutzt werden, wie in Abbildung 6.7 dargestellt ist.

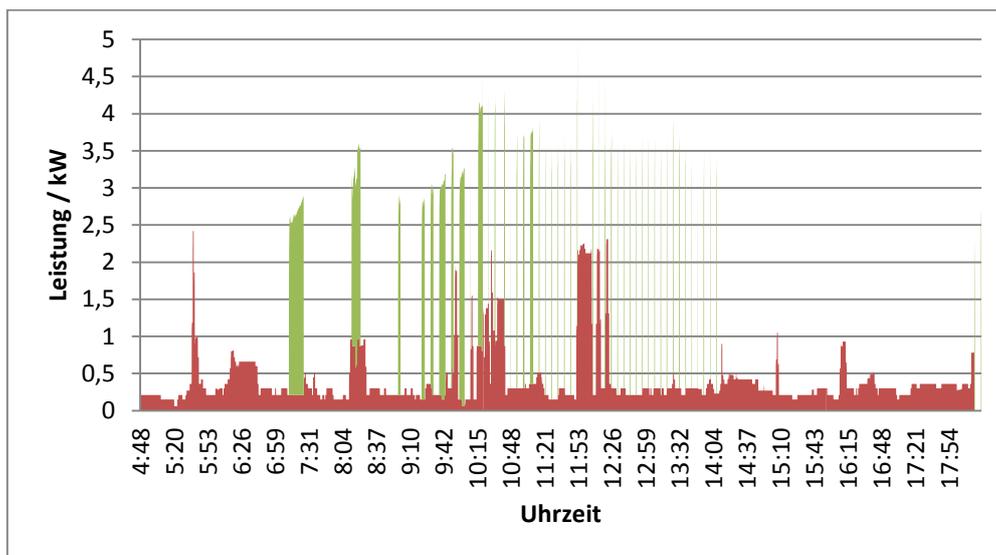


Abbildung 6.7: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot) und der Leistung der Wärmepumpe (grün) am Typtag ÜWH

Am Typtag ÜWB wird die Wärmepumpe im Gegensatz zum Typtag ÜWH nie wegen der internen Regelung der Wärmepumpe abgeschaltet. Von 8:50 Uhr bis 13:45 Uhr kann die Wärmepumpe des Öfteren mit PV-Überschüssen betrieben werden, wobei die längste zusammenhängende Nutzung dieser Art 10 Minuten dauert. In Abbildung 6.8 ist der Lastverlauf am Typtag ÜWB dargestellt. Aufgrund der vergleichsweise starken Fluktuation der Solarstrahlung (s. Abbildung 4.2) kommt es insbesondere morgens und vormittags zu Pausen bis zu einer Stunde, in denen der PV-Überschuss nicht ausreicht, um die Wärmepumpe damit zu betreiben. Um 7:19 Uhr kommt es das einzige Mal zu einem Einschalten der Wärmepumpe aufgrund der Bedarfsdeckung. Auch nach Beendigung des Profils hat der Pufferspeicher durch die PV-Überschüsse noch genug Wärme gespeichert, damit eine Konditionierung nicht erforderlich ist. T85% liegt nach Ablauf des Profils bei 52,2°C und T78% bei 45,7°C.

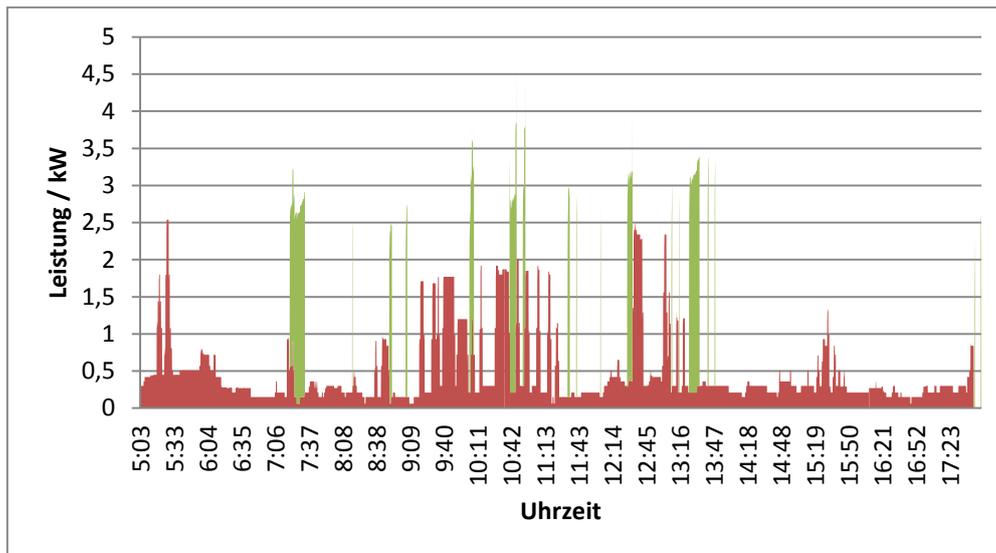


Abbildung 6.8: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot) und der Leistung der Wärmepumpe (grün) am Typtag ÜWB

6.3 Heizstab und Wärmepumpe

Die Ergebnisse der Tests mit Heizstab und Wärmepumpe sind in Tabelle 6.4 aufgeführt. In dieser Konfiguration wird an allen Typtagen weniger aus dem Netz für die Wärmeerzeuger bezogen als in den beiden anderen Konfigurationen. Die PV-Eigenverbräuche mit und ohne Wärmeerzeuger sind fast identische zu denen, wenn nur der Heizstab als Wärmeerzeuger genutzt wird. Nur am Wintertag liegt der PV-Eigenverbrauch mit Wärmeerzeugern mit 79 % um 3 % höher als bei der Konfiguration nur mit Heizstab.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Typtage mit Heizstab und Wärmepumpe

Typtag	ÜWB	ÜWH	WWH
PV-Erzeugung (nach Wechselrichter) / kWh	13,83	24,59	7,07
Eingespeiste Energie / kWh	4,25	14,26	1,40
Energieverbrauch HS+WP gesamt / kWh	5,84	5,94	3,90
Energieverbrauch HS+WP aus PV-Erzeugung / kWh	5,26	5,26	3,09
Energieverbrauch HS+WP aus Netz / kWh	0,58	0,68	0,81
PV-Eigenverbrauch ohne HS+WP / %	29,39	18,81	35,48
PV-Eigenverbrauch mit HS+WP / %	67,42	40,21	79,14
Autarkiegrad zu Strahlungszeiten / %	78,57	86,42	62,80
Autarkiegrad / %	51,79	56,58	34,28

Am Typtag WWH kann der Heizstab insgesamt 3,09 kWh mithilfe der PV-Überschüsse verwerten. Die Wärmepumpe hingegen wird ausschließlich zur Bedarfsdeckung genutzt und komplett mit Netzstrom betrieben. Durch die geringe eingespeiste Energie von 1,40 kWh liegt der PV-Eigenverbrauch mit 79 % am höchsten aller untersuchten Typtage und Konfigurationen. Von 8:30 Uhr

bis 11:58 Uhr kann der Heizstab fast ohne Unterbrechung mithilfe der PV-Überschüsse betrieben werden. Dadurch wird erst um 14:24 Uhr das erste Mal der Bedarf ausgelöst. Die Wärmepumpe wird insgesamt zwei Mal betrieben, da der Heizstab am Vormittag ausreicht, um den Bedarf zu decken. Ein Mal wird die Wärmepumpe um 14:25 Uhr für die Bedarfsdeckung und nach Ablauf des Profils zur Konditionierung noch ein Mal betrieben. In Abbildung 6.9 ist der Lastverlauf am Typtag WWH dargestellt.

