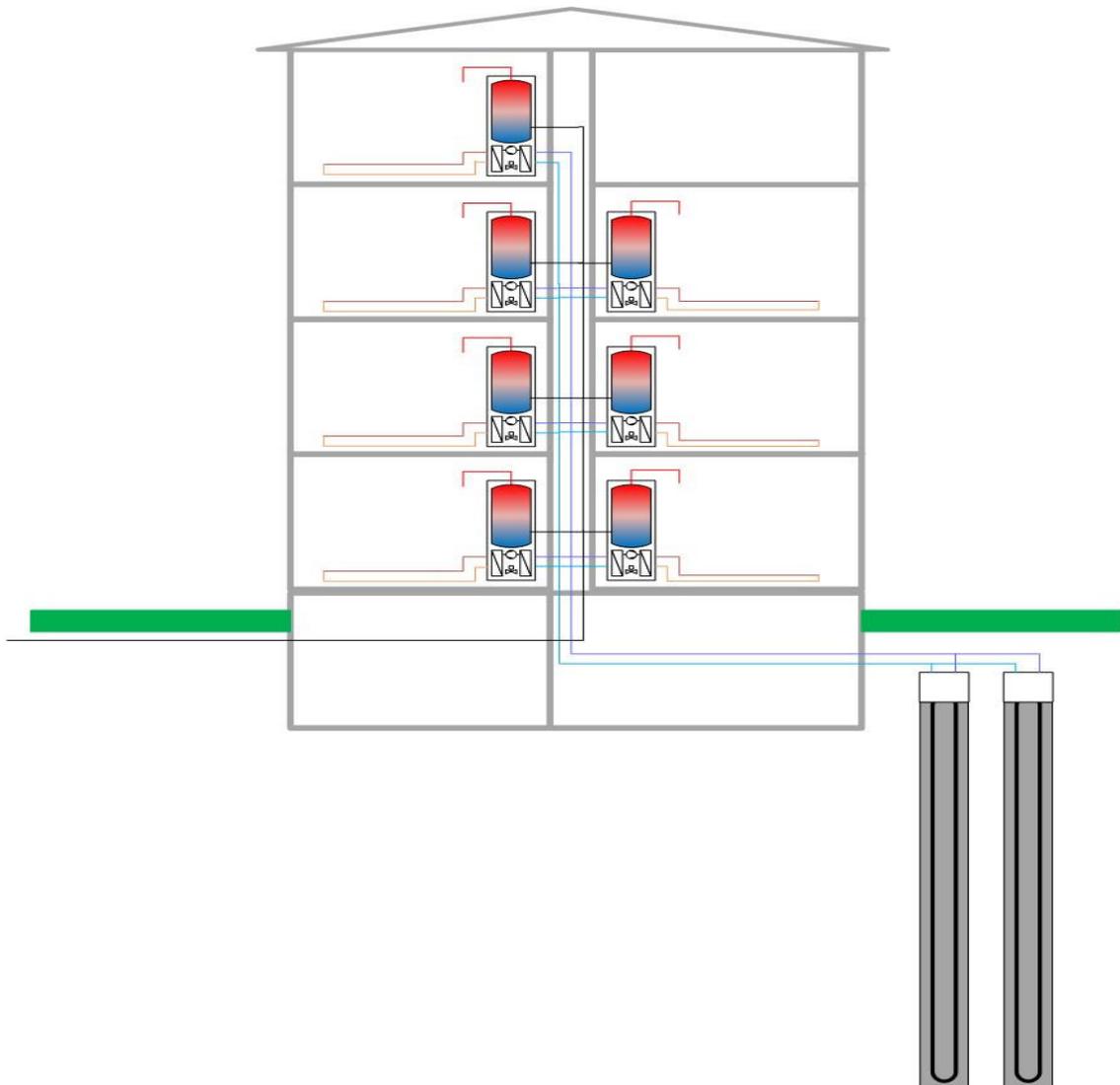




Schlussbericht vom 28.02.2023

HpCosy - Heat Pump Comfort System



Quelle: FHNW



n|w Fachhochschule Nordwestschweiz
Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik



ENERGIE
INSTALLATION
NETZE **EWJR**



SPF INSTITUT FÜR
SOLARTECHNIK

Datum: 28.02.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hofackerstrasse 30, 4132 Muttenz
www.fhnw.ch

SPF Institut für Solartechnik, OST – Ostschweizer Fachhochschule
Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil Jona
www.spf.ch
<https://www.ost.ch/>

Autor/in:

Christoph Messmer, INEB, FHNW christoph.messmer@fhnw.ch
Robert Haberl, SPF, OST, robert.haberl@ost.ch
Mathias Schindler, INEB, FHNW mathias.schindler@fhnw.ch
Michele Zehnder, CTA AG michele.zehnder@cta.ch
Kanchan Bohara, SPF, OST kanchan.bohara@ost.ch
Michel Y. Haller, SPF, OST michel.haller@ost.ch
Ralph Eismann, INEB, FHNW ralph.eismann@fhnw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Carina Alles, carina.alles@bfe.admin.ch
Stephan Renz, info@renzconsulting.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502088-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Projekt HpCosy wurde die Basis für ein dezentrales Sole-Wasser-Wärmepumpensystem für Wohnungen in Mehrfamilienhäusern entwickelt und untersucht. Das System umfasst die Funktionen Heizen, Kühlen und Warmwasserbereitung. Eine gezielte Steuerung der Wärmepumpen soll es ermöglichen, die Verfügbarkeit von vor Ort erzeugtem Photovoltaikstrom für die Einheit im Schwarm aller Wärmepumpen im Gebäude zu berücksichtigen. Die Untersuchung wurde an einem konkreten Beispiel eines dreistöckigen Mehrfamilienhauses mit sechs Wohnungen mit unterschiedlicher Nutzung durchgeführt.

Der Vergleich zwischen einem zentralen und mehreren dezentralen Wärmepumpensystemen zeigt deutlich die grossen Vorteile der dezentralen Lösung (Einsparungen im Bereich von 30% der elektrischen Energie). Der grösste Teil der eingesparten Energie ist dabei auf den Wegfall der Warmwasserzirkulation und die damit verbundenen hohen Temperaturanforderungen zurückzuführen.

Die Messung einer HpCosy-Anlage unter realistischen und dynamischen Arbeitsbedingungen hat gezeigt, dass eine individuelle Anpassung der Steuerung eines einzelnen Schwarmteilnehmers auf ein Schwarmsignal technisch machbar ist, und es für das ausgewählte und getestete Wochenprofil zu einer Reduzierung des Netzverbrauchs führt.

Die abschliessenden Simulationen des Gesamtsystems zeigen, dass - zusätzlich zu den Einsparungen durch den Einsatz dezentraler Systeme - eine Erhöhung des Eigenverbrauchs um 11% bis 17% und eine zusätzliche Reduktion des Netzverbrauchs von bis zu 5% mit einem Führungssignal, dem Schwarm-Signal, erreicht werden kann, welches anzeigt, inwiefern vor Ort mehr Energie produziert als konsumiert wird.

Das Marktpotenzial des HpCosy Systems ist vorhanden. Die nötigen Massnahmen für eine Umrüstung sind bekannt, und die Geräte sind am Markt erhältlich. Bei der Nutzerakzeptanz ist die Wartungsintervention im Wohnungsbereich und der Platzbedarf ein Thema. Als Vorteil wird die individuelle Abrechnungsmöglichkeit gesehen.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit muss ein Vollkosten-Rechnungsvergleich zwischen zentraler und dezentraler Lösung über eine angenommene Nutzungsdauer geführt werden, um Investitions- und bedarfsgebundene Kosten, wie Energiekosten gemeinsam erfassen zu können.

Take-home messages

- Dezentrale Wärmebereitungssysteme für Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitung im Mehrfamilienhaus zeigen deutliche energetische Vorteile gegenüber einem zentralen System. Im simulierten Gebäude mit drei Stockwerken und sechs Wohnungen führte die dezentrale Lösung zu insgesamt 28% weniger Stromverbrauch. Massgebend dafür ist die Einsparung der Trinkwarmwasser-Zirkulation.
- Nutzung von Überschussstrom führt zu Effizienzeinbussen. Ökonomisch ist dies nur sinnvoll, wenn das Verhältnis aus entgangener Einspeisung zu eingespartem Netzbezug kleiner ist als das Verhältnis aus Bezugstarif zu Einspeisetarif.
- Ein Eingriff in die Raumwärmeregulierung zum Austarieren der elektrischen Energieflüsse am Netzanschlusspunkt bietet ein grosses energetisches Potential mit relativ kleinen Effizienzeinbussen. Beim Eingriff in die Warmwasserregelung ist die nutzbare Kapazität des Speichers entscheidend.
- Die Verteilung der Quelle für Wärmepumpen im Unterschied zur Verteilung von Nutzwärme ist eine zukunftsfähige Lösung. Als Quellen dienen nebst den Erdwärmesonden, Fliess- und See-gewässern auch Anergienetze.



Résumé

Le projet HpCosy a permis de développer et d'étudier la base d'un système décentralisé de pompes à chaleur eau glycolée/eau pour les appartements dans les immeubles collectifs. Le système comprend les fonctions de chauffage, de refroidissement et de production d'eau chaude. Une commande ciblée des pompes à chaleur doit permettre de tenir compte de la disponibilité de l'électricité photovoltaïque produite sur place pour l'unité dans l'essaim de toutes les pompes à chaleur du bâtiment. L'étude a été menée sur un exemple concret d'un immeuble collectif de trois étages comprenant six appartements à usage différent.

La comparaison entre un système de pompe à chaleur centralisé et plusieurs systèmes décentralisés montre clairement les grands avantages de la solution décentralisée (économies pouvant atteindre environ 30% de l'énergie électrique). La plus grande partie de l'énergie économisée est ici due à la suppression de la circulation de l'eau chaude et des exigences de température élevées qui y sont liées.

La mesure d'une installation HpCosy dans des conditions de travail réalistes et dynamiques a montré qu'une adaptation individuelle de la commande d'un seul participant à l'essaim à un signal d'essaim est techniquement réalisable et qu'elle conduit à une réduction de la consommation du réseau pour le profil hebdomadaire choisi et testé.

Les simulations finales de l'ensemble du système montrent que - en plus des économies réalisées grâce à l'utilisation de systèmes décentralisés - une augmentation de la consommation propre de 11% à 17% et une réduction supplémentaire de la consommation du réseau pouvant atteindre 5% peuvent être obtenues avec un signal de guidage, le signal d'essaimage, qui indique dans quelle mesure plus d'énergie est produite sur place que consommée.

Le potentiel commercial du système HpCosy existe. Les mesures nécessaires à l'adaptation sont connues et les appareils sont disponibles sur le marché. En ce qui concerne l'acceptation par les utilisateurs, l'intervention de maintenance dans les logements et l'encombrement sont des sujets de préoccupation. La possibilité de facturation individuelle est considérée comme un avantage.

En ce qui concerne la rentabilité, il convient de comparer les coûts complets des solutions centralisées et décentralisées sur une durée d'utilisation supposée, afin de pouvoir prendre en compte les coûts d'investissement et les coûts liés aux besoins, comme les coûts énergétiques.

Messages à emporter

- Les systèmes décentralisés de production de chaleur pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire dans les immeubles collectifs présentent des avantages énergétiques significatifs par rapport à un système centralisé. Dans le bâtiment simulé de trois étages et six appartements, la solution décentralisée a permis de réduire la consommation d'électricité de 28% au total. L'économie réalisée sur la circulation de l'eau chaude sanitaire est déterminante pour ce résultat.
- L'utilisation de courant excédentaire entraîne des pertes d'efficacité. D'un point de vue économique, cela n'a de sens que si le rapport entre l'injection manquée et l'achat économisé sur le réseau est inférieur au rapport entre le tarif d'achat et le tarif d'injection.
- Une intervention dans la régulation du chauffage des locaux pour équilibrer les flux d'énergie électrique au point de raccordement au réseau offre un grand potentiel énergétique avec des pertes d'efficacité relativement faibles. Lors de l'intervention dans la régulation de l'eau chaude, la capacité utilisable du réservoir est déterminante.
- La distribution de la source pour les pompes à chaleur, par opposition à la distribution de la chaleur utile, est une solution d'avenir. Outre les sondes géothermiques, les cours d'eau et les lacs, les réseaux d'anergie servent de sources.



Summary

In the HpCosy project, the basis for a decentralised brine-to-water heat pump system for flats in apartment buildings was developed and investigated. The system includes the functions of heating, cooling and hot water production. Targeted control of the heat pumps should make it possible to take into account the availability of locally generated photovoltaic electricity for the unit in the swarm of all heat pumps in the building. The study was carried out on a concrete example of a three-storey apartment building with six flats with different uses.

The comparison between a centralised and several decentralised heat pump systems clearly shows the great advantages of the decentralised solution (savings in the range of 30% of the electrical energy). Most of the saved energy is due to the elimination of hot water circulation and the associated high temperature requirements.

The measurement of an HpCosy system under realistic and dynamic working conditions has shown that an individual adaptation of the control of a single swarm participant to a swarm signal is technically feasible, and it leads to a reduction of the grid consumption for the selected and tested weekly profile.

The final simulations of the overall system show that - in addition to the savings from the use of decentralised systems - an increase in self-consumption of 11% to 17% and an additional reduction in grid consumption of up to 5% can be achieved with a command signal, the swarm signal, which indicates the extent to which more energy is being produced on site than is being consumed.

The market potential of the HpCosy system exists. The necessary measures for a conversion are known and the devices are available on the market. In terms of user acceptance, the maintenance intervention in the residential area and the space requirement are an issue. The individual billing option is seen as an advantage.

Regarding economic aspects, a full-cost calculation comparison between centralised and decentralised solutions must be carried out over an assumed operating time in order to be able to evaluate investment and demand-related costs, such as energy costs, together.