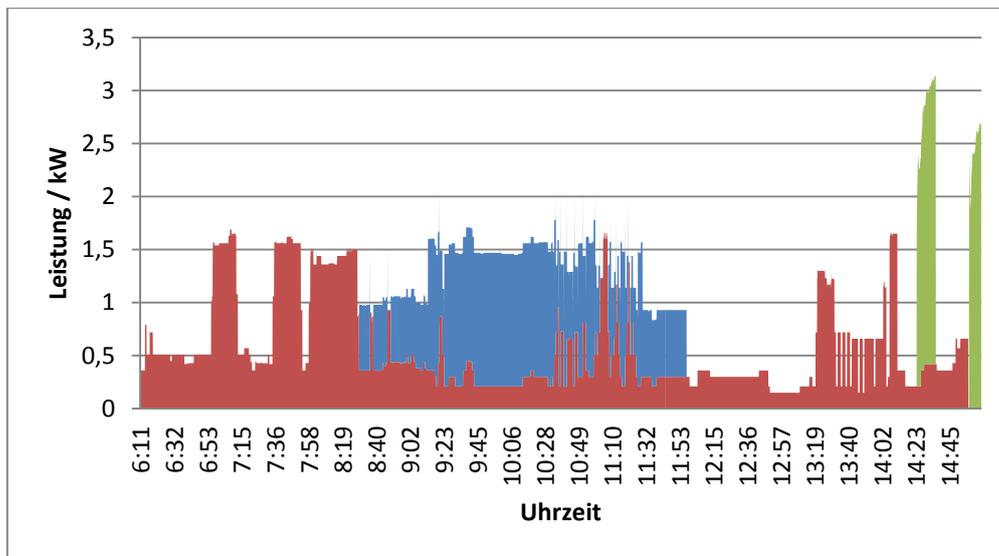


Abbildung 6.9: zeitlicher Verlauf der elektrischen Last (rot), der Leistung des Heizstabs (blau) und der Leistung der Wärmepumpe (grün) am Typtag WWH

An den Übergangstagen haben die Wärmeerzeuger die gleiche aus der PV-Erzeugung genutzte Energiemenge von 5,26 kWh. Aufgrund der deutlich höheren PV-Erzeugung am Typtag ÜWH von 24,6 kWh (s. Abbildung 6.10) im Vergleich zum Typtag ÜWB mit 13,8 kWh (s. Abbildung 6.11), liegt der PV-Eigenverbrauch am Typtag ÜWB mit 67 % um 27 % höher als am Typtag ÜWH.

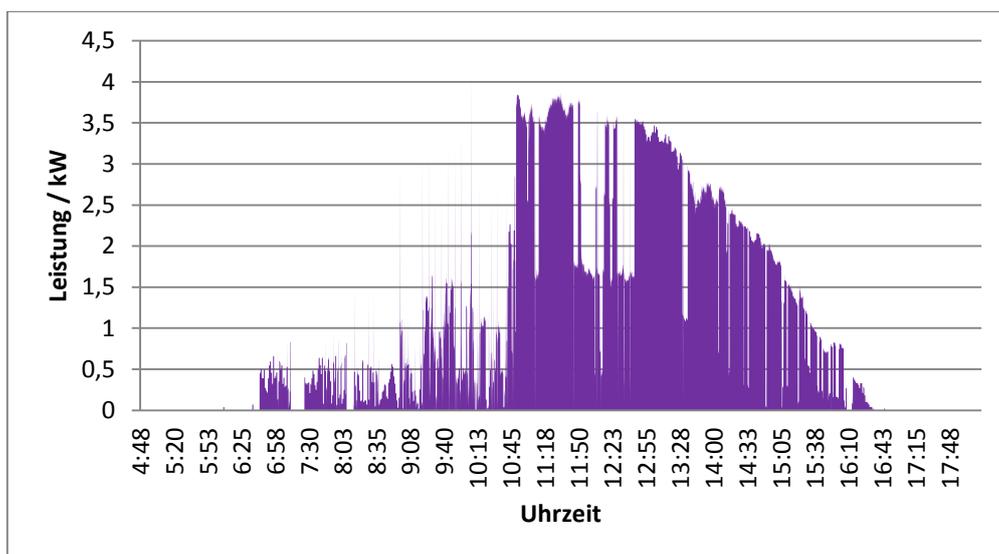


Abbildung 6.10: Ins Netz eingespeiste PV-Leistung am Typtag ÜWH

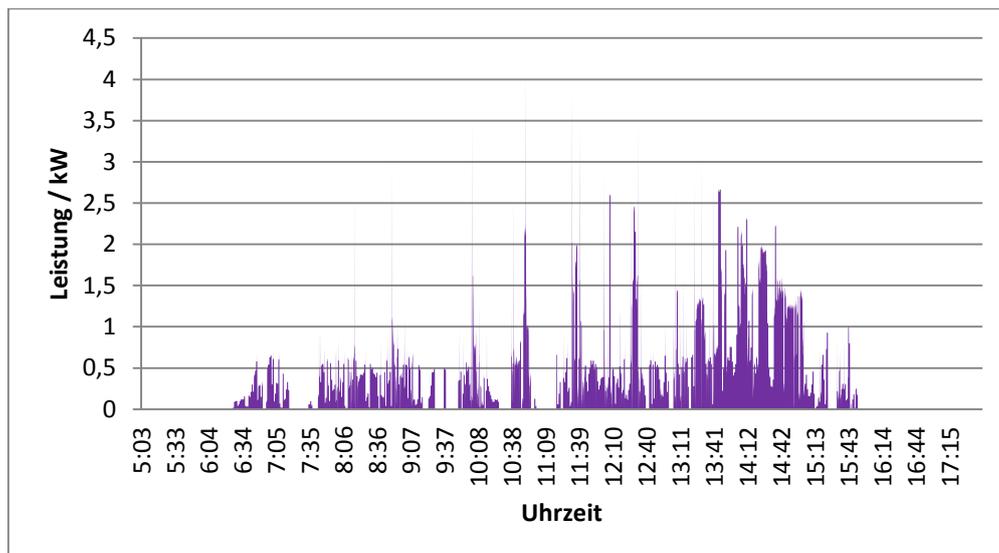


Abbildung 6.11: Ins Netz eingespeiste PV-Leistung am Typtag ÜWB

Der mit 56,6 % höchste Autarkiegrad am Typtag ÜWH ist unwesentlich größer als am Typtag ÜWB mit 51,8 %. Sogar am Typtag WWH hat die PV-Erzeugung mit einem Autarkiegrad von 34,3 % einen recht hohen Anteil an der Lastversorgung.

Der höhere Netzbezug am Typtag ÜWH im Vergleich zum Typtag ÜWB liegt daran, dass die Wärmepumpe am Typtag ÜWH über 22 Minuten mit Netzstrom betrieben wird, während die Wärmepumpe am Typtag ÜWB ca. 17 Minuten mit Netzstrom betrieben wird. Die Wärmepumpe kann am Typtag ÜWH länger in der negativen Grenze der Einspeiseleistung von -0,5 kW betrieben werden, was den höheren Netzbezug erklärt.

6.4 Zusammenfassung der Testergebnisse

Die 3-stufige Regelung des Heizstabs ermöglicht deutlich öfter eine Nutzung der PV-Überschüsse in den Untersuchungen im Vergleich zum nicht modulierbaren Betrieb der Wärmepumpe. Insbesondere zu Zeiten mit relativ geringen PV-Überschüssen hat die in Stufen schaltbare Regelung des Heizstabs Vorteile. In Abbildung 6.12 sind die PV-Eigenverbräuche aller durchgeführten Tests aufgeführt. Der Heizstab hat höhere PV-Eigenverbräuche von 12 % (ÜWH) bis 38 % (WWH) gegenüber der Wärmepumpe. Die PV-Eigenverbräuche des gemeinsamen Betriebs von Heizstab und Wärmepumpe sind denen des Heizstabs sehr ähnlich. Interessant wären Betrachtungen mit stufenlos regelbaren Heizstab und/oder Wärmepumpe.

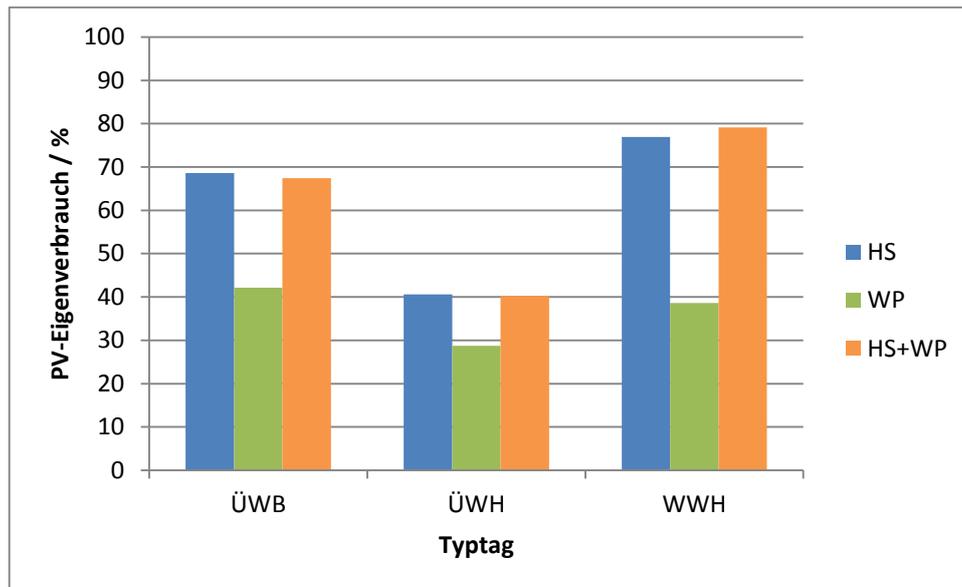


Abbildung 6.12: PV-Eigenverbrauch der Experimentalanlagen-Konfigurationen an den Typtagen ÜWB, ÜWH und WWH

Die Autarkiegrade der Konfigurationen Heizstab sowie Heizstab und Wärmepumpe unterscheiden sich nur geringfügig voneinander, wie in Abbildung 6.13 dargestellt. Der größte Unterschied liegt am Typtag WWH vor. Die Konfiguration mit Heizstab hat dort einen Autarkiegrad von 31,3 %, während die Konfiguration mit Heizstab und Wärmepumpe einen Autarkiegrad von 34,3 % aufweist. In allen Konfigurationen ist der Autarkiegrad am Typtag ÜWH mit 47,8 % (WP) bis 56,6 % (HS+WP) am höchsten. Die Differenzen der Autarkiegrade in der Übergangszeit sind recht niedrig. Beispielsweise liegt der Autarkiegrad der Konfiguration mit Heizstab am Typtag ÜWB bei 51,4 % und am Typtag ÜWH bei 54,0 %.

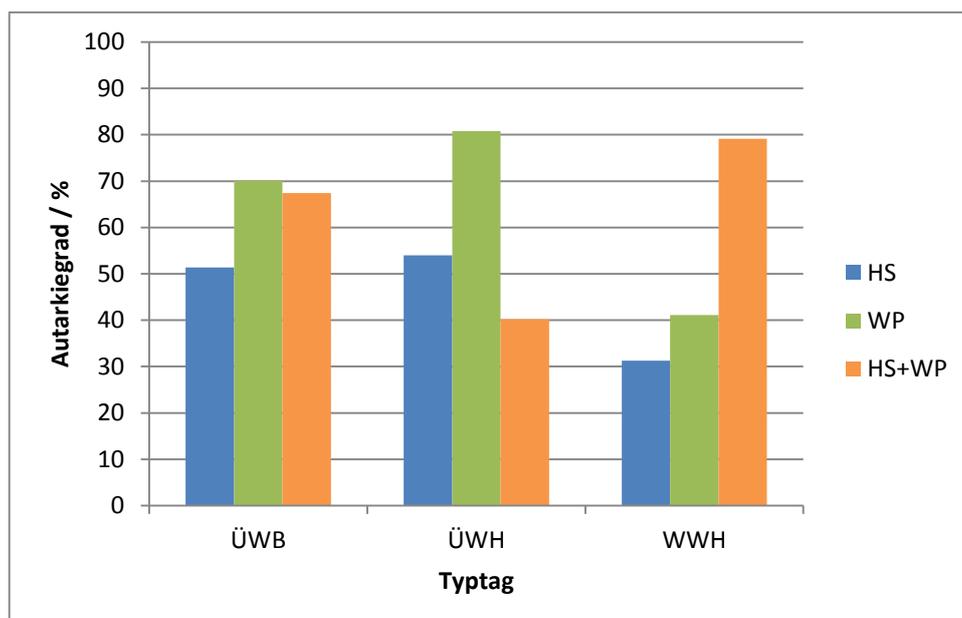


Abbildung 6.13: Autarkiegrad der Experimentalanlagen-Konfigurationen an den Typtagen ÜWB, ÜWH und WWH