Take-home messages

- Decentralised heating systems for space heating and domestic hot water preparation in apartment buildings show clear energy advantages over a centralised system. In the simulated building with three floors and six flats, the decentralised solution led to a total of 28% less electricity consumption. The main reason for this is the reduction in hot water circulation.
- The use of excess electricity leads to efficiency losses. Economically, this only makes sense if the ratio of lost feed-in to saved grid consumption is smaller than the ratio of purchase tariff to feed-in tariff.
- Intervening in the space heating control to balance the electrical energy flows at the grid connection point offers great energy potential with relatively small efficiency losses. When intervening in the hot water control, the usable capacity of the storage tank is decisive.
- The distribution of the source for heat pumps as opposed to the distribution of useful heat is a sustainable solution. In addition to geothermal probes, watercourses and lakes, energy grids also serve as sources.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Take-home messages	3
Résumé	4
Messages à emporter	4
Summary	5
Take-home messages	5
Inhaltsverzeichnis	6
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	10
1.2 Motivation des Projektes	10
1.3 Projektumfeld.....	13
1.3.1 Projektpartner	13
1.3.2 Projekte im Themenfeld.....	13
1.4 Projektziele	16
1.5 Erwartete Ergebnisse	16
1.6 Vorgehen und Methode	17
2 Marktanalyse	19
2.1 Gebäude-Potenzial der Schweiz	20
2.1.1 Geeignete Gebäude	20
2.1.2 Grundlegende Datenbasis BFS.....	21
2.1.3 Anzahl Wohneinheiten und Stockwerke in den Gebäuden	22
2.1.4 Durchschnittliche Wohnflächen und Anzahl Personen pro Wohnung.....	23
2.1.5 Bestandsgebäude mit Potenzial im Jahr 2022	24
2.1.6 Gebäudebestand Wärmeerzeuger und Energieträger	25
2.2 Quellen Potenzial	26
2.2.1 Geothermisches Potenzial der Schweiz.....	26
2.2.2 Nutzung von Erdwärmesonden	26
2.2.3 Geothermische Rahmenbedingungen zur Nutzung von Erdwärmesonden.....	27
2.2.4 EWS Nutzung als Beispiel im Kanton Zürich	28
2.2.5 EWS Nutzung und Wasserfassung mit Wärmenutzung in Zürich.....	30
2.2.6 EWS Nutzung in weiteren Kantonen (Auswahl).....	31
2.3 Erkenntnisse aus anderen Projekten	32
2.3.1 Gängige Wärmepumpensysteme für Heizung und Warmwasser in MFH	32
2.3.2 Durchgeführte Simulationen und Messungen	33
2.4 Am Markt erhältliche Wärmepumpen/Speichersysteme	34



2.4.1	Leistungsregelung	34
2.4.2	Kommunikation	34
2.4.3	Produktvergleich und Zusammenstellung	35
2.5	Marktfähigkeit	40
2.5.1	Technische Umsetzung	40
2.5.2	Wirtschaftliche Beurteilung, Kostenermittlung und -vergleich nach VDI 2067	41
2.5.3	Investitionskosten	42
2.6	Zusammenfassung Marktanalyse	43
3	Simulationen	44
3.1	Rahmenbedingungen Klima und Last	44
3.1.1	Wetterdaten	44
3.1.2	Gebäude	45
3.1.3	Nutzerprofile	46
3.1.4	Wärmebedarf	48
3.1.5	Key Performance Indicators und Begriffserklärung	49
3.2	Vergleich zentrale und dezentrale WP-Einheit	49
3.2.1	Zentrales Wärmepumpensystem	49
3.2.2	Dezentrale Wärmepumpeneinheiten	54
3.2.3	Wärmeverluste	55
3.2.4	Effizienz der Wärmepumpe	57
3.2.5	Resultate	59
3.2.6	Diskussion des Vergleichs zentral vs. dezentral	65
3.3	Simulationen der dezentralen Systeme	67
3.3.1	Übersicht	67
3.3.2	PV und Haushaltsstrom	68
3.3.3	Bedarfsgeregelte dezentrale Systeme	69
4	Regelungsstrategien	73
4.1	Bedarfsorientierte Regelung	73
4.2	Regelung im Schwarm	73
4.2.1	Schwarmsignal	73
4.2.2	Zustand der Schwarmteilnehmer	73
4.2.3	Aktionen	74
4.3	Dezentrale Systeme im Schwarm	75
4.4	Dezentrale Systeme im Schwarm mit Anpassung der TWW-Strategie	78
4.5	Diskussion Schwarmregelung	82
4.5.1	Komforteinbussen durch die Schwarmregelung	82
4.5.2	Belastung der Kompressoren	85
4.5.3	Potential Kühlung	87
4.5.4	Ökonomische Beurteilung	90



4.5.5	Zentrale Einheit zur Ausgabe des Schwarmsignals	90
4.5.6	Auslösung der TWW-Bereitung	91
5	Experimentelle Untersuchungen	92
5.1	Aufbau im Prüfstand	92
5.1.1	Simulation/Emulation und "Hardware in the Loop" (HIL).....	93
5.1.2	Simulations- und Emulationstechnik	95
5.1.3	Instrumentierung der Test-Wärmepumpe	96
5.1.4	Vorbereitungen zur HIL-Messung	97
5.1.5	Visualisierung	97
5.1.6	Untersuchte Hardware-Komponenten	98
5.1.7	Messung des Schichtungsverhaltens des TWW-Speichers.....	100
5.2	Messdatenerfassung zur Parametrisierung der Simulationsmodelle	101
5.2.1	7-Tage-Test Speicherladung und TWW-Zapfungen gemäss EN 16147:2017	101
5.2.2	Heizen stationär EN 14511:2018	106
5.2.3	Warmwasser, Raumheizung bedarfsgeregelt (ohne Schwarmsignal)	106
5.2.4	Warmwasser, Raumheizung, Erhöhung Eigenverbrauch mit Schwarm-Steuerung	107
5.2.5	Grafische Vergleiche der Messungen 007 und 011	108
5.3	Zusammenfassung experimentelle Untersuchungen	114
6	Einordnung der Simulationsresultate der bedarfsgeregelten Systeme	115
7	Schlussfolgerungen	117
8	Ausblick.....	120
8.1	Dezentrale Systeme im Schwarm	120
8.2	Sonstiges	120
9	Bericht Aktivitäten IEA HPT Annexe	121
9.1	Mitwirkung bei der Formulierung des Annex 55	121
9.2	Weitere Annexe und Annex Proposals (Stand März 2023).....	121
9.2.1	Comfort and Climate Box solutions for warm and humid climates.....	121
9.2.2	Annex 62: Heat pumps for multi-family residential buildings in cities.....	121
10	Publikationen	122
10.1	28. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik», Burgdorf, 22.06.2022.....	122
10.2	Eurosun Kassel, 26.-29.09.2022	122
10.3	Energie- Apéro Beider Basel, 17.11.2022.....	122
10.4	14th IEA Heat Pump Conference, 15.-18. Mai 2023	122
10.5	29. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik», Burgdorf, 14.06.2023.....	122
11	Verzeichnisse.....	123
11.1	Abbildungen.....	123



11.2	Tabellen.....	126
11.3	Literatur.....	127
	Anhang A Potenzialuntersuchung.....	131
	Anhang B Am Markt erhältliche Geräte	140
	Anhang C Randbedingungen Gebäudesimulation	141
	Anhang D Leitungslängen im zentralen Heizsystem.....	143
	Anhang E Berechnungen des Wärmeabgabesystems.....	144
	Anhang F Vergleichsmessung Heizen	146
	Anhang G Abgleich der Laborsimulation	148
	Anhang H Messgeräte.....	150

Abkürzungsverzeichnis

BFS	Bundesamt für Statistik
COP	Coefficient of Performance
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EG	Erdgeschoss
EVG	Eigenverbrauchsgemeinschaft
HH	Haushaltsstrom
LCA	Life Cycle Assessment
MFH	Mehrfamilienhaus
OG	Obergeschoss
PV	Photovoltaik
PVA	Photovoltaik Anlage
RH	Raumheizung
SGR	Smart Grid Ready
TMY	Typical Meteorological Year
TWW	Trinkwarmwasser
WP	Wärmepumpe
ZEV	Zusammenschluss zum Eigenverbrauch



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Wärmepumpen sind eine Schlüsseltechnologie für die Versorgung von Gebäuden mit Warmwasser und Raumwärme. Sie werden eine tragende Rolle in einer Energiewende spielen, in der die geographische Verteilung von Energieträgern zunehmend auf der Basis von elektrischer Energie vollzogen wird.

Die Wärme zur Bereitstellung von Warmwasser wird gegenüber der Wärme für das Heizen auf Grund der zunehmend besseren Gebäudedämmungen mehr Gewicht bekommen. Kühlanwendungen werden infolge gesteigerter Komfortansprüche und nicht zuletzt auch durch den fortschreitenden Klimawandel vermehrt realisiert werden. Dabei ist es naheliegend, im Sommer sowohl Kälte wie auch Wärme für die Warmwasserbereitung mit derselben Wärmepumpe zu erzeugen, und diese mit dem selbsterzeugten PV-Strom zu betreiben.

1.2 Motivation des Projektes

Mit Blick auf diese Entwicklung liegen die Herausforderungen des Systemanbieters heute nicht mehr nur im Design und Bau eines Wärmepumpen-Kreislaufs, sondern zunehmend in der Systemintegration und Regelung.

Gefragt sind kompakte Systemlösungen, die in der Lage sind, Wärme und gegebenenfalls auch Kälte zur Verfügung zu stellen und dabei gleichzeitig flexibel auf das Angebot von Photovoltaikstrom oder auf tarifliche Anreize zur Lastverschiebung (Demand Side Management) reagieren zu können. Grundlage dazu ist eine intelligente Regelstrategie, die neben dem aktuellen Bedarf auch den Zustand der Energiespeicher, der Raumtemperaturen, das Nutzerverhalten und die zur Verfügung stehende Leistung sowie die temperaturabhängige Effizienz des Wärmeerzeugers berücksichtigt.

Produkte mit dieser gewünschten Flexibilität sind bereits auf dem Markt: Wärmepumpensysteme in Kombination mit Speichermöglichkeiten, deren Regelung aber meist auf einen möglichst hohen Eigenverbrauch von Eigenstrom aus PV ausgelegt ist. Diese Fixierung einzig auf den Eigenverbrauch als Zielgrösse führt aber nicht selten zu ineffizienten Systemen.

Zusätzlich kann der vermehrte Einsatz solcher Lösungen zu einer Belastung für das Stromnetz werden, wenn die Regelung dieser Systeme untereinander nicht koordiniert wird. Während die Wärmepumpe bei Einfamilienhäusern sowohl bei Neubau als auch bei der Sanierung mittlerweile an erster Stelle steht, werden in Mehrfamilienhäusern immer noch viel zu häufig fossile Energieträger eingesetzt.

Dies sowohl im Neubau als auch, in noch grösserem Ausmass, beim Ersatz der Heizung. Für die bessere Akzeptanz und Verbreitung von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern sind neue Lösungen gefragt, die auf die individuellen Bedürfnisse der Kunden (sowohl Liegenschaftsverwalter als auch Stockwerkeigentümer) zugeschnitten sind. Idealerweise bieten neue Konzepte auch Lösungen für die sich abzeichnende zunehmende Nachfrage nach Kühlung und nach Eigenverbrauch von PV-Strom.

Letzteres ist insbesondere dann eine Herausforderung, wenn es innerhalb von sogenannten Zusammenschlüssen zum Eigenverbrauch (ZEV) erfolgen soll.

Dezentrale Wärmepumpenanlagen in MFH mit Einzelgeräten pro Wohneinheit können gegenüber einer zentralen Wärmepumpe in diesem Kontext entscheidende Vorteile bieten. Die möglichen Nachteile werden ebenfalls nachfolgend aufgeführt.



Vorteile:

- Es braucht **keine Warmwasser-Zirkulation** zur Warmhaltung der Leitungen, was zu einer wesentlichen Erhöhung der Effizienz des Warmwassersystems (geschätzt bis 30%) führt. Dies ist insbesondere unter Berücksichtigung des zunehmenden Anteils der Warmwasserbereitung am Gesamtenergieaufwand ein entscheidender Vorteil.

Gründe für diese Effizienzsteigerung sind:

- o Die **benötigte Wärme** für die Warmwasserbereitung kann je nach Objekt und Technik auf Grund der wegfallenden Zirkulationsverluste reduziert werden. Gemäss Vetsch et. al. (2012) beträgt der Energieaufwand zur Warmhaltung des Brauchwarmwassers im Verteilnetz ca. 17 % der gesamten elektrischen Energie der Bereitung bei Zirkulationssystemen, bzw. 27 % bei Begleitheiz-Systemen.
 - o Die aus hygienischen Gründen **geforderte Temperatur im Speicher** zum Erreichen von 50 °C an den Zapfstellen ist **deutlich geringer** als bei Systemen mit Zirkulation, wo die Zirkulationsleitungen im Standardfall auf 60/55 °C (Vorlauf/Rücklauf) gehalten werden müssen (55/52 °C im in der SIA 385/1 (SIA 2020) möglichen Idealfall).
 - o Bei zentralen Wärmepumpenanlagen führt die Einschichtung des Zirkulationsrücklaufs in den Speicher zu erheblichen Exergieverlusten, was wiederum zu im Mittel höheren Temperaturen der Wärmepumpen bei der Beladung führt. Bei dezentralen WW-Speichern **kann die thermische Schichtung deshalb besser erhalten werden**, mit entsprechend positivem Effekt auf die Arbeitszahl.
- Bei dezentralen Einheiten kann die Produktion und Verteilung von Raumwärme (und Raumkälte) auf das Bedürfnis der Einzelwohnung eingestellt werden. Auf Grund unterschiedlicher Wärmeverluste einzelner Wohnungen (z. Bsp. Dach- und Eckwohnungen vs. Mittelwohnungen) und auf Grund der unterschiedlichen Verhaltensweisen und Bedürfnissen der Bewohner kann dies bedeuten, **dass einzelne Wohnungseinheiten mit deutlich tieferen Einstellungen für die Heizgrenze und die Heizkurve betrieben werden** als andere. Im Gegensatz dazu orientieren sich diese Einstellungen bei zentralen Einheiten immer an den Anforderungen der "ungünstigsten" Wohnung, respektive des anspruchsvollsten Bewohners. Dies führt dazu, dass in zentralen Einheiten die Heizgrenze meist bei 18 °C eingestellt wird, obwohl für die meisten Wohnungen 14 °C ausreichend wären, und dass die Vorlauftemperaturen um 5 -10 K höher liegen als für die meisten Wohnungen nötig wäre. Eine um 10 K tieferen Vorlauftemperatur führt zu 20-30% besserer Arbeitszahl, respektive entsprechend weniger elektrischem Energieaufwand. Dieses Potenzial zur Erhöhung der Systemeffizienz kann nur gehoben werden durch dezentrale WP-Einheiten die einzeln eingestellt werden können.
 - Auf Grund der wegfallenden Verteilverluste für Raumwärme und weniger Problemen durch mangelhaften hydraulischen Abgleich können **zusätzlich und generell tiefere Vorlauftemperaturen** gefahren werden.
 - Auf Grund der kleineren Wärme- und Kälteleistung pro Einheit im Vergleich zu einer grösseren zentralen Wärmepumpe, die sich auch in der elektrischen Leistungsaufnahme niederschlägt, kann die **Leistungsaufnahme** eines Schwarms dezentraler **Wärmepumpen viel besser an die Angebotskurven von PV-Solarstrom vom eigenen Dach angepasst werden**. Voraussetzung dafür ist ein geeignetes Kommunikationssystem und eine geeignete Schwarm-Regelung. Die Möglichkeiten zur PV-Eigenstromnutzung nehmen dabei noch zu, je mehr auch eine Kälteproduktion durch die Wärmepumpen vorgesehen ist.
 - Für Gebäude ohne zentrale Wärmeerzeugung ist die Installation pro Wohneinheit ein Vorteil, da sie näher am bestehenden Konzept ist.
 - Bei Kombination mit Erdsonden als Wärmequelle und Wärmesenken kann erwartet werden, dass das System sowohl energetisch als auch ökonomisch betrachtet grosse Vorteile aufweist.