In Abbildung 6.14 ist der Stromverbrauch aller Konfigurationen und Typtage aufgeführt. Aufgrund des Wirkungsgrads des Heizstabs von ca. 1 im Vergleich zur Leistungszahl der Wärmepumpe von durchschnittlich deutlich mehr als 1 hat die Konfiguration Heizstab an allen Typtagen den größten Stromverbrauch, gefolgt von dem gemeinsamen Betrieb von Heizstab und Wärmepumpe. Der niedrigste Stromverbrauch liegt bei der Wärmepumpe als alleiniger Wärmeerzeuger vor. Da am Typtag WWH viel weniger oder gar keine PV-Überschüsse aufgrund der geringen PV-Erzeugung für die Wärmeerzeuger genutzt werden können, haben alle Konfigurationen dort den niedrigsten Stromverbrauch.

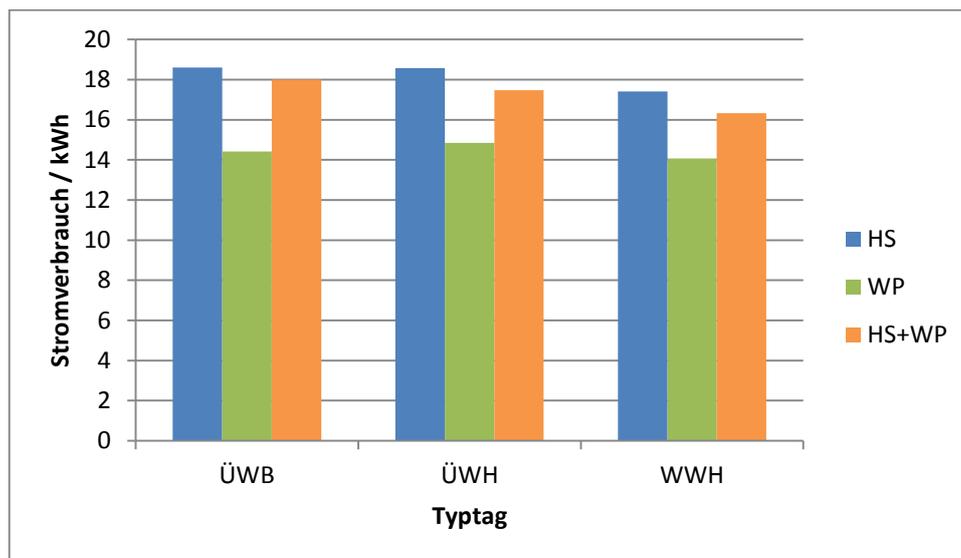


Abbildung 6.14: Gesamtstromverbrauch inklusive dem Stromverbrauch der Wärmeerzeuger an den Typtagen mit den verschiedenen Konfigurationen

Bei ausschließlicher Betrachtung von PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad ist die Konfiguration HS+WP die sinnvollste. Bei dieser Betrachtungsweise ist die zweitbeste Konfiguration der Heizstab und die drittbeste die Wärmepumpe. Dabei wird jedoch außer Acht gelassen, dass der Heizstab einen um durchschnittlich 3,75 kWh/d höheren Energieverbrauch als die Wärmepumpe hat. Wird von einer durchschnittlichen Leistungszahl der Wärmepumpe von 3,5 ausgegangen bedeutet dies, dass die Wärmepumpe mit jeder genutzten kWh Strom 2,5 kWh mehr Energie in den Pufferspeicher einbringt als der Heizstab. Wenn der Heizstab die gleiche Energie in den Pufferspeicher einbringen soll wie die Wärmepumpe in den Versuchen, müsste er 1,45 kWh (ÜWB), 4,56 kWh (ÜWH) und 0,76 kWh (WWH) mehr PV-Überschüsse nutzen, als dies in den Versuchen der Fall ist. Dadurch würde sich der Autarkiegrad mit dem Heizstab auf 57,2 % (ÜWB), 61,0 % (ÜWH) und 34,1 % (WWH) erhöhen.

7. Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Regelung für den kombinierten Betrieb einer PV-Anlage mit Heizstab und/oder Sole-Wasser-Wärmepumpe an einer Experimentalanlage erfolgreich implementiert und untersucht. Mithilfe der Messwerte ist es möglich die verschiedenen Konfigurationen hinsichtlich PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad zu vergleichen und zu bewerten.

Der gemeinsame Betrieb der Wärmeerzeuger vereint beide Vorteile der Systeme, also die Nutzung recht geringer PV-Überschüsse mithilfe des Heizstabs und die effiziente Nutzung des Stroms durch die Wärmepumpe bei hohen PV-Überschüssen oder zur Bedarfsdeckung. Der Heizstab wird ausschließlich für die Nutzung der PV-Überschüsse verwendet und die Wärmepumpe vorwiegend für die Bedarfsdeckung. Da in den Untersuchungen nur die Trinkwarmwasserzone des Pufferspeichers zur thermischen Speicherung zur Verfügung steht, lassen sich an den Übergangstagen sehr kurze Betriebsdauern ab einem gewissen Zeitpunkt nicht vermeiden. In fortführenden Untersuchungen sollte die Raumheizzone mit einbezogen werden. So kann eine wesentlich größere Menge Energie gespeichert werden.

Die Nutzung von PV-Überschüssen mit der nicht modulierbaren Wärmepumpe ist nicht einfach umzusetzen. Durch die steigende elektrische Leistungsaufnahme bei steigendem Temperaturniveau ist es problematisch einen festen Wert als Einschaltkriterium in der Regelung implementieren, was sonst schnell in einer hohen Taktung resultieren könnte. Eine Option wäre, sobald die elektrische Leistung der Wärmepumpe einen bestimmten Wert überschreitet, die Einspeisung von der Trinkwarmwasserzone in die Raumheizzone zu verlegen. Eine andere Möglichkeit wäre, mithilfe von Versuchen den Zusammenhang von elektrischer Leistung der Wärmepumpe und der sekundärseitigen Vor- und Rücklauftemperatur zu bestimmen und daraus eine Formel herzuleiten, die zu allen Temperaturen die benötigte elektrische Leistung für die Wärmepumpe berechnet. Damit wäre die Dynamik dieses Zusammenhangs in der Regelung berücksichtigt und könnte dementsprechend die Wärmepumpe ohne feste Werte regeln. Weiterhin problematisch ist, dass Tage mit stark wechselnden Einstrahlungsverhältnissen dennoch mit hoher Taktung der Wärmepumpe verbunden sein können. Eine hohe Taktung eines Heizstabs ist hingegen unkritisch.

In zukünftigen Betrachtungen sollten die ökonomischen Aspekte mit berücksichtigt werden. Der gemeinsame Betrieb von Heizstab und Wärmepumpe kann aktuell nicht wirtschaftlich sein, da die Investitionskosten eines solchen Systems sehr hoch wären. Bezüglich des Heizstabs und der Wärmepumpe als alleinige Wärmeerzeuger könnte es jedoch anders sein. Interessante Untersuchungen stellen auch Tests mit stufenlos regelbaren Heizstab und Wärmepumpe dar. Dabei könnte eine Gegenüberstellung zu den Untersuchungen der Tests dieser Arbeit von Bedeutung sein. Wie ändern sich PV-Eigenverbrauch und Autarkiegrad und wie viel mehr Energie kann mithilfe einer stufenlosen Regelung im Haushalt genutzt werden?

Quellenverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt, „Ziele der Energiewende,“ 27. Oktober 2014. [Online]. Verfügbar: <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/ziele-der-energiewende>. [Zugriff am 5. September 2015].
- [2] Agentur für erneuerbare Energien, „Strommix in Deutschland 2014,“ 7. Januar 2014. [Online]. Verfügbar: <http://www.unendlich-viel-energie.de/strommix-deutschland-2014>. [Zugriff am 11. September 2015].
- [3] V. Quaschnig, Erneuerbare Energien und Klimaschutz, Carl Hanser Verlag München, 2013.
- [4] V. Quaschnig, „Heizen mit PV-Strom - Chance für den Wärmemarkt,“ März 2013. [Online]. Verfügbar: <http://volker-quaschnig.de/artikel/2013-03-Heizen-mit-PV-Strom/index.php>. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [5] T. Tjaden, J. Weniger und V. Quaschnig, „Individuelle Autarkie,“ *Erschienen in: pv magazine, Smart Home*, pp. 58-61, Februar 2014.
- [6] „SolarServer - PVX Spotmarkt Preisindex Solarmodule,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.solarserver.de/service-tools/photovoltaik-preisindex.html>. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [7] Bundesverband Solarwirtschaft e.V., „Statistische Zahlen der deutschen Solarstrombranche (Photovoltaik),“ Juni 2015. [Online]. Verfügbar: http://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/media/pdf/2015_6_BSW_Solar_Faktenblatt_Photoovoltaik.pdf. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [8] K. Mertens, Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice, John Wiley & Sons, 2014.
- [9] Bundesnetzagentur, 30. September 2015. [Online]. Verfügbar: http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Photovoltaik/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze/DatenMeldgn_EEG-VergSaetze_node.html. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [10] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Gesamtausgabe der Energiedaten - Datensammlung des BMWi,“ 19. Mai 2015. [Online]. Verfügbar: <http://bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/gesamtausgabe,did=476134.html>. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [11] T. Tjaden, J. Weniger und V. Quaschnig, „Solare Unabhängigkeitserklärung,“ *Erschienen in: pv magazine, Die Speicher sind da!*, pp. 50-54, Oktober 2012.
- [12] K. Mertens, Photovoltaik, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2011.

Quellenverzeichnis

- [13] VDE Verband Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz, 2011.
- [14] M. Sterner, F. Eckert, M. Thema und F. Bauer, „Der positive Beitrag dezentraler Batteriespeicher für eine stabile Stromversorgung,“ (FENES) OTH Regensburg, Kurzstudie im Auftrag von BEE e. V. und Hannover Messe, Regensburg / Berlin / Hannover, 2015.
- [15] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, „Speicherstudie 2013,“ Freiburg, 2013.
- [16] T. Tjaden, J. Weniger und V. Quaschnig, „Dezentrale PV-Batteriespeicher vorausschauend betreiben,“ OTTI 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2014.
- [17] M. Bost, A. Aretz und B. Hirschl, „Eigenverbrauch von PV-Strom,“ 2. Nationaler Kongress der erneuerbaren Energien und der Energieeffizienz, Solothurn, 2013.
- [18] HTW Berlin, „Optimale Dimensionierung von PV-Speichersystemen,“ *Erschienen in: pv magazine, Wechselrichter*, pp. 70-75, Januar 2013.
- [19] C. Märtel, „Bleiakku als Stromspeicher für Solaranlagen,“ 19. August 2015. [Online]. Verfügbar: <http://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/stromspeicher/bleiakku.html>. [Zugriff am 20. September 2015].
- [20] H. Lang, „Lithium schlägt Blei,“ 13. November 2014. [Online]. Verfügbar: <http://www.energie-und-technik.de/energiespeicher/artikel/114598/>. [Zugriff am 22. September 2015].
- [21] W. von Wedel, „Blei-Batterien vs. Li-Ionen-Batterien: Leistung, Haltbarkeit, Sicherheit,“ 2013. [Online]. Verfügbar: http://www.energiespeicher-nds.de/fileadmin/Arbeitskreise/Workshops/speicheranw._Gebaueude-Energiemanagement/Wedigo_Wenzel_Next_Energy_EFZN.pdf. [Zugriff am 20. September 2015].
- [22] Agora Energiewende, „Stromspeicher in der Energiewende,“ 2014.
- [23] „Wie kann man mit kalter Luft heizen?,“ *Erschienen in: techno scope, Intelligente Häuser*, September 2011.
- [24] Deutsches Institut für Normung e. V., Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumbeheizung und Kühlung - Teil 1: Begriffe; Deutsche Fassung EN 14511-1:2011, 2012.
- [25] HTW Berlin, „Dezentrale Solarstromspeicher für die Energiewende,“ 2015.
- [26] V. Quaschnig, Regenerative Energiesysteme, Carl Hanser Verlag München, 2013.
- [27] Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft e. V., „Technische Anschlussbedingungen TAB 2007 für den Anschluss an das Niederspannungsnetz, Kapitel 10.2.7,“ [Online]. Verfügbar:

Quellenverzeichnis

- https://www.vde.com/de/fnn/dokumente/documents/tab_2007_ausgabe%202011.pdf. [Zugriff am 23. September 2015].
- [28] M. Fuhs, „Resteverwertung leicht gemacht,“ *Erschienen in: pv magazine, 90% aller Geschäftsmodell-Innovationen sind eine Rekombination von Elementen bestehender Geschäftsmodelle.*, pp. 25-27, September 2014.
- [29] Rennergy Systems AG, „PV-Heiz premium,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.rennergy.de/produkte/produktuebersicht/pv-heiz/pv-heiz-premium.html>. [Zugriff am 10. September 2015].
- [30] SolarInvert GmbH, „Stromhamster SHKW Heizstab 0-6 kW,“ [Online]. Verfügbar: <http://solarinvert.de/stromhamster-shkw-heizstab-0-6-kw.html>. [Zugriff am 10. September 2015].
- [31] Advanced Energy Industries, „AE PV Heater,“ [Online]. Verfügbar: http://www.advanced-energy.de/upload/file/datasheets/datasheet_ae_pv_heater_de.pdf. [Zugriff am 10. September 2015].
- [32] Magna-Power Electronics Inc., „TS Series 5 kW to 45 kW,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.magna-power.com/products/programmable-dc-power-supplies/ts-series>. [Zugriff am 13. September 2015].
- [33] KOSTAL Solar Electric GmbH, „PIKO BA,“ [Online]. Verfügbar: http://www.kostal-solar-electric.com/de-DE/Produkte_Service/PIKO%20Speichersystem/PIKO%20BA. [Zugriff am 15. September 2015].
- [34] Statron Gerätetechnik GmbH, „Elektronische Last Typ 3224.1,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.statron.de/details/388>. [Zugriff am 16. September 2015].
- [35] S. Günther, Konzeption und Aufbau von Komponenten einer Experimentieranlage, HTW Berlin, 2014.
- [36] STIEBEL ELTRON GmbH & Co. KG, „WPF 5, WPF 7, WPF 10, WPF 13 Gebrauchs- und Montageanweisung,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.eibmarkt.com/Files/Datenblatt/WPF%207.pdf>. [Zugriff am 25. September 2015].
- [37] Verein Deutscher Ingenieure e. V., „Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen,“ 2008.
- [38] F. Lammers, „Vorschlag zur Ergänzung der VDI 4655 um PV-Erzeugerprofile,“ 2014.
- [39] Universität Kassel - Institut für thermische Energietechnik, „DHW Calc - Tool for the Generation of Domestic Hot Water (DHW) Profiles on a Statistical Basis,“ 2003.
- [40] K. W. Usemann, Energieeinsparende Gebäude und Anlagentechnik, Seite 235, Springer, 2004.

Quellenverzeichnis

- [41] Arizona State University East, Photovoltaic Testing Laboratory, „PHOTOVOLTAIC MODULE THERMAL/WIND PERFORMANCE: Long -Term Monitoring and Model Development For Energy Rating,“ 2003. [Online]. Verfügbar: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/35645.pdf>. [Zugriff am 2. September 2015].
- [42] Leipziger Institut für Meteorologie, „Wetter & Klima Archivdaten,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.uni-leipzig.de/~meteo/de/wetterdaten/archiv.php>. [Zugriff am 12. September 2015].
- [43] R. Heimrath und M. Haller, „The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32,“ Graz, 2007.
- [44] LUXOR Solar GmbH, „Eco Line P60/230-250 W,“ [Online]. Verfügbar: http://www.luxor-solar.de/root/img/pool/pdf/datenblatt/ecoline60poly/lx_db_ecoline60poly_230-250w_de.pdf. [Zugriff am 3. September 2015].
- [45] C. Dick, „Steuerung und Regelung einer Experimentalanlage zur Kombination einer Photovoltaikanlage und einer Sole-Wasser-Wärmepumpe,“ Nordhausen, 2015.
- [46] „Photovoltaik.org,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.photovoltaik.org/wirtschaftlichkeit/amortisation>. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [47] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2014),“ 24. Februar 2014. [Online]. Verfügbar: [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/\\$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20%282014%29_24.02.2014_final_Journalisten.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/83C963F43062D3B9C1257C89003153BF/$file/Energie-Info_Erneuerbare%20Energien%20und%20das%20EEG%20%282014%29_24.02.2014_final_Journalisten.pdf). [Zugriff am 14. September 2015].
- [48] Solaranlagen-Portal, „Einspeisevergütung für Photovoltaik Anlagen 2015,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.solaranlagen-portal.com/photovoltaik/wirtschaftlichkeit/einspeiseverguetung>. [Zugriff am 15. September 2015].
- [49] „Verivox-Verbraucherpreisindex Strom,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.verivox.de/verbraucherpreisindex-strom/>. [Zugriff am 1. Oktober 2015].
- [50] Bundesverband Wärmepumpe e. V., Regularium für das Label "SG Ready" für elektrische Heizungs- und Warmwasserwärmepumpen, 2013.
- [51] Bundesverband Wärmepumpe e. V., „Funktionsweise Wärmepumpe,“ [Online]. Verfügbar: <http://www.waermepumpe.de/waermepumpe/waermequellen.html>. [Zugriff am 25. September 2015].
- [52] J. Kestin, J. V. Sengers, B. Kamgar-Parsi und J. M. H. Levelt Sengers, Thermophysical Properties of Fluid H₂O, 1984.

A. Anhang

Kenndaten des emulierten PV-Modulfeldes

Tabelle A.1: Für den PV-Emulator genutzt Kennwerte des PV-Modulfeldes

Nennspannung:	393,9 V
Nennstrom:	15,86 A
Leerlaufspannung:	489,58 V
Kurzschlussstrom:	16,94 A
alpha voltage:	-0,0032
alpha current:	0,0005