- Einfache, individuelle Abrechnung über Strom und Wasserverbrauch
- Mit Blick auf die Umstellung von Propan als Kältemittel ist eine Aufteilung auf mehrere, kleinere Geräte mit einer Füllmenge <150g sicherheitstechnisch ein Vorteil gegenüber einer Anlage mit grosser Füllmenge.

Mögliche Nachteile:

- Bei Luft als Wärmequelle erweist sich ein zusätzlicher Wärmetauscher zwischen dem Kältemittel der dezentralen Wärmepumpen und der Wärmequelle / Wärmesenke als Nachteil (Luft -> Sole -> Kältemittel anstatt Luft -> Kältemittel). Dies würde einen Teil der Effizienzgewinne des Systems im Falle von Luft als Wärmequelle kompensieren.
- Für den Heizungsersatz in Mehrfamilienhäusern mit zentraler Wärmeenergieerzeugung kann sich die Änderung des Konzeptes auf dezentrale Einheiten als Hürde erweisen, da das Konzept für Heizung, Warmwasserbereitung und damit der Leitungsführung grundlegend geändert wird.
- Weitere mögliche Nachteile: Die Kosten mehrerer Geräte im Vergleich zu einem Gerät, die Installation und Wartung in den Wohnungen

Herausforderungen:

Kompakte Wärmepumpen-Geräte für Wohneinheiten mit integrierten Speichern enthalten häufig Warmwasser-Speicher mit 150 – 300 Litern Inhalt und evtl. zusätzlich Pufferspeicher mit einem Volumen zwischen 50 und 200 Litern. Die zentrale Herausforderung für ein solches energieeffizientes und einfach zu installierendes Wärmepumpen-Heizgerät sind ein möglichst kleines Bauvolumen, eine hinreichend hohe WW-Schüttleistung und eine möglichst hohe Energieeffizienz. Die Kombination aus "Flexibilität", "Kompaktheit" und "einfacher Installation" führt zu einem Zielkonflikt.

In Bezug auf die Warmwasser-Bereitung zeigt sich dieser Zielkonflikt am begrenzten Warmwasser-Speichervolumen:

- Eine hinreichend grosse Wärmeübertragerfläche für eine schnelle WW-Aufladung auf die geforderten WW-Temperaturen in einem kleinen Speichervolumen integrieren zu können.
- Eine möglichst hohe Effizienz der WW-Bereitung zu gewährleisten in Bezug auf die Stufenladung mit einer weitgehenden geschichteten Entladung des WW-Speichers und anschliessender, vollständiger Durchladung.
- Die Möglichkeit, den Ladezeitpunkt bei gleichzeitiger Gewährleistung des nötigen Komforts mit einem kleinen Speichervolumen flexibel zu gestalten.

Die Wahl des WW-Ladezeitpunkts kann sich dabei nach verfügbarem PV-Strom (MFH-Eigenverbrauchsgemeinschaft) richten oder nach einem variablen Stromtarif des Stromversorgers. Bei der Eigenstromnutzung durch dezentrale WP-Systeme im Mehrfamilienhaus ist dabei eine koordinierte "Schwarm" Regelung nötig, um den optimalen Effekt zu erzielen (gestaffelte Ladung, wenn die PV-Leistung nicht für eine zeitgleiche Beladung aller Speicher ausreicht, oder zur Begrenzung der Spitzen-Bezugsleistung bei leistungsabhängigen Abrechnungen). Auch Kühlfunktionen können mit der Verfügbarkeit von PV-Strom verknüpft werden, so dass durch ein "smart swarm cooling" nicht nur der Komfort steigt, sondern auch die Rentabilität der eigenen PV-Anlage (PVA).



1.3 Projektumfeld

1.3.1 Projektpartner

Mit den Projektpartnern zusammen wurden die Regelstrategien und Simulationsmodelle erarbeitet, der Messaufbau im Labor konzipiert, die Messresultate und Ergebnisse der Simulationen auf Aussagefähigkeit und Praxisbezug hin geprüft.

CTA AG, Münsingen

Als führende Schweizer Herstellerin von Wärmepumpen engagiert sich die CTA AG bei der Weiterentwicklung von effizienten Systemlösungen. Das unabhängige, familiengeführte Unternehmen mit über 200 Mitarbeitenden hat langjährige Erfahrungen in der Entwicklung und Produktion von innovativen Wärmepumpensystemen.

Die Firma CTA AG stellte die Wärmepumpe Optiheat Inverta TWW für die Labormessungen zur Verfügung und unterstützte bei der Inbetriebnahme, Reglereinstellung, Messung und Auswertung.

Elektrizitätswerk Jona-Rapperswil AG

Die Elektrizitätswerk Jona-Rapperswil AG (EWJR) ist ein privatrechtlich organisiertes Unternehmen, welches das Gebiet Rapperswil-Jona mit elektrischer Energie versorgt. Zudem bietet die EWJR, zusammen mit ihren Tochterfirmen, ein umfassendes Dienstleistungsangebot im Bereich Energie an.

1.3.2 Projekte im Themenfeld

Die TCP's (Technology Collaboration Programme) HPT (Heat Pumping Technologies) und ECES (Energy Conservation through Energy Storage) der Internationalen Energieagentur (IEA) haben einen gemeinsamen Annex 55 mit dem Titel "Comfort and Climate Box (CCB)" lanciert, an dessen Formulierung die Projektteams des SPF und des INEB massgeblich beteiligt waren. Das Ziel der gemeinsamen Arbeit von Wärmepumpen- und Speicherexperten ist die Entwicklung und Verbreitung von Wissen, die Bewertung von Prototypen und die Koordinierung von Feldversuchen zur Einbeziehung von CCBs in bestehende Gebäude. Dies ist das erste Projekt im Rahmen der Mission Innovation Challenge #7 «Affordable Heating and Cooling of Buildings». Zu diesem Joint Annex tragen Teilnehmer aus verschiedenen Ländern mit ihren jeweiligen Projekten bei, die sich mit demselben Thema beschäftigen.

Im Projekt **CombiVolt** (<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=37103>) wurden Grundlagen zur Dimensionierung und Einbindung sowohl thermischer als auch elektrochemischer Speicher in PV-Wärmepumpensysteme erarbeitet. Es wurden Regelstrategien zur Erhöhung des Eigenverbrauchs entwickelt. Neben den Simulationen wurden auch Messungen an verschiedenen Systemen durchgeführt, wobei die Bewirtschaftung und Einbindung der Speicher durch die involvierten Hersteller umgesetzt wurde. Auf den Erkenntnissen und Regelstrategien von CombiVolt kann in HpCosy aufgebaut werden. Es kommen nun weitere Forschungsfragen und Entwicklungen dazu wie diejenige der Einbindung von Kühlung sowie die Schwarmregelung in Mehrfamilienhaussystemen.

Im Projekt **OPTEC** - Regelstrategien für die Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden (<https://www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=34166>) wurden Regelstrategien zur Optimierung des Eigenverbrauchs in Gebäuden unter Berücksichtigung der lokalen Produktion aus einer PVA, der Speicherung und des lokalen Verbrauchs im Haushalt untersucht.

Im Fokus lag die thermische Speicherung in der Gebäudemasse nebst der Speicherung im Heizungspufferspeicher oder Warmwasserspeicher über Wärmepumpen. Mit modernen Regelstrategien kann



damit sowohl der Eigenverbrauchs- wie auch der Autarkiegrad verdoppelt werden. Die Eigenverbrauchsoptimierung ist für den Eigentümer finanziell interessant, da die Netzgebühren gespart werden können. Lokale Eigenverbrauchsoptimierung und Stabilisierung des Stromnetzes können mit heutigen Regelmöglichkeiten und den richtigen Regelstrategien erreicht werden.

Im BFE Projekt «Innovative Eigenverbrauchsoptimierung für Mehrfamilien-Arealüberbauungen mit lokaler Strombörse in Möriken-Wildegg» (<https://www.aramis.admin.ch/Beteiligte/?ProjectID=38727>) wurden im Rahmen einer Areal-Überbauung mit vier 3-4 stöckigen Mehrfamilienhäusern ein Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) realisiert und untersucht. Der Betrieb der vier Wärmepumpen für Heizwärme und der jeweils zentralen Warmwasserbereitungen für die 35 Wohnungen, die rund 70 Haushaltgeräte und mehreren Elektromobil-Ladestationen wird automatisch auf die Produktion der PVA abgestimmt. Damit wird der lokale Eigenverbrauchsanteil erhöht und die Netzbelastung reduziert. Eine neuartige Software, welche im Rahmen des Projektes entwickelt wurde, ermöglicht die Abrechnung der Energiekosten für die Bewohner basierend auf einem variablen Stromtarif. Die Bewohner bekommen dadurch einen Anreiz, möglichst viel lokalen Strom zu nutzen. Visualisierungen helfen den Nutzern, die eigenen Verbräuche zu reduzieren, bzw. den Lastbezug auf einen geschickten Zeitraum zu legen.

Im BFE Projekt **LEWASEF** (<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=36117>) wurden Strategien zur Kombination von Wärmepumpen mit Solarenergie untersucht. Für Wärmepumpen gekoppelt mit PV wurden der Einfluss der Nutzungsprofile, Speichergrosse und Regelstrategien auf Eigenstromverbrauch und Netzstrombezug untersucht. Die Testrandbedingungen wurden so gewählt, dass die Auswirkungen den Ursachen zugeordnet und quantifiziert werden können. Auf den Testrandbedingungen und dem Laboraufbau kann aufgebaut werden. Die Umsetzung in vielen einzelnen Einheiten bedeutet eine grosse Verbesserung für das gesamte Netz. Neu ist die Anwendung in Mehrfamilienhäusern mit sehr viel grösseren Möglichkeiten für Demand Side Management und damit von grossem Interesse für das Netz. Im Projekt RegenOpt wurde für die Stadt Zürich das Potenzial zur Erdsondenregeneration mit Free Cooling, Solarkollektoren und anderen Wärmequellen untersucht, je-doch nicht mit aktiver Kühlung. Das Projekt HpCosy wird auf den Modellen und Ergebnissen dieses Projektes aufbauen, und einen Vergleich von passiver (Free Cooling) zu aktiver Kühlung liefern.

In den BFE Projekten **StorEx** (www.spf.ch/storex), BigStrat (www.spf.ch/bigstrat) und DiffStrat (noch nicht veröffentlicht) hat das SPF die thermische Speicherschichtung und deren Effizienz auf Wärmepumpensysteme untersucht. Einbindung und Design des Wärmespeichers werden sich an den Resultaten dieser Projekte orientieren und darauf aufbauen. Insbesondere die Frage des optimalen Warmwassersystems wurde in den erwähnten Projekten noch nicht beantwortet. Das Projekt HpCosy soll hier weitere Erkenntnisse liefern.

Im ANNEX 50 (<https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/>) der Heat Pumping Technologies / Technology Collaboration Programme (HPT TCP) des IEA wurden Lösungen für Wärmepumpen in MFH untersucht.



Heat Pumps in Multi-Family Buildings for Space Heating and DHW

Das übergeordnete Ziel dieses Annexes besteht darin, den Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern zu steigern. Hauptziele sind daher der Nachweis möglicher Energieeinsparungen und die Nutzung erneuerbarer Energien durch Wärmepumpen in mit Wärmepumpen nachgerüsteten Gebäuden ohne Verbesserung der Gebäudehülle.

Auszug Ziele und Fragestellungen (übersetzt aus dem Englischen von der Webseite):

Wie soll der verstärkte Einsatz von Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern gefördert werden

Weiterentwicklung von Wärmepumpensystemen bzw. Wärmepumpenkomponenten für deren Adaption in Mehrfamilienhäusern (skalierbarer Leistungsbereich, Hochtemperaturwärmepumpen, zweistufige Verdichter, Invertertechnik etc.)

Entwicklung und Demonstration von Konzepten zum Einsatz von Wärmepumpen in energetisch sanierten Gebäuden und in Gebäuden ohne verbesserte Gebäudehülle

Demonstration und Überwachung technischer Lösungen (in Prototypen- oder marktreifen Ausführungen)

Identifizierung der relevanten Kriterien für die WP-Komponenten und die Untersuchung, welche Kriterien weder durch marktverfügbare Produkte noch durch laufende Forschungs- und Entwicklungsprojekte abgedeckt werden, um Empfehlungen für den zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf abgeben zu können

Präsentieren von Empfehlungen für optimale Lösungen von (Multi-) Wärmequelle und Betriebsweisen (brennstoffbetrieben, elektrisch betrieben, hybrid) in Abhängigkeit von Gebäudetyp und ökologisch-ökonomischer Situation und Klimazone (Wetter, Auslegungstemperatur)



1.4 Projektziele

Das Hauptziel ist die Entwicklung von Grundlagen für ein neues Wärmepumpensystem für den Markt, Dabei werden folgende Ziele angestrebt:

- Vergleich der Effizienz von zentraler WP-Einheit zu dezentralen WP-Einheiten in Mehrfamilienhäusern mit Berücksichtigung der Wärmeverluste, der Nutzungen und der resultierenden Vorlauftemperaturen für Heizen und TWW-Bereitung.
- Beurteilung der Komforterhöhung durch Anbieten von Free Cooling und/oder WP-Kühlfunktion in Bezug auf den Energieaufwand und die PV-Eigenstromnutzung.
- Prüfung der Flexibilität des HpCosy Systems hinsichtlich der Quellenanbindung, wie EWS, Luft-Wärmetauscher oder anderen Wärmequellen.
- Untersuchung der Berücksichtigung eigener PV-Stromproduktion, insbesondere bei der TWW-Bereitung, Heizung und Kühlung, sowohl als Einzelgerät für Einfamilienhäuser, als auch in der Schwarm-Steuerung im MFH.
Vergl. Photovoltaik Eigenverbrauch (EnergieSchweiz 2022)

Das beschriebene Konzept und seine Eigenschaften machen diesen neuen Ansatz eines MFH WP-Systems zu einem innovativen neuen Konzept mit erhöhter Effizienz, Steigerung des Komforts, und Bedienung von Bedürfnissen des Marktes, deren Zunahme auf Grund der derzeitigen Erkenntnisse hinsichtlich des Komforts und der Energienutzung absehbar ist.

Die Resultate dieses Projektes sollen sowohl in nationalen und internationalen Veranstaltungen präsentiert werden, als auch in eines der IEA-HPT Annexe einfließen. Der sich im Abschluss befindende IEA-HPT Annex 55 "Comfort and Climate Box" wäre thematisch passend. Aus projektkterminlichen Gründen mussten weitere Annexe zur Projektmitwirkung gesucht werden. Eine Mitwirkung am geplanten Nachfolge-Annex mit dem Titel "Comfort and Climate Box for Warm and Humid Climates" wurde besprochen.

1.5 Erwartete Ergebnisse

Als Ergebnis erwarten wir den Nachweis der folgenden Eigenschaften auf simulationstechnischer Basis:

- deutlich höhere Effizienz der vorgeschlagenen System-Lösung im Vergleich zu einer zentralen Standard-Wärmepumpe: Für MFH Neubau (Referenz-MFH des SPF) 30% weniger elektrische Energie für Heizen und Warmwasser.
- deutlich erhöhtem PV-Eigenverbrauch der dezentralen Schwarm-Regelung im MFH im Vergleich zu einer Standard-Wärmepumpenanlage: Für MFH Neubau mit Netto-Null ausgelegter PVA Verdoppelung des Eigenverbrauchs durch das neue System im Vergleich zu einer Standard-Regelung einer zentralen Wärmepumpe für Warmwasser und Raumheizung.
- deutlich erhöhten Komfort im Sommer dank Kühlung.
- flexiblere Nutzung unterschiedlicher Wärmequellen.

Es wird im Labor der Beleg erbracht für die Funktionstüchtigkeit (TRL 3) und einen Versuchsaufbau des Systems im Labor (TRL 4) mit entsprechenden Messergebnissen als Grundlage für eine weiter-gehende Produktentwicklung, welche zum Beispiel in ein Innosuisse Projekt, direkt in eine Produktentwicklung durch den Industriepartner CTA, oder ein Pilot- und Demonstrationsprojekt münden kann.



1.6 Vorgehen und Methode

Das Projektteam, bestehend aus den zwei Fachhochschulen FHNW und HSR (OST), sowie den Industriepartnern CTA und der EWJR haben durch angewandte Forschung und Entwicklung die Grundlagen für ein neues Wärmepumpenprodukt für den Markt entwickelt, welches zugeschnitten ist auf neue die Anforderungen hinsichtlich des Komforts (Kühlen), sowie Eigenstromnutzung mit Berücksichtigung der ZEV-Anwendungen (Zusammenschluss zum Eigenverbrauch).

Das Projekt ist in Phasen und Arbeitspakete (AP) aufgeteilt, wobei das Projektmanagement mit AP1 bezeichnet ist. In einer ersten Phase wird in AP2 das Marktpotenzial analysiert, und es werden dazu passend die Anforderungen an eine dezentrale Wohnungseinheit "HpCosy" oder "Comfort and Climate Box" definiert. Die Definition der Anforderungen beinhaltet die Festlegung der Heiz- und Kühlleistung, die Beantwortung der Frage der Leistungsregelung, sowie die Bestimmung der Grösse des Warmwasserspeichers.

In der zweiten Phase wird

- über Simulationsstudien in AP3 eine optimale Konfiguration der Comfort and Climate Box erarbeitet (Hydraulik, erster Entwurf einer Regelung).
- in AP4 Regelstrategien entwickelt im Hinblick auf eine maximale Effizienz und optimalen Eigenverbrauch.
- in AP5 ein Gerätemuster eines Systems zur Bereitstellung von Warmwasser, Raumwärme und Kälte vom Industriepartner bereitgestellt, im Hardware-in-the-Loop Teststand vermessen, dessen Effizienz bewertet und mit den Simulationsresultaten verglichen.

Quantitative Aussagen werden auf der Basis von Simulationsergebnissen gemacht. Experimente dienen dabei zur Kalibrierung der Modelle.

Schlüsselemente eines effizienten "HP Comfort Systems" werden dabei vertieft analysiert, respektive spezifisch weiterentwickelt. Die Entwicklung der Systeme erfolgt theoriegeleitet.

Optionen der Integration der Warmwasserbereitung in die Comfort Climate Box werden simuliert und bewertet. Ein zentrales Element einer Comfort and Climate Box ist der Energiespeicher (siehe IEA HPT Annex 55). Voraussetzung für hohe Arbeitszahlen von Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Speichern sind einerseits die optimale Speicherschichtung (exergetische Effizienz durch intelligentes Speicher-Design erhöht die Arbeitszahl der Wärmepumpe) sowie ein effizientes Speicher-Lademanagement (Regelung der Leistung und Volumenströme während der Ladung).

Vor- und Nachteile der Frischwassermodultechnik und der Trinkwarmwasser-Speicherung werden gegenübergestellt und eine optimale Lösung erarbeitet, welche sowohl in Bezug auf die Effizienz (Arbeitszahl der Warmwasserbereitung) als auch in Bezug auf Hygiene (Stichwort Legionellen) überzeugen kann.

In AP4 wird die Regelung der Comfort and Climate Box generell, sowie spezifisch zur Erhöhung des PV-Eigenstromverbrauchs entwickelt. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass je nach Verfügbarkeit des PV-Stroms und der Anzahl Wohnungen (respektive CCB-Einheiten) in einem Mehrfamilienhaus die einzelnen Speicher gestaffelt (hintereinander) oder parallel, respektive teil-parallel, geladen werden können. Ziel ist dabei eine maximale Ausnützung des eigenen PV-Stroms innerhalb von Eigenverbrauchsgemeinschaften in Mehrfamilienhäusern, bei gleichzeitiger Gewährung des Komforts. Die aktive Kühlung wird vorerst als Kühlung über Fussbodenheizung entwickelt.

Insbesondere sollte dabei die Möglichkeit der Nutzung von PV-Überschuss für den Kühlbetrieb untersucht werden, wobei wie bereits zur Warmwasserladung eine Kommunikation der einzelnen Systeme bzw. eine Schwarmintelligenz in Kombination mit der Warmwasser-Regelung nötig ist.



In der dritten Phase des Projektes werden die Simulationen aus AP3 mit den Messdaten aus AP5 abgeglichen. Die Erkenntnisse für allfällige Verbesserungen des Produktmusters, hauptsächlich im Bereich der Regler-Programmierung werden implementiert und dabei die Umsetzbarkeit der Empfehlungen geprüft.

Das verfeinerte Simulationssystem von AP3 wurde dann verwendet, um abschliessende Untersuchungen, welche das Potenzial des HpCosy-Systems in Bezug auf Leistung, Komfort, Netzbezug, Autarkie und Verwertung von Eigenstrom (PV-Eigenverbrauchsgemeinschaften) aufzeigen. Diese Resultate werden mit den Zielsetzungen von Abschnitt 1.4 verglichen.

In AP6 sollten die Resultate aus dem Projekt in einen IEA HPT Annex getragen und im internationalen Austausch mit den Teilnehmern des Tasks den Fortschritt der Technik in Bezug auf die Comfort and Climate Boxes verglichen und diskutiert werden. Der thematisch und terminlich passende Annex 62 konnte erst gegen Projektschluss bestimmt werden. Die Mitwirkung steht noch aus.

In AP7 werden Resultate des Projektes national und international präsentiert auf Konferenzen und in öffentlichen Publikationen, sowie an der Wärmepumpentagung des BFE in Burgdorf.



2 Marktanalyse

In diesem Abschnitt wird das Marktpotenzial für dezentrale Wärmepumpenanlagen für Heizung- und TWW-Bereitung mit EWS und weiteren Quellen in MFH analysiert. Auf dieser Grundlage werden die Anforderungen an diese Systeme definiert.

Die Abschätzung des Marktpotentials für die Anwendung erfolgt anhand von statistischen Auswertungen des Gebäudebestands mit Daten des Bundesamtes für Statistik BFS. Diese Basis dient zur Beurteilung des Potentials für Bestandsgebäude, bei denen ein Ersatz der meist fossilen Heizung- und Warmwasserbereitungsanlage in Planung ist, oder eine Modernisierung einer bestehenden zentralen Wärmepumpenanlage ansteht.

Ein weiterer Punkt der Marktanalyse ist die Erfassung des Erdwärmesonden-Potenzials. Hier werden die GIS Systeme der einzelnen Kantone und Städte betrachtet.

Erläutert werden die technische Umsetzung im Neubau, sowie die Umrüstungsschritte im Sanierungsfall, wie die modifizierte Leitungsverlegung und -dämmung.

Die am Markt erhältlichen, geeigneten Wärmepumpen mit Warmwasserspeicher werden in ihrer Leistungsgrösse, Speichervolumen, Schalleistungspegel, Funktionalität und Effizienz kategorisiert. Die Eignung wird anhand der gesetzten Kriterien geprüft.

Die Definition der Anforderungen an die Wärmepumpensysteme beinhaltet die Festlegung der Heiz- und Kühlleistung, die Beantwortung der Frage der Leistungsregelung und der externen Ansteuerbarkeit der Regler, sowie die sinnvolle Grösse des Warmwasserspeichers.

Die Marktanalyse soll die Grundlagen, Daten und Angaben für das zu simulierende Referenzgebäude und der zu untersuchenden Systeme liefern.

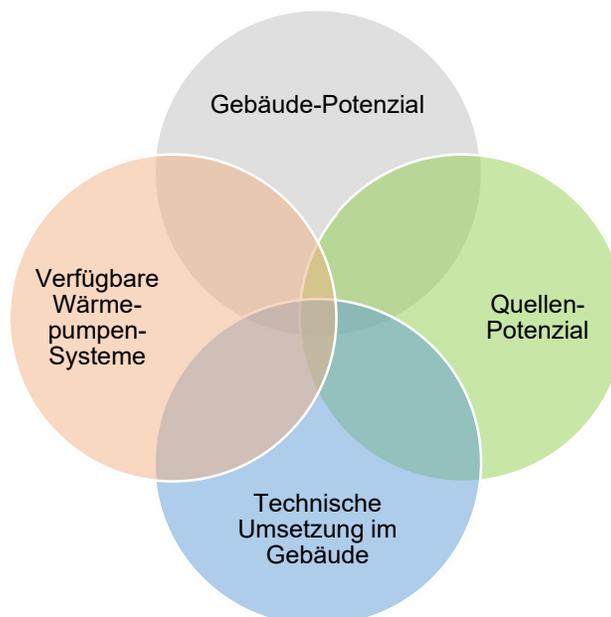


Abbildung 1 Fokusthemen Marktanalyse



2.1 Gebäude-Potenzial der Schweiz

Das Bundesamt für Statistik (BFS) stellt eine umfassende Datenbasis zur Verfügung, die für die Marktanalyse des HpCosy Systems genutzt werden kann.

Das BFS hat verschiedene vorgefertigte Auswertungen des Gebäudedatenbestands je nach Fragestellung bereits definiert und gestaltet. Die nachfolgenden Auswertungen im ersten Teil der Marktanalyse sind gemäss den BFS Vorlagen. Es sind Tabellen mit unterschiedlichen Zusammenzügen und Grafiken zu den einzelnen Tabellen.

Im zweiten Teil der statistischen Betrachtung werden eigene Auswertungen mit demselben Datenbestand durchgeführt.

2.1.1 Geeignete Gebäude

Bei Gebäuden mit Wohnnutzung werden folgende Gebäudekategorien in der BFS Datensammlung unterschieden:

- Reine Wohnnutzung mit Unterkategorien MFH und EFH
- Wohngebäude mit Nebennutzung
- Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung

Als Hauptanwendungsfälle für die HpCosy - Systeme werden kleinere wie auch grössere MFH erachtet. Dabei ist anzunehmen, dass mit je mehr Wohnungen und je mehr Stockwerken, die Systemeffizienz infolge kleinerer Verteil- und Bereitstellungsverlusten steigen wird.

Reihen-EFH oder EFH in kleineren Siedlungen wären für die Anwendung eines dezentralen HpCosy Heiz- und Warmwasserbereitungs-Systems ebenfalls denkbar, wenn sie z.B. eine gemeinsame EWS nutzen, oder wo eine gemeinsame Wärmeerzeuger-Infrastruktur in einer Zentrale vorhanden ist. Diese Reihen-EFH oder EFH in kleineren Siedlungen werden im Folgenden aber nicht genauer untersucht.

Gebäude mit Wohnnutzung der Kategorien Nebennutzung oder mit teilweiser Wohnnutzung nehmen einen Anteil von rund 20% am Gebäudebestand ein. Diese bieten ebenfalls ein Potenzial für das HpCosy System. Es sind Gebäude mit Wohnungen und z.B. Geschäften im Erdgeschoss.

Ziel der Potenzialbestimmung der Gebäude ist die Abschätzung der Zahl der möglichen HpCosy Systeme, bzw. der Wärmepumpeneinheiten.

Bei der Simulation im Kapitel 3 wird ein MFH mit reiner Wohnnutzung betrachtet.



2.1.2 Grundlegende Datenbasis BFS

In diesem Abschnitt wird der Bestand an Gebäuden in der Schweiz grundlegend dargestellt, um ein allgemeines Bild des Gebäudeparks der Schweiz zu vermitteln.

Tabelle 1. Allgemeine Übersicht «Gebäude» 2019 (Bundesamt für Statistik BFS 2020)

	Gebäude mit Wohnnutzung									
	Total	Bauperiode				Mit ... Wohnung(en)				
		vor 1946	1946-1980	1981-2000	2001-2019	1	2	3-5	6-9	10+
Total	1 756 927	535 815	555 323	379 160	286 629	1 128 705	220 850	178 034	135 561	84 285
Reine Wohngebäude	1 476 501	378 165	486 492	340 789	271 055	1 000 700	165 849	132 511	114 104	63 337
Einfamilienhäuser	1 000 700	234 957	322 699	254 168	188 876	1 000 700	*	*	*	*
Mehrfamilienhäuser	475 801	143 208	163 793	86 621	82 179	*	165 849	132 511	114 104	63 337
Wohngebäude mit Nebennutzung	198 289	117 966	44 677	25 722	9 924	81 421	42 806	36 392	18 586	19 084
Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung	82 137	39 684	24 154	12 649	5 650	46 584	12 195	9 131	2 871	1 864
Bauperiode										
vor 1919 erbaut	338 346	338 346	*	*	*	187 212	69 864	60 769	12 178	5 476
1919-1945 erbaut	197 469	197 469	*	*	*	124 056	30 368	27 635	8 984	5 014
1946-1960 erbaut	188 115	*	188 115	*	*	118 703	23 948	16 267	19 103	9 181
1961-1970 erbaut	172 521	*	172 521	*	*	102 446	22 356	12 584	18 877	15 308
1971-1980 erbaut	194 687	*	194 687	*	*	131 043	21 997	11 557	15 638	13 509
1981-1990 erbaut	201 296	*	*	201 296	*	143 607	19 292	13 236	16 070	8 400
1991-2000 erbaut	177 864	*	*	177 864	*	127 164	14 645	12 516	15 476	7 457
2001-2005 erbaut	80 995	*	*	*	80 995	62 944	4 262	4 718	6 213	2 651
2006-2010 erbaut	85 229	*	*	*	85 229	60 034	5 170	6 415	8 495	4 807
2011-2015 erbaut	72 066	*	*	*	72 066	44 874	5 084	6 758	8 204	6 779
2016-2019 erbaut	48 339	*	*	*	48 339	26 622	3 864	5 579	6 323	5 703
Geschosszahl										
1	123 226	29 510	62 864	18 165	12 687	116 315	4 587	734	103	32
2	817 565	225 143	278 362	169 549	144 511	679 240	109 668	23 121	3 120	547
3	540 159	188 881	126 110	141 695	83 473	299 601	92 791	90 322	48 114	6 874
4-5	224 275	75 250	66 975	43 080	38 970	31 454	12 764	58 203	75 536	43 693
6-7	39 676	14 940	14 098	5 112	5 526	1 588	823	5 252	7 960	23 245
8+	12 026	2 091	6 914	1 559	1 462	507	217	402	728	9 894

Stand am 31. Dezember 2019

* Entfällt, weil trivial oder Begriffe nicht anwendbar

Quelle: BFS – GWS

© BFS 2020

In Tabelle 1 ist die fundamentale Zusammensetzung des Gebäudeparks der Schweiz im Jahr 2019 dargestellt. In diesem Jahr befinden sich insgesamt rund 1,76 Mio Gebäude mit Wohnnutzung in der Schweiz.