Elektrische Lastprofile der Typtage ÜWB, ÜWH und WWH

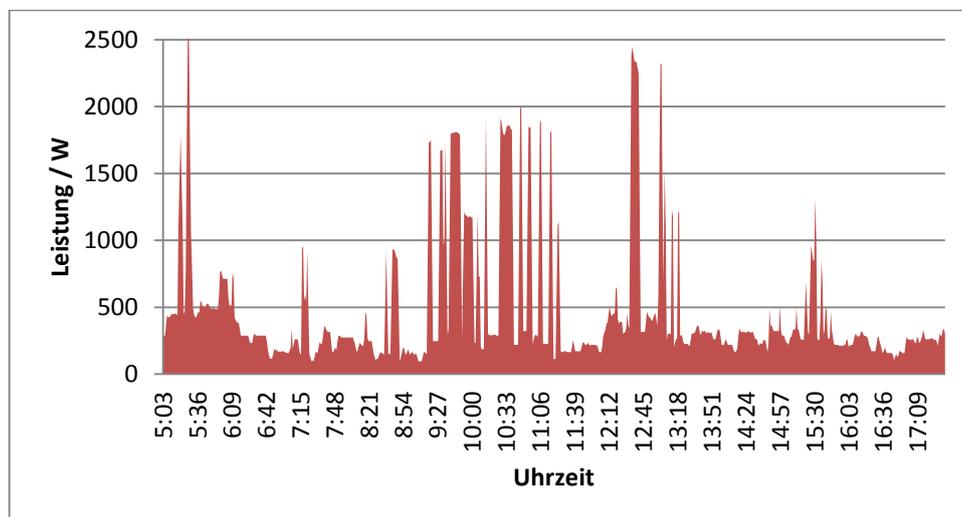


Abbildung A.1: elektrischer Lastverlauf am Typtag ÜWB

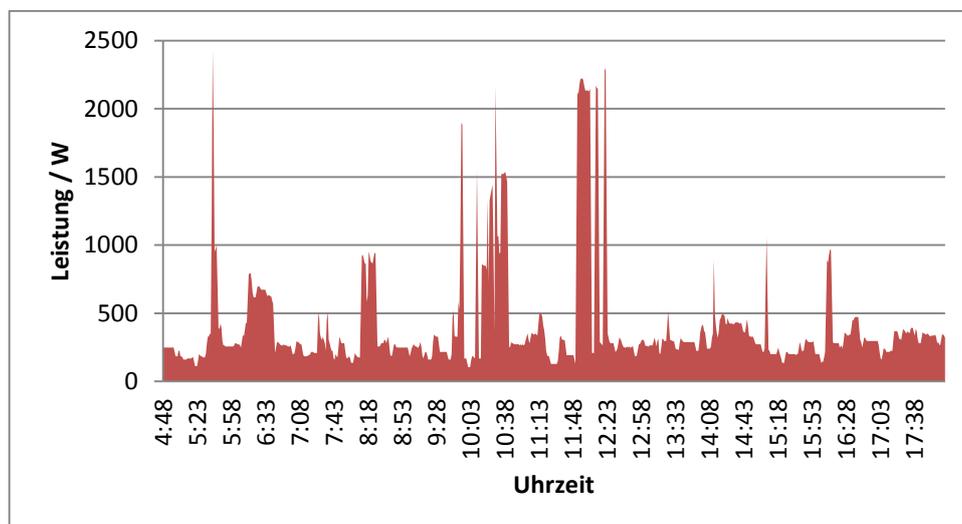


Abbildung A.2: elektrischer Lastverlauf am Typtag ÜWH

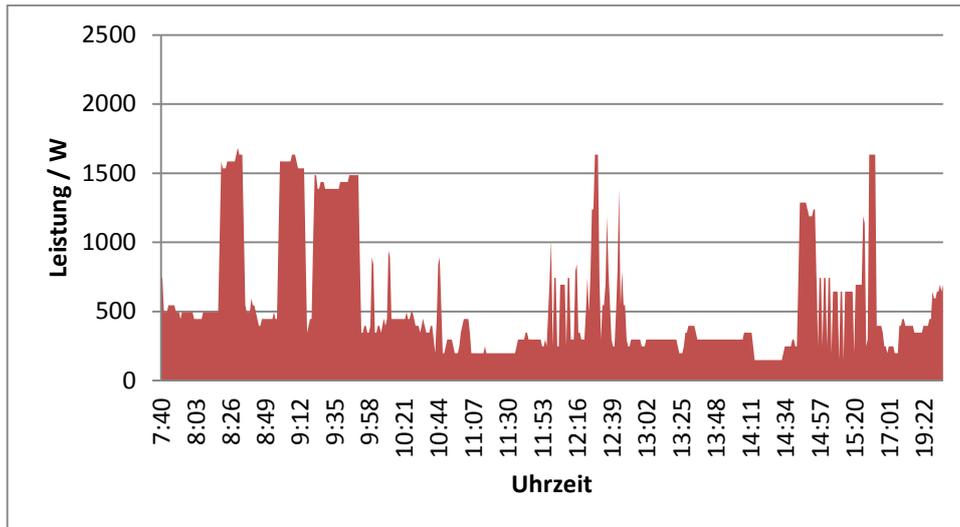


Abbildung A.3: elektrischer Lastverlauf am Typtag WWH

Strahlungsprofile der Typtage ÜWB, ÜWH und WWH

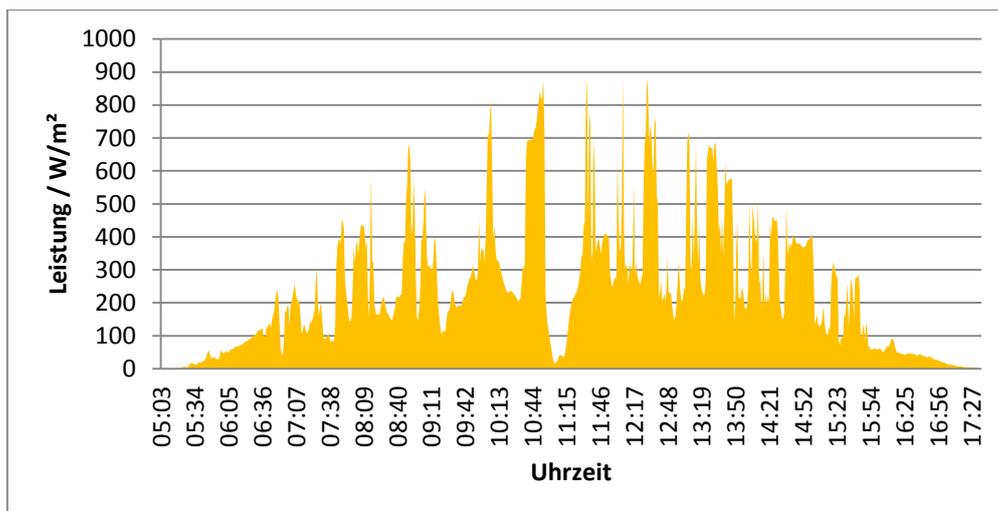


Abbildung A.4: Solarstrahlungsprofil am Typtag ÜWB

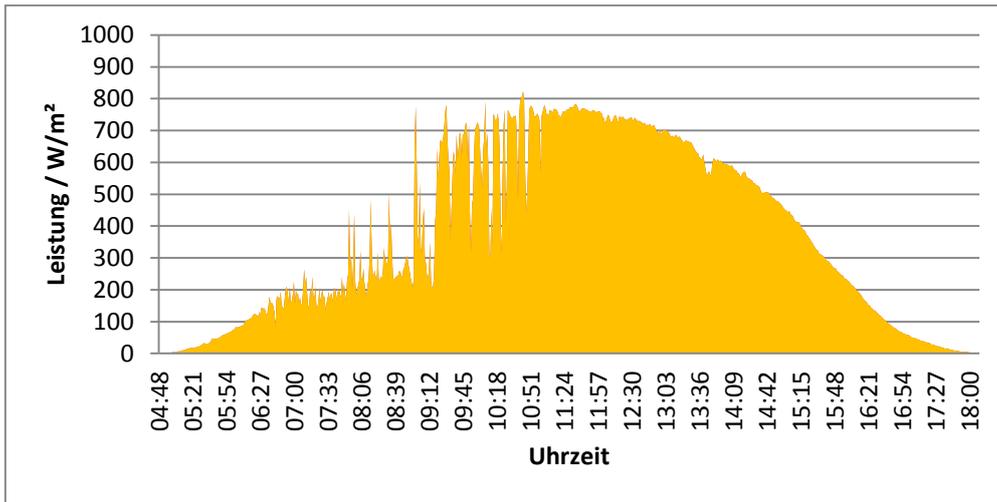


Abbildung A.5: Solarstrahlungsprofil am Typtag ÜWH

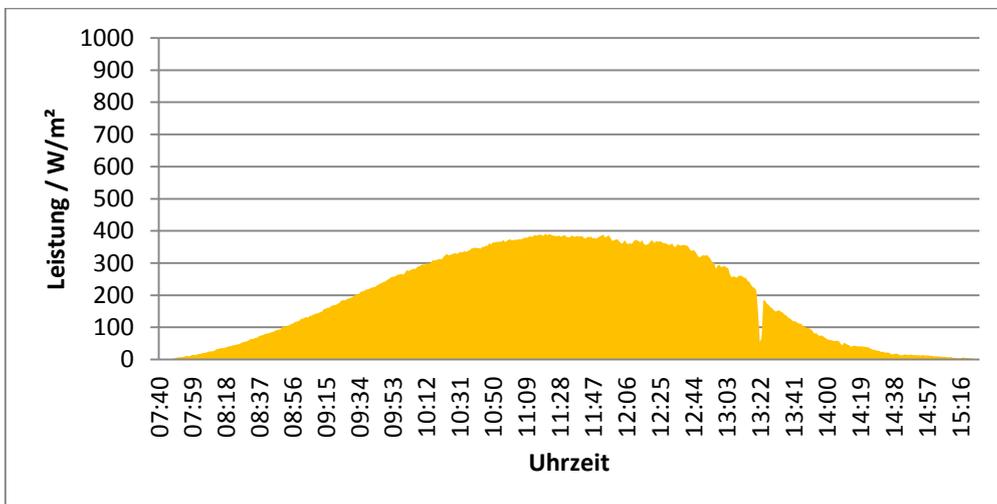


Abbildung A.6: Solarstrahlungsprofil am Typtag WWH

Zapfprofile der Typtage ÜWB, ÜWH und WWH

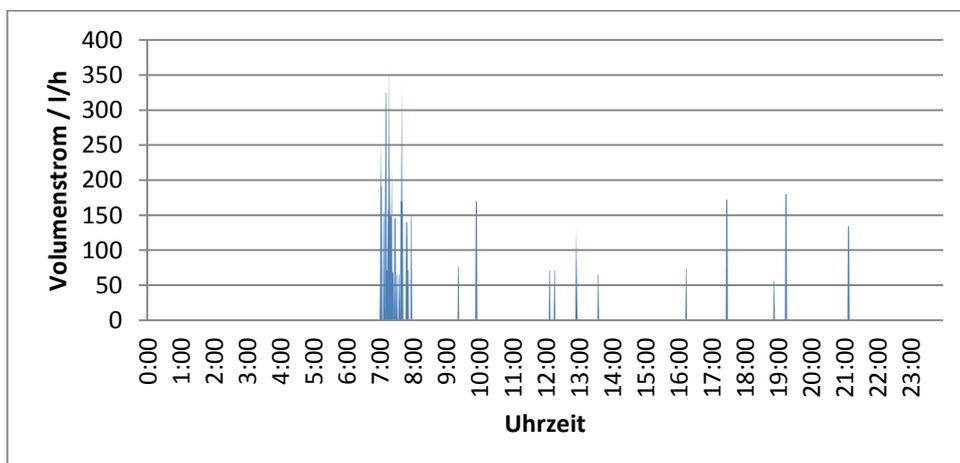


Abbildung A.7: Zapfprofil des Trinkwarmwassers am Typtag ÜWB und ÜWH

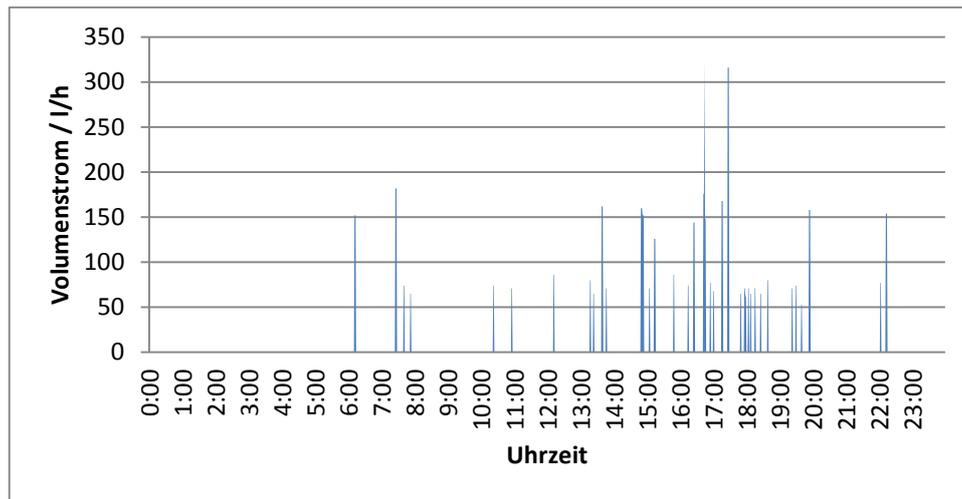


Abbildung A.8: Zapfprofil des Trinkwarmwassers am Typtag WWH

Einstellungen des Zapfprofils mit DHW Calc

LOGFILE ZapfprofilLGr_log.txt

for a single family house

Total duration: 365 days