Davon sind rund 1.48 Mio reine Wohngebäude, aufgeteilt in 1.0 Mio EFH und 0.48 Mio MFH. Von diesen 0.48 Mio MFH besitzen rund 0.25 Mio zwischen 3 und 9 Wohnungen.

Die Zahl der Wohngebäude mit Nebennutzung und mit 3 - 9 Wohnungen ist rund 0.06 Mio.

Eine erste grobe Abschätzung für das HpCosy Systempotential ergibt rund 0.31 Mio Gebäude mit 6 Wohnungen im Schnitt, was somit 1.86 Mio dezentrale Wärmepumpen bedeuten würde. Die Zahl bezieht sich auf MFH und Wohngebäude mit Nebennutzung.

Dies stellt ein erste Überschlagsrechnung dar. In den weiteren Abschnitten wird versucht, diese Zahl etwas genauer und differenzierter auszuweisen.

Statistische Daten zum Gebäudebestand

Tabelle 29 im Anhang zeigt die kantonale Verteilung der Gebäude nach Gebäudekategorie und Kanton.



2.1.3 Anzahl Wohneinheiten und Stockwerke in den Gebäuden

In Abbildung 2 werden die Gebäude kantonale nach prozentualen Anteilen der Anzahl Wohnungen im Gebäude sortiert und dem Schweizer Durchschnitt gegenübergestellt. Zu erkennen sind kantonale Eigenheiten, welche verschiedene Ursachen haben, wie der vorhandene Bauraum, Bauzonen, etc.

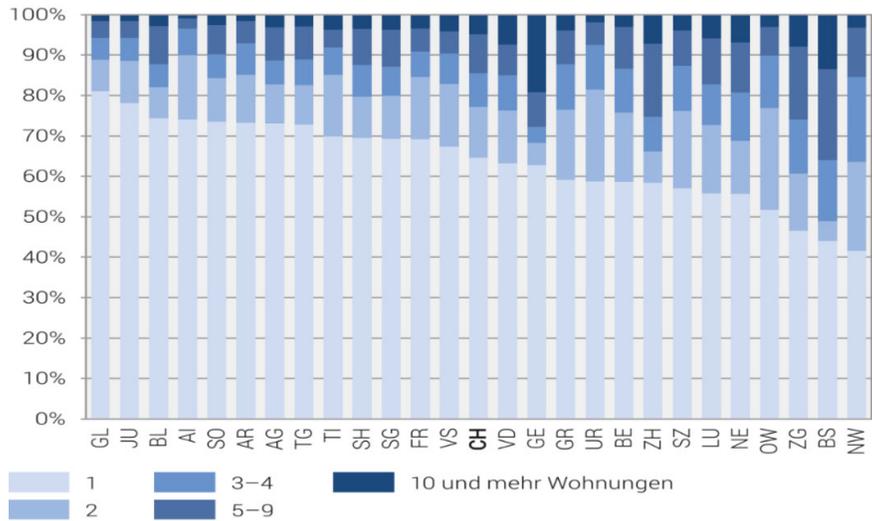


Abbildung 2 Gebäude nach Anzahl Wohnungen im Gebäude (Bundesamt für Statistik BFS 2020)

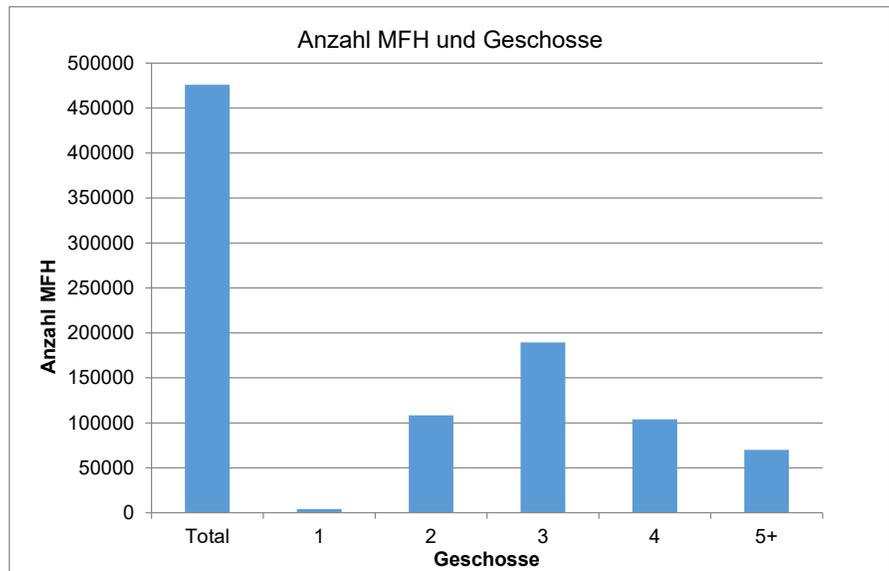


Abbildung 3: Anzahl MFH und Geschosse

Abbildung 3 zeigt die Anzahl der Wohnungen in den MFH. Die Verteilung zeigt eine Hauptmenge bei 3 Geschossen. Die Zahlen stammen von Tabelle 1.



2.1.4 Durchschnittliche Wohnflächen und Anzahl Personen pro Wohnung

Auf Abbildung 4 ist die graphische Repräsentierung der durchschnittlichen Wohnflächen pro bewohnte Wohnung zu sehen. Die Zahlenwerte sind der Tabelle 30 im Anhang entnommen. Der Schweizer Schnitt liegt bei rund 100 m² pro bewohnte Wohnung. Die beiden einwohnerstärksten Kantone Zürich und Bern gehören zu den sechs Kantonen mit der geringsten durchschnittlichen Wohnfläche pro bewohnte Wohnung. (Statistik BFS 2020)

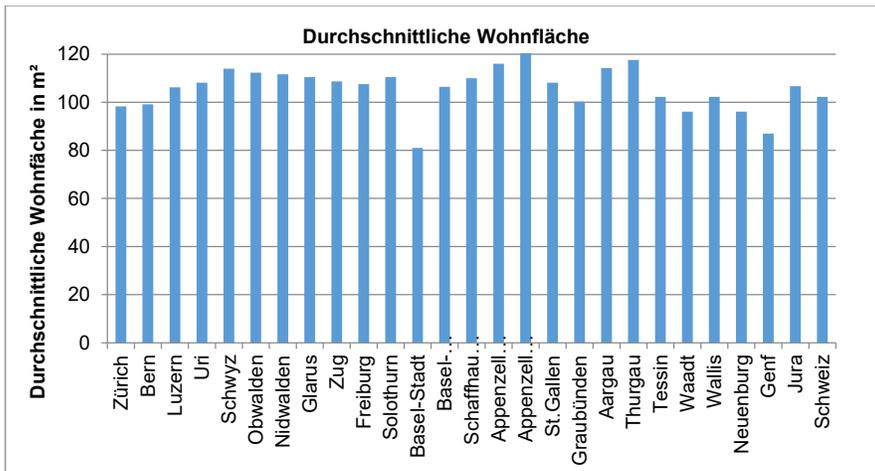


Abbildung 4: Durchschnittliche Wohnfläche

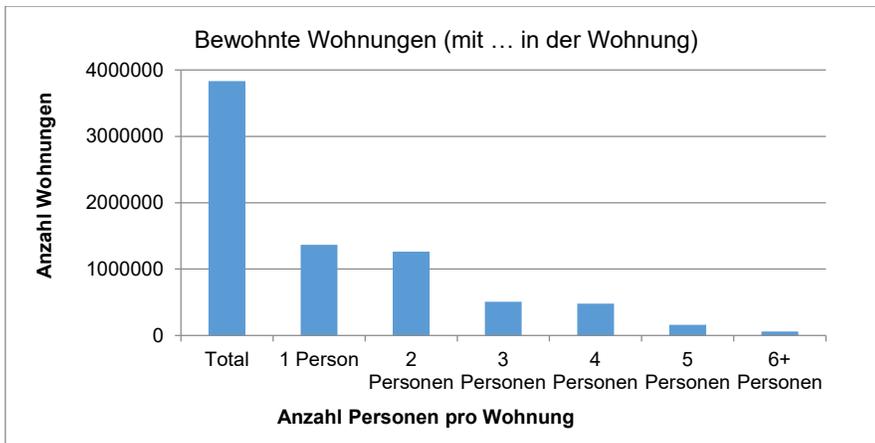


Abbildung 5: Anzahl Wohnungen und Personen

Auf Abbildung 4 ist die graphische Repräsentierung dieser Durchschnittswerte zu sehen. Der Schweizer Schnitt liegt unter vier Personen pro bewohnte Wohnung. Tabelle 31 im Anhang zeigt die durchschnittliche Anzahl Personen pro bewohnte Wohnung detailliert. (Statistik BFS 2020)



2.1.5 Bestandsgebäude mit Potenzial im Jahr 2022

In diesem Abschnitt wird das Alter der Wärmeerzeugung für Heizung und WW-Bereitung als Kriterium zur Abschätzung der Anzahl Gebäude mit Potenzial hinzugezogen.

Gemäss Erfahrungen und Aussagen der Hersteller und Systemlieferanten beträgt die durchschnittliche Lebensdauer von Heizungssystemen 15 bis 20 Jahre. Diese kann je nach Heizungsträger und Gebrauch aber variieren. Mit Reparaturen und Wartungen können die Betriebsdauern unter Umständen auf rund 30 Jahre erhöht werden. Ein grundlegender Ersatz eines Heizungs- bzw. Warmwasserbereitungssystems wird oft erst nach Erreichen der absolut maximalen Lebensdauer nach mehrmaligen Reparaturen durchgeführt.

Die MFH erhielten in den Jahren 1950-1960 in aller Regel Kombikessel und Ölfeuerungen. Diese wurden beispielsweise in den Jahren 1980-1990 mit neuen Brennern aufgerüstet. 30 Jahre später, also jetzt, müssten somit eine grössere Zahl an Anlagen wiederum einen Ersatz, oder einen Systemwechsel benötigen. Man erkennt eine deutliche Zunahme an Wärmepumpen-Verkäufen auch im höheren Leistungsbereich, was auf den Wärmeerzeugereinsatz bei MFH hindeutet.

Bei der Potenzialbeurteilung für die Gebäude im Jahr 2022 wird die Annahme getroffen, dass der anstehende Wärmeerzeugerersatz mit diesem 30 Jahre Rhythmus einhergeht und so eine Anzahl Gebäude, welche kurz vor einer Umrüstung stehen, zumindest abgeschätzt werden kann.

Tabelle 2 Anzahl Gebäude gebaut vor 1990 nach Wohnungs- und Geschoszahl (Bundesamt für Statistik BFS 2020)

Anzahl Wohnungen pro Gebäude	Anzahl Geschosse pro Gebäude											Anzahl Gebäude mit >1 Geschossen
	1 G.	2 G.	3 G.	4 G.	5 G.	6 G.	7 G.	8 G.	9 G.	10+ G.	Totall *	
0	1'185	1'574	2'049	1'369	731	416	254	114	45	66	7'803	6'618
1	97'468	482'484	195'553	22'031	3'996	971	434	208	186	72	803'403	705'935
2	3'931	94'162	78'443	8'991	1'928	490	222	103	41	61	188'372	184'441
3 bis 5	561	18'487	70'480	36'643	11'174	3'488	1'324	284	41	35	142'517	141'956
6 bis 9	61	1'950	32'100	34'330	15'292	5'028	1'500	444	93	56	90'854	90'793
10+	23	324	3'938	13'275	13'596	10'478	7'305	3'763	1'730	2'535	56'967	56'944
Totall **	103'229	598'981	382'563	116'639	46'717	20'871	11'039	4'916	2'136	2'825	1'289'916	1'186'687
Anzahl Gebäude mit > 1 Wohnung	4'576	114'923	184'961	93'239	41'990	19'484	10'351	4'594	1'905	2'687	478'710	474'134

Tabelle 2 zeigt die Anzahl Gebäude mit Wohnnutzung in der Schweiz, welche **vor 1990** gebaut wurden. Es handelt sich um ca. 1.3 Mio. Gebäude, wovon rund 0.5 Mio. mehr als ein Geschoss und mehr als eine Wohnung pro Gebäude haben. Die Anzahl der Gebäude mit 3 - 9 Wohnungen beträgt rund 0.23 Mio.

Mit dieser Betrachtung kann ein Potenzial von rund 0.23 Mio. Gebäude abgeschätzt werden, bei denen ein Wärmeerzeugerersatz anstehen wird und ein dezentrales Heiz- und WW-Bereitungssystem eingesetzt werden könnte.



2.1.6 Gebäudebestand Wärmeerzeuger und Energieträger

In der Schweiz verfügten in 2015 gut 85% der 0.65 Millionen MFH und Wohngebäude mit Nebennutzung über eine Zentralheizung für ein oder mehrere Gebäude. Weniger als 3% waren bis zu dem Zeitpunkt an Fernwärme angeschlossen.

Trotz des konstanten Rückgangs der Heizölnutzung werden immer noch nahezu zwei Drittel aller Gebäude mit fossilen Energieträgern (Heizöl und Gas) geheizt. Die Zahl der Wärmepumpen nimmt seit 2000 stark zu. Im 2015 sind 8% der MFH mit Wärmepumpen ausgestattet.

In 20% der Gebäude werden sekundäre Energieträger für die Heizung genutzt. Dabei handelt es sich mehrheitlich um Holz. (Bundesamt für Statistik BFS 2021)

Tabelle 3: Mehrfamilienhäuser und Wohngebäude mit Nebennutzung nach Energieträger von Heizung und Warmwasser Stand 2015

Energieträger	HZ	Andere	Elektrizität	Fernwärme	Gas	Heizöl	Holz	Kohle	Sonnen-Kollektor	Wärmepumpe	Gesamt-Ergebnis
WW											
Andere		4485	23	159	386	644	192	3	10	122	6024
Elektrizität		565	39819	2289	16943	77688	45837	203	322	14948	198614
Fernwärme		1233	16	14521	268	383	313	0	460	44	17238
Gas		58	265	628	87797	2484	730	32	49	280	92323
Heizöl		138	519	811	2587	237879	1563	9	102	491	244099
Holz		35	448	280	309	2279	39370	7	62	196	42986
Kohle		0	3	0	17	43	20	72	0	3	158
Sonnenkollektor		74	170	203	3311	2628	1759	1	556	2809	11511
Wärmepumpe		42	279	129	363	1429	461	1	78	30818	33600
Gesamtergebnis		6630	41542	19020	111981	325457	90245	328	1639	49711	646553

In Tabelle 3 sind die Wärmeerzeuger und Energieträger für Heizung und TWW-Bereitung dargestellt, welche in MFH oder Wohngebäuden mit Nebennutzung in der Schweiz im Jahr 2015 in Betrieb waren.

Diese Tabelle dient zur Übersicht der derzeit genutzten Energieträger.

Jedes Gebäude hat einen Energieträger für TWW-Bereitung und einen für die Heizung des Raumes. In den meisten Fällen wird derselbe Energieträger für die beiden Nutzungsarten verwendet (Diagonale von oben links nach unten rechts zeigt diese Werte).

Die Anzahl an MFH und Wohngebäuden mit Nebennutzung, welche Heizöl für Warmwasser und Gas für die Raumheizung nutzen, beträgt beispielsweise 2'484.

Öl-, Elektrizitäts-, und Gas sind die meistgenutzten Energieträger für TWW.



2.2 Quellen Potenzial

In diesem Abschnitt sollen die geographischen Möglichkeiten zur Nutzung von EWS und die weiteren Quellen untersucht werden, die vom HpCosy System nutzbar sind.

Grundsätzlich kommen folgende Quellen infrage:

- Erdwärme
- Grundwasser und Fließgewässer
- Anergie- oder Niedertemperaturnetze
- Luft (über einen Sole Zwischenkreis und einem Luftregister)

2.2.1 Geothermisches Potenzial der Schweiz

Die verwendete Energie für die Erdwärmesonden - Wärmepumpen ist die oberflächennahe Geothermie. Für Erdwärmesonden wird in der Regel in Tiefen bis maximal 300 m unter der Erdoberfläche gebohrt (siehe Abbildung 6).

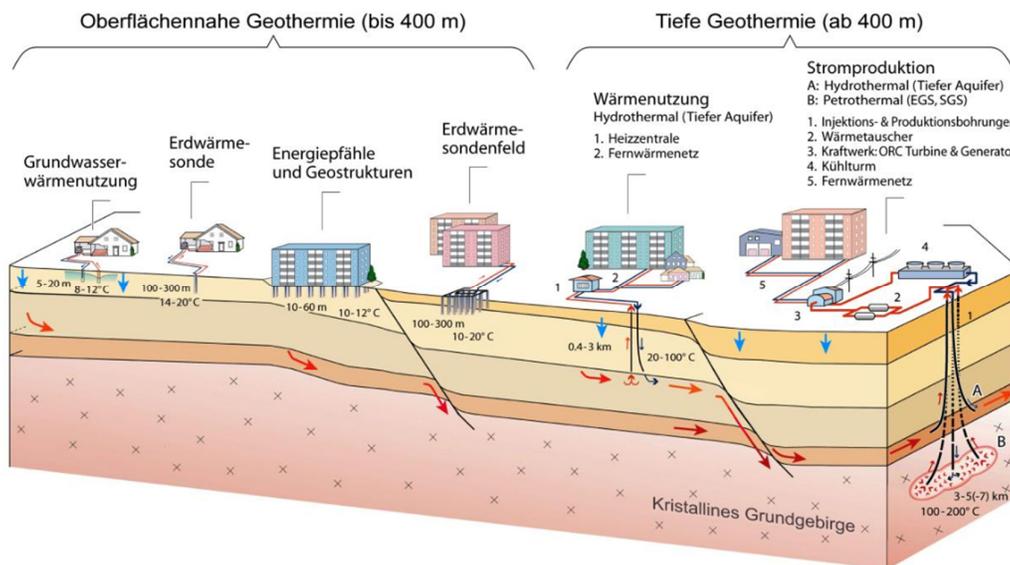


Abbildung 6: Geothermische Nutzungsmöglichkeiten in der Schweiz (Link, Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz 2019, S. 11)

2.2.2 Nutzung von Erdwärmesonden

Der Einsatz von Erdwärmesonden ist grundsätzlich in der gesamten Schweiz möglich.

Es gilt jedoch zu beachten, dass lokale Beschränkungen bestehen. Kantonale sowie städtespezifische Begebenheiten beeinflussen die Nutzungsmöglichkeiten der Erdsonden. Einige solcher lokalen Einschränkungen werden in den folgenden kantonsspezifischen Abschnitten deutlich.



Laut Art. 3 und 43 des Bundesgesetzes über den Schutz der Gewässer gilt die Sorgfaltspflicht, und der Erhalt des Grundwasservorkommens muss stets gewährleistet werden (Gewässerschutzgesetz, GSchG Art. 3/ 43).

Das bedeutet, dass z.B. die erlaubte Bohrtiefe je nach lokaler Geographie beschränkt ist.

Das Bundesamt für Umwelt (BAFU) gibt in seiner Vollzugshilfe «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund - Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung» an, welche Wärmenutzung aus Boden und Untergrund in welchem Wasserschutzgebiet erlaubt ist (BAFU 2009, S. 11).

2.2.3 Geothermische Rahmenbedingungen zur Nutzung von Erdwärmesonden

Mit EWS-Wärmepumpensystemen können hohe COP/JAZ-Werte aufgrund der durchs Jahr hindurch relativ hohen Quellentemperaturen erreicht werden.

Nebst der erwähnten Wasserschutzthematik stellt die EWS-Dichte ein wichtiges Thema dar.

Mit der EWS-Dichte ist die Anzahl an EWS innerhalb eines gegebenen Gebietes, bzw. einer gegebenen Fläche definiert.

EWS stören sich gegenseitig, wenn sie nahe zueinander gebohrt sind (Dr. Wagner und Weisskopf Mai 2014). Mit einer steigenden Anzahl an Sonden auf einem gegebenen Gebiet nimmt auch das Ausmass zu, mit dem sich die EWS gegenseitig die Wärme entziehen. Dieser gegenseitige Entzug führt zu kälteren Quellentemperaturen und somit zu schlechteren COP/JAZ Werten im Betrieb der Wärmepumpenanlagen.

Bei zu hoher Dichte haben zusätzliche EWS innerhalb eines sich bereits beeinflussenden Gebiets nicht nur einen schwindenden Nutzen, sondern auch eine Beeinträchtigung der Leistungsfähigkeit der bereits vorhandenen EWS zur Folge.

Tritt diese Beeinträchtigung über Massen auf, werden Massnahmen nötig, wie die sommerliche Regeneration der Erdwärmesonden. Dabei wird in der Regel Abwärme oder Solarwärme genutzt, um den Grund um das Bohrloch zu erwärmen. Die Problematik der EWS-Dichte kann also mit der entsprechenden Ergänzungstechnologie umgangen werden. Innerhalb dieser Analyse wird diese Problematik daher nicht weiter betrachtet.

Es lassen sich nur spärliche Daten zur EWS-Dichte innerhalb der Schweiz finden.

In den GIS- oder GEO--Portalen der Kantone, welche in folgenden Abschnitten behandelt werden, bietet nur der Kanton Basel-Landschaft eine öffentliche zugängliche EWS-Dichtekarte.

Es ist anzunehmen, dass die anderen Kantone dem Beispiel folgen werden.



2.2.4 EWS Nutzung als Beispiel im Kanton Zürich

Zürich ist mit ca. 1.5 Millionen Einwohner*innen der einwohnerstärkste Kanton der Schweiz (Statista 2020). Er beherbergt rund 18% des Schweizer Volkes (ebd.). In Abbildung 7 ist die Einteilung des Kantons in die verschiedenen Wasserschutzzonen zu sehen.

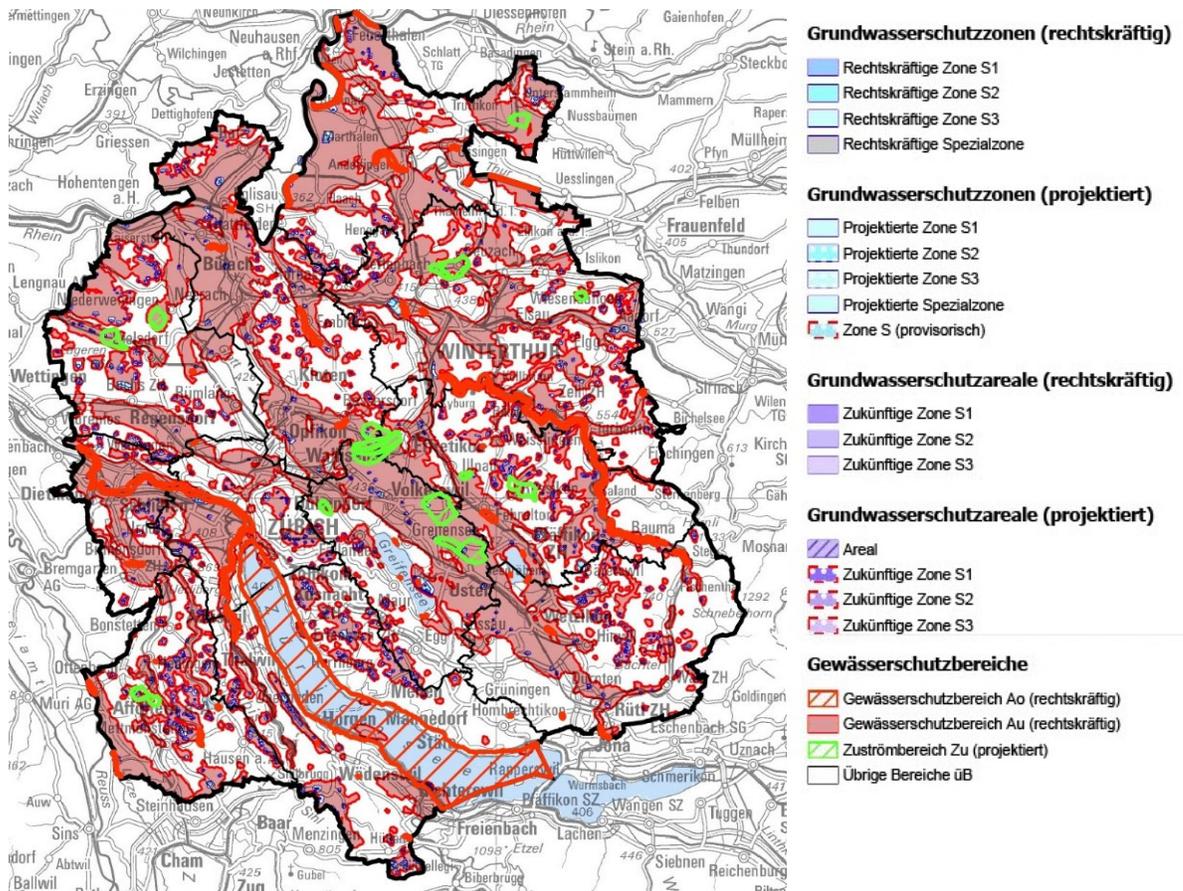


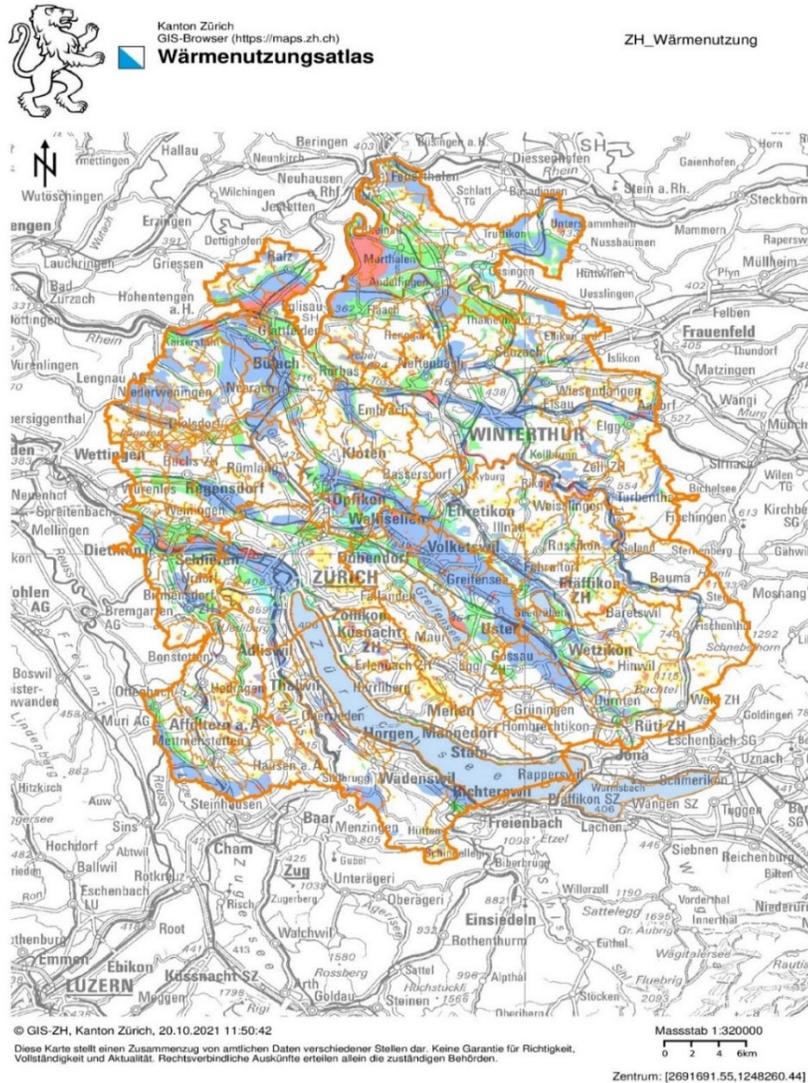
Abbildung 7: Wasserschutzgebiete Zürich (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021)

Abbildung 7 zeigt, dass ländliche Regionen grösstenteils als üB markiert sind. In der Agglomeration und den Städten hält die Schutzzone Au den grössten Anteil. Verboten sind Erdsonden nur in wenigen bestimmten Bereichen.

Der Wärmenutzungsatlas in Abbildung 8 zeigt Bereiche in Abhängigkeit zu ihrer erlaubten Wärmenutzung. Diese Karte zeigt, dass in den meisten Bereichen (hellblau, grün, gelb und weiss) die Nutzung von Erdwärmesonden – aufgrund nicht möglicher Gefährdung des Grundwassers – erlaubt ist. Nur in wenigen Gebieten, abseits von Fluss- oder Seeufern, sind Erdwärmesonden verboten. Da dieser Kanton – entsprechend den Analysen in den Kapiteln 0 und 2.1.3 – knapp 70'000 Gebäude mit Potenzial ab dem Jahr 2022 und zusätzlichen knapp 25'000 bis zum Jahr 2050 verzeichnet, muss Zürich als vielversprechend betrachtet werden.



Nach Bern werden in Zürich nämlich die meisten Gebäude mit Potenzial der Schweiz verzeichnet. Zudem liegt die grösste Stadt der Schweiz Zürich (mit rund 420'000 Einwohner*innen) und die sechst-grösste Stadt der Schweiz Winterthur (mit rund 40'000 Einwohner*innen) in diesem Kanton.



Gebiet gemäss Grundwasserkarte	Gewässerschutzbereich, Grundwasserschutzzone	Zone	Erdwärmesonden	Thermoaktive Elemente (Energiepfähle, Bodenplatten, usw.)	Erdregister, Energiekörbe mit flüssigen Wärmeträgern	Erdregister, Energiekörbe mit Luft betrieben	Grundwasser-Wärmenutzung
Schotter-Grundwasservorkommen, geeignet für Trinkwassergewinnung	S	A	-	-(a)	-(a)	-(a)	-
	Au	B	-	+(b)	+(b)	+(d)	+(e)
Schotter-Grundwasservorkommen, ungeeignet für Trinkwassergewinnung	Au	C	+(c)	+(b)	+(b)	+(d)	+(f)
	i.d.R. Au	D	+	+(b)	+(b)	+	+(f)
Quellwassergebiete geeignet für Trinkwassergewinnung	Au	E	+(c)	+(b)	+(b)	+(d)	+(e)

(Abbildung 8: Wärmenutzungsatlas Zürich (Bundesamt für Landestopographie swisstopo 2021)



2.2.5 EWS Nutzung und Wasserfassung mit Wärmenutzung in Zürich

Als weitere Quelle dienen Grundwasser und Fließgewässer.

Auf Abbildung 9 ist das GIS System von Zürich mit EWS und Wasserfassungen für Wärmenutzung abgebildet. Die grünen Punkte stellen die EWS dar. Die orangen Punkte sind die Wasserfassungen mit Wärmenutzung.

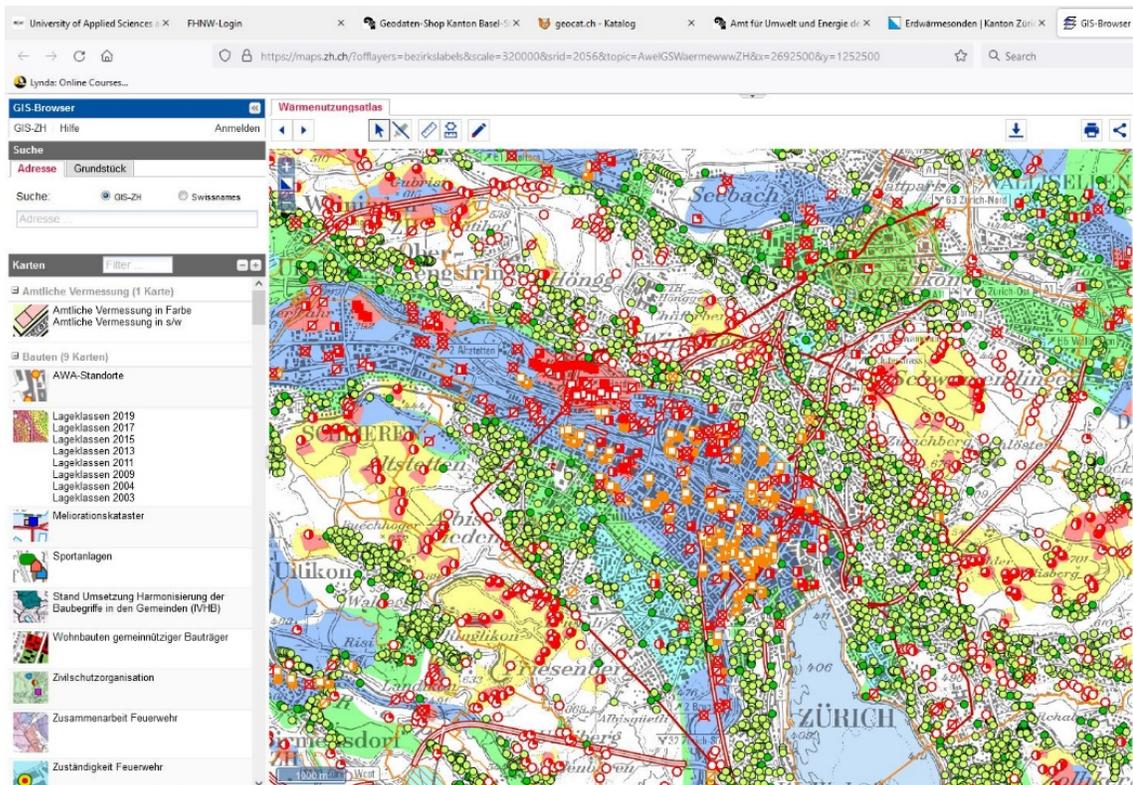


Abbildung 9: GIS System ZH mit EWS und Wasserfassungen für Wärmenutzung



2.2.6 EWS Nutzung in weiteren Kantonen (Auswahl)

Der Kanton Aargau hat rund 700'000 Einwohner*innen und ist somit einwohnermässig der viertgrösste Kanton der Schweiz (Statista 2020). Im Kanton befindet sich keine Stadt, welche mehr als 25'000 Einwohner hat (Brinkhoff 2020). Gemäss dem GIS des Kantons sind EWS grösstenteils freigegeben. In den grossen Bezirken wie Aarau, Baden, und Bremgarten sind Erdsonden nahezu flächendeckend einsetzbar.

Der Kanton St.Gallen ist mit rund 515'000 Einwohner*innen an fünfter Stelle der einwohnerstärksten Kantone der Schweiz (Statista 2020). Die gleichnamige Stadt ist mit rund 76'000 Einwohner*innen unter den zehn grössten Städten der Schweiz (ebd.)

Im GIS des Kantons ist zu erkennen, dass in mehr als 50% des Gebietes EWS erlaubt sind. In den meisten dieser Gebiete muss keine hydrogeologische Vorabklärung durchgeführt werden, solange die Bohrtiefe weniger als 250 Meter beträgt. Das Gebiet in dem sich die Stadt St. Gallen befindet, ist zum allergrössten Teil ebenfalls geeignet für die Nutzung von EWS.

Der Kanton Basel-Stadt z.B. stellt in ihrem kantonalen Richtplan Teilrichtplan Energie vom März 2020 folgende Priorisierung zur Nutzung von Energieträgern vor (Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt, S. 7):

- 1. Ortsgebundene und verfügbare Abwärme und Umweltwärme sind vorrangig zu nutzen, d.h.
 - o 1. Priorität: ortsgebundene hochwertige Abwärme (direkt nutzbar), z.B. langfristig zur Verfügung stehende Industrieabwärme, Abwärme aus der KVA;
 - o 2. Priorität: ortsgebundene niederwertige Abwärme und Umweltwärme (mit Wärmepumpe nutzbar), z.B. Abwärme aus Abwasserreinigungsanlagen, Industriebetrieben sowie Umweltwärme aus Fliessgewässern, Grundwasser und Erdwärme.
- 2. Regional verfügbare erneuerbare Energieträger (Holz, feuchte Biomasse) sollen verstärkt genutzt werden. Grössere Holzfeuerungen (ab einer Leistung von 70 kW) haben bezüglich Feinstaubemissionen die strengen Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung einzuhalten
- 3. Örtlich ungebundene Umweltwärme (Umgebungsluft sowie Solarthermie)
- 4. Fossile Energieträger sollen nur noch in Ausnahmefällen genutzt werden.

Die Erdwärme hat grundsätzlich eine hohe Priorität gleich hinter der Fernwärmenutzung. Die Nutzung von hochwertiger Abwärme findet durch die Industriellen Werke Basel (IWB) und der Wärmeverbund Riehen AG (WVE) statt (ebd., S. 23f). Diese sind für den Grossteil der genutzten Energie des Kantons verantwortlich.



2.3 Erkenntnisse aus anderen Projekten

2.3.1 Gängige Wärmepumpensysteme für Heizung und Warmwasser in MFH

Vetsch et. al. (2012) haben in ihrem Papier «Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern» die häufigsten Wärmepumpensysteme im Bereich der MFH zusammengetragen. Die Abbildungen sind dem Bericht entnommen.

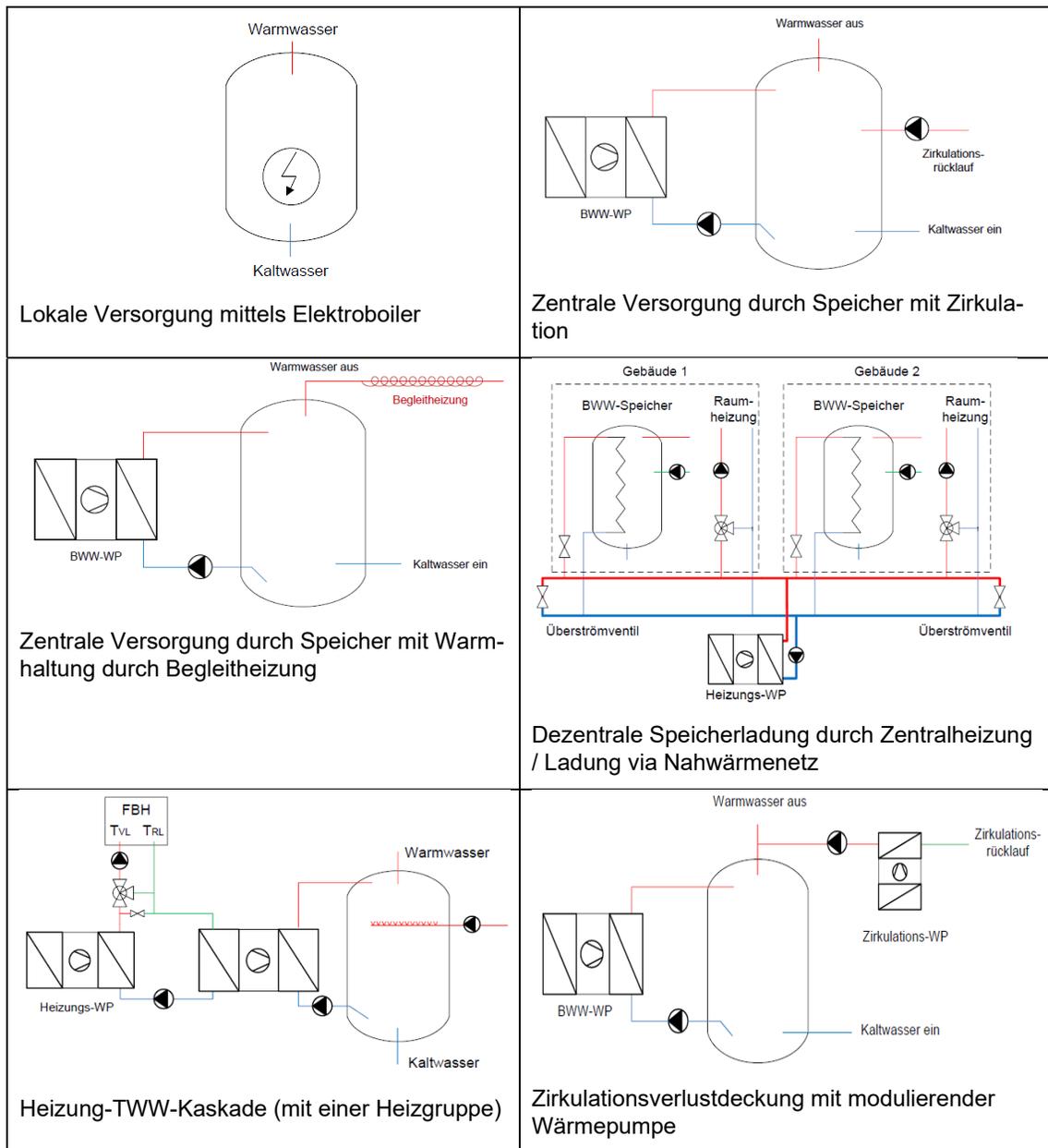


Abbildung 10: Gängige Wärmepumpensysteme in MFH



2.3.2 Durchgeführte Simulationen und Messungen

Auf Basis von Simulationen und Messungen wurden drei verschiedene MFH-Objekte mit unterschiedlichen TWW-Bereitungen untersucht und gegenübergestellt (Vetsch et. al., 2012).

Zusammenfassung der Ergebnisse: Energieeffizienz:

- Zirkulationssysteme schneiden besser ab als Warmhaltung mit Begleitheizung (ca. 5%)
- Schlechte Dämmung hat einen grösseren Effekt als die Zirkulation oder das Heizband
- Erweiterung des Systems mit Zirkulationswärmepumpe steigert die Effizienz um ca. 4%
- Rohr-an-Rohr-Installation würde weitere Energieeinsparungen liefern
- Kombinierte Systeme mit Ladung via Nahwärmenetz schneiden schlechter ab und erreichen deutlich schlechtere Arbeitszahlen als die übrigen Anlagearten.
- Jede Anlageart arbeitet bei dezentraler Aufstellung im Allgemeinen mit einer besseren Arbeitszahl als bei zentraler Aufstellung
- Bei gegebenen Topologien: die Anlagearten in grösseren Überbauungen arbeiten am effizientesten (resultiert aus dem besseren Verhältnis von Rohr- und Speicheroberfläche zur TWW-Bezugsleistung)

Ergebnisse: Legionellenprävention

Die Bewertung der Legionellenprävention basiert auf den Ergebnissen der Simulation (Vetsch et. a. 2012, S. 70). Sie kommen zum Ergebnis, dass bei keinem der Systeme das Wasser länger als 24 Stunden im Temperaturbereich zwischen 25°C und 50°C stagniert, und somit gemäss SIA-Norm 385/1 keine thermische Definition notwendig ist.

Ergebnisse: Komfort

Bei jedem System ist laut Simulation eine Temperatur am Wohnungsverteiler von 55°C möglich. Die Ausstosszeit kann bei zweckmässiger Raumaufteilung gewährleistet werden, da diese unter anderem von der Länge der Sticheleitung abhängt. Die Unterschiede zwischen den Systemen liegen vor allem bei der Schwankung der Temperatur an den Wohnungsausschüssen. Während die Zirkulationssysteme eine Senkung des Temperaturniveaus aufweisen – abhängig davon wie viel TWW bereits aus dem Speicher gezogen wurde – hält das Heizbandsystem die Temperatur innerhalb eines engeren Wertebereiches (ebd.).

Raumbedarf

Bei einer Versorgung von mehreren Gebäuden ist die zentrale TWW-Versorgung enorm vorteilhaft, da sie lediglich einen Raum pro Überbauung bedarf (Vetsch et. al. 2012, S.82). Die dezentrale Versorgung nimmt da mehr Platz ein mit jeweils einem Raum pro Gebäude. Sowohl Zirkulationswärmepumpe wie auch Zirkulationspufferspeicher nehmen zusätzlichen Platz im Technikraum ein. Zirkulationssysteme sind im Vergleich zu Begleitheizung nachteilig, da sie mehr Platz in Leitungsschächten benötigen (für die Doppelrohrverlegung).

Lohnt sich dezentral?

Nach den Erkenntnissen von Vetsch et. al. (2012, S.93ff) sind dezentrale Systeme umso vorteilhafter, je länger die Hauptleitung ist.



2.4 Am Markt erhältliche Wärmepumpen/Speichersysteme

Die Hauptanforderungen an die HpCosy Systeme sind Heizen, Kühlen, sowie das Bereiten und Speichern von TWW. Dabei sind weitere Anforderungen gesetzt an die Effizienz, Lärmemission, die Verwendung von Low-GWP-Kältemitteln sowie weitere qualitative und quantitative Kriterien. Um ohne Heizpufferspeicher auszukommen, wird eine gute Leistungsregelbarkeit nötig. Ebenso sind Anforderungen gestellt an die Kommunikationsmöglichkeiten für den Betrieb im Verbund.

Es sind zahlreiche Produkte am Markt verfügbar, die sich für den Einsatz als dezentrale Wärmepumpen in den Wohnungen von MFH eignen. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Trend zu kompakten Systemen besteht, die sowohl die Funktionen Heizen und Warmwasserbereitung, als auch Kühlen abdecken.

In einer Internet-Recherche wurden die passenden Produkte verschiedener Hersteller gesucht und die Informationen gemäss der Datenblätter zusammengetragen und verglichen. Es wurden nur Systeme berücksichtigt, die über einen integrierten Warmwasserspeicher verfügen.

Die Zusammenstellung erstreckt sich über 27 Produkte von 13 Anbietern/Herstellern.

Die Heizleistungen für einzelne Wohnungen sind in der Regel im Bereich von 4 - 5 kW (bei Annahme von 40 - 50W/m² und 100m² für bestehende, gut wärmedämmte Wohnhäuser).

Um ein System ohne Heizungs-Pufferspeicher betreiben zu können, muss der Leistungsstellbereich tiefe Teillastbetriebe ermöglichen. Daher werden die am Markt erhältlichen Wärmepumpensysteme auf diese Funktionalität hin geprüft.

Nebst den grundlegenden Merkmalen, wie Heizleistung, SCOP, TWW Speichergösse und weiteren Merkmalen, wie die Abmessungen muss auch die Ansteuerbarkeit, bzw. die Kommunikationsfähigkeit der Wärmepumpe untersucht und berücksichtigt werden.

2.4.1 Leistungsregelung

Für das HpCosy System spielt die Möglichkeit der extern beeinflussbaren Leistungsregelung eine entscheidende Rolle. Die nötige Regelgüte und die Parameter dafür werden im Kapitel 4 untersucht.

Üblicherweise wird die Leistungsregelung von Wärmepumpen mittels der Anpassung der Verdichterdrehzahl bewerkstelligt und dabei in aller Regel auf Temperaturwerte reagiert, wie z.B. die Regelung auf eine gewünschte Vorlauftemperatur von 35°C.

Falls der Wärmepumpenregler auch die elektrische Verdichterleistung ermitteln und auswerten kann, lässt sich der Leistungsstellbetrieb bei entsprechender Fähigkeit des Reglers auch zusätzlich auf Leistungswerte einregeln. Der Sollwert für diese elektrische Leistung muss dann vorgegeben werden können.

2.4.2 Kommunikation

Es sind verschiedene Kommunikationsmöglichkeiten und -ebenen für die HpCosy Anwendung denkbar. Nachfolgend sind Beeinflussungsstufen aufgeführt. Je höher die Stufe, desto detaillierter und präziser lässt sich das Gesamtsystem regeln.

Stufe 1: Sperrsignal EVU (von aussen gesperrt/freigegeben)

Stufe 2: SG-Ready (Aus, Normalbetrieb, Temperaturanhebung, forcierter Betrieb)

Stufe 3: Ansteuerung und Kommunikation über Bussysteme / Schnittstellen, wie Modbus z.B.



2.4.3 Produktvergleich und Zusammenstellung

Die Produkte werden anhand des Rasters gemäss Tabelle 4 zusammengetragen und verglichen. Die wichtigsten Grössen werden in den nachfolgenden Grafiken dargestellt.

Tabelle 4 Vergleichsraster für Wärmepumpen.

Merkmal	Erläuterung
Hersteller	
Wärmepumpentyp / Bezeichnung	
Produktlabel Effizienzklasse	Heizung 35°C / 55 °C
Heiz- und Kälteleistung (Leistungsbe- reich) und COP nach EN 14511	bei B0/W35°C (Teillastbetrieb 50 oder 60 Hz) bei B0/W55°C (Teillastbetrieb 50 oder 60 Hz) bei B0/W35°C Vollast und B0/W55°C Vollast
SCOP nach EN 14825	35 °C (mittleres Klima) / 55° C / 35 °C (kaltes Klima)
Einsatzgrenzen	Einsatzgrenze Heizkreis VL / Wärmequelle
Kühlen - Aktives Kühlen - Free Cooling	Kühlleistung aktiv B10W18 (Reversibel) Kühlleistung bei Nennvolumenströmen B15/B23 °C
Passive Kühlfunktion	Kühlleistung bei Nennvolumenströmen (15 °C Wärme- quelle, 25 °C Heizwasser)
Schalleistungspegel nach EN 12102	Minimal / maximal
Kältemittel	Typ / Menge
Trinkwarmwasser Boiler	Netto-Inhalt
	Brauchwarmwassertemperatur im Wärmepumpenbetrieb
Mischwassermenge nach ErP Nach EN 16147	bei 40°C, Entnahme von 10 l/min) / Schüttleistung
Abmessung/Masse/Anschluss	Höhe / Breite / Tiefe / Gewicht Elektroanschluss / max. Maschinenstrom Nennspannung Verdichter
Elektroeinsatz	Leistungsbereich Elektroeinsatz



Auswahl von Wärmepumpensystemen mit weniger als 10kW Heizleistung:

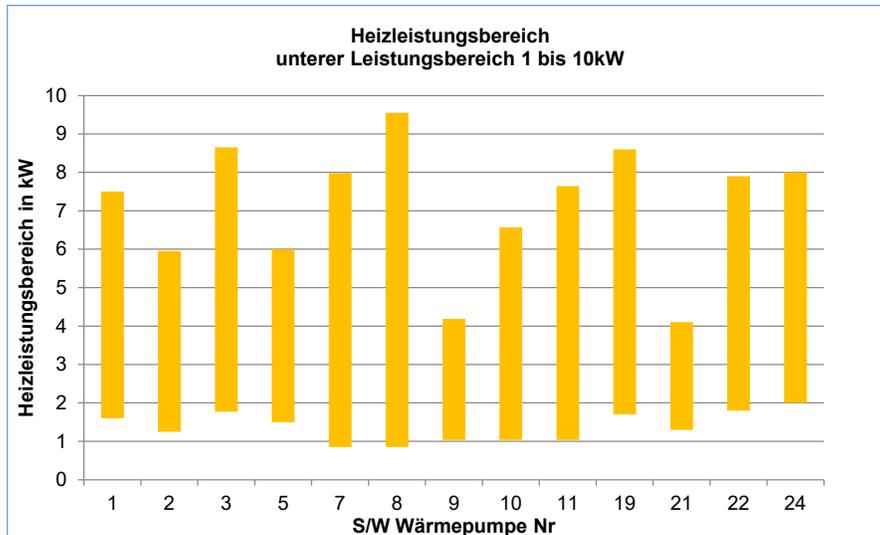


Abbildung 11: Produktvergleich Heizleistungsbereich der verschiedenen Wärmepumpen (Auswahl)

In Abbildung 11 sind die Heizleistungsbereiche einer Auswahl der Wärmepumpen mit Heizleistungen <10kW dargestellt. Die grösseren Maschinen eignen sich in der Regel nicht für reine Wohnungen.

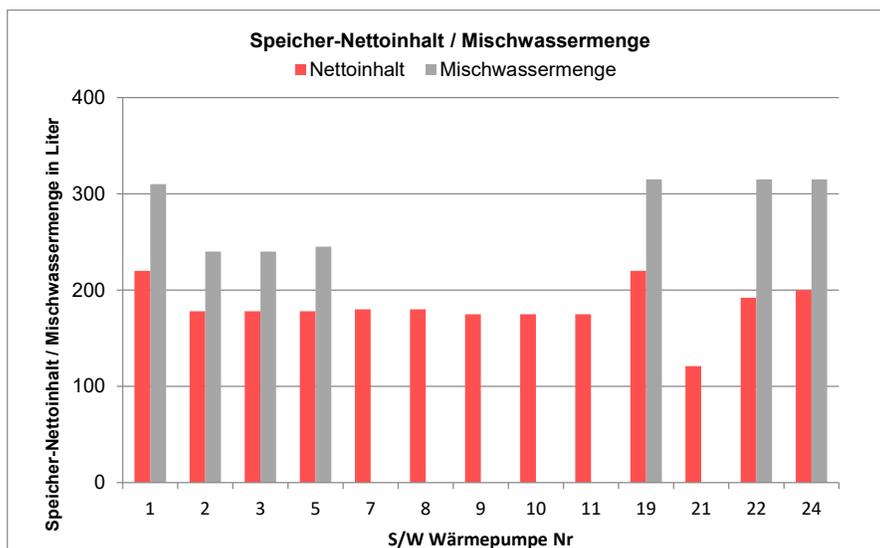


Abbildung 12: Speicher-Nettoinhalt und Mischwassermenge (Auswahl)

Abbildung 12 zeigt die Speicher-Nettoinhalte und die Mischwassermengen, welche den Speichern entzogen werden können, dies wiederum für die Auswahl. Die meisten Geräte haben Speichervolumen im Bereich von 180 bis 210 Liter und Mischwassermengen von 230 bis 320 Liter.

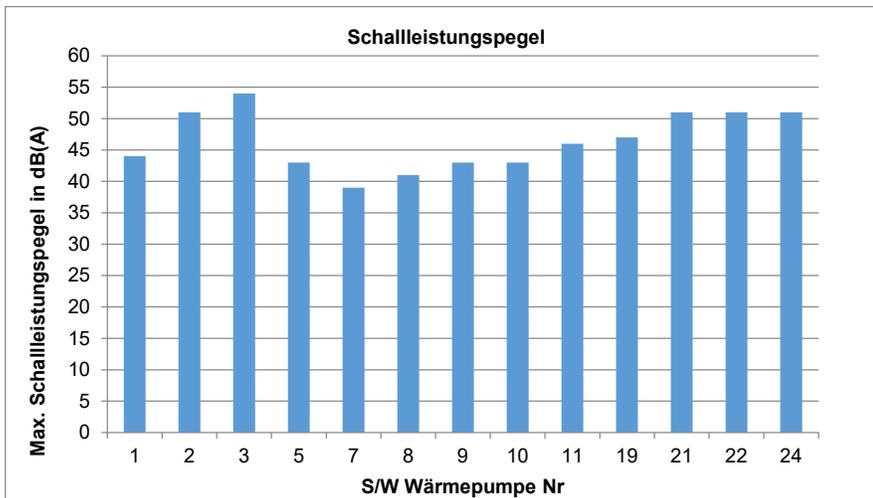


Abbildung 13: Schalleistungspegel der Wärmepumpen (Auswahl)

Tiefe Schalleistungspegel sind für die dezentrale bzw. lokale Anwendung innerhalb der Wohnung wichtig. Die Gegenüberstellung in Abbildung 13 zeigt die maximalen Werte im Bereich von 39 bis 54 dB(A). Die Geräte sind relativ leise, da aber die Aufstellung in der Wohnung vorgesehen ist, wird ein leiser, wenn möglich kaum wahrnehmbarer Betrieb wichtig sein. Im leistungsreduzierten Betrieb werden die Werte geschätzt um 2-3 dB(A) niedriger sein.

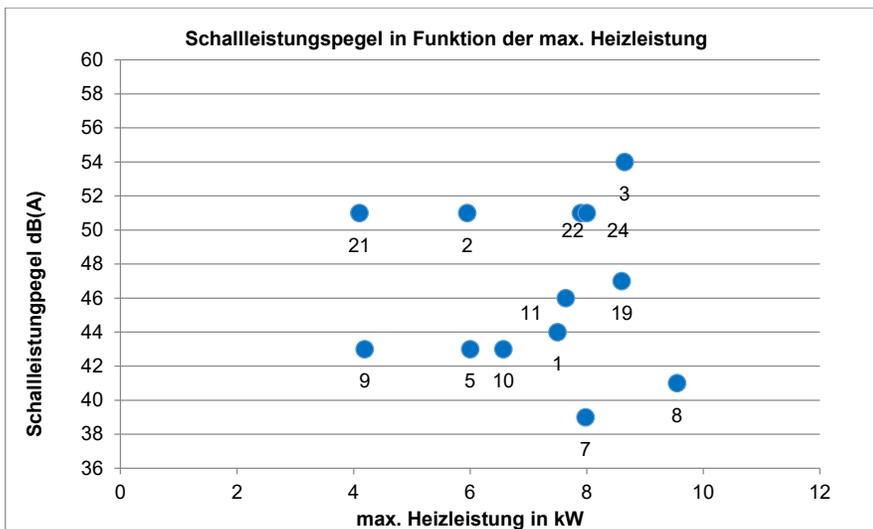


Abbildung 14: Schalleistungspegel in Funktion der max. Heizleistungen (Auswahl)

Abbildung 14 zeigt die Schalleistungspegel der Geräte in Funktion der max. Heizleistungen. Tendenziell steigen die Schalleistungspegel mit der max. Heizleistung an. Dies lässt sich mit der nach rechts ansteigenden Schalleistungswerten WP 9 → WP 3 in etwa erkennen. Die maximale Spanne von 15 dB(A) (WP 3 zu WP 7) im ähnlichen Leistungsbereich ist auffallend, wenn man bedenkt, dass rund 6 dB(A) eine Verdoppelung der wahrgenommenen Lautstärke entsprechen.



SCOP für Heizen:

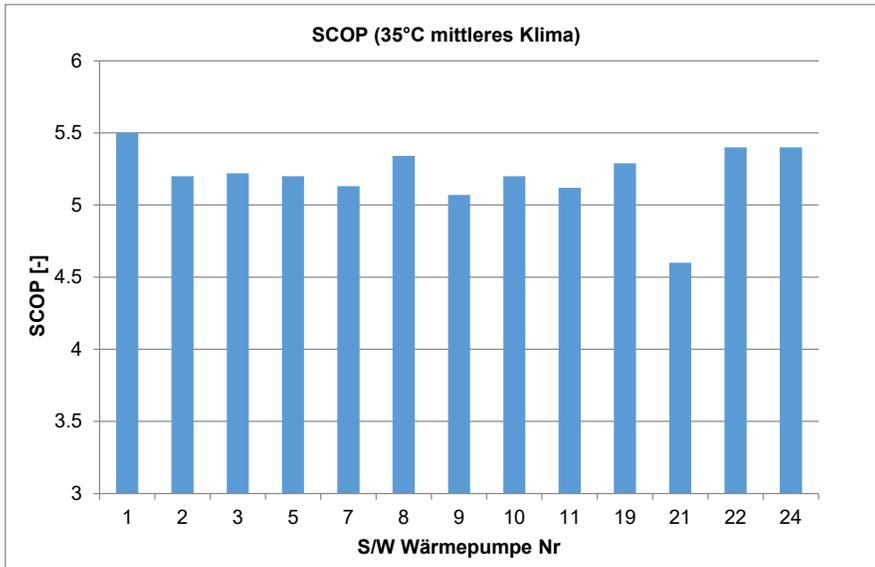


Abbildung