Start day : 1. day of the year

Mean daily draw-off vol.: 160 l/day

No. of categories: 4

Time step duration: 1 min

FLOW RATE SETTINGS

Categories: 1 2 3 4

Mean flow Rate: 70 160 450 0 l/h

Duration of draw-off: 2 3 5 5 min

portion: 41 51 8 0 %

sigma: 10 20 50 24 l/h

Anhang

min. flow rate: 6 l/h

max. flow rate: 720 l/h

PROBABILITY FUNCTION SETTINGS

Step function probability distribution for weekdays + weekend-days

Mean DHW-volume tapped during 6 time periods:

weekdays

time period ratio of daily DHW-volume

22:00-06:30 2 %

06:30-07:30 50 %

07:30-12:00 6 %

12:00-13:00 16 %

13:00-18:00 6 %

18:00-22:00 20 %

weekend-days

time period ratio of daily DHW-volume

23:00-07:00 3 %

07:00-09:00 14 %

09:00-15:00 20 %

15:00-17:00 20 %

17:00-20:00 38 %

20:00-23:00 5 %

Ratio of the mean daily draw-off volume tapped

on weekend-days/on weekdays: 115 %

Seasonal Variations:

Anhang

Sine amplitude: 10 %

Day of sine maximum: 45

Holiday Periods:

Relative consumption during holiday periods: 0 %

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, den 21.10.2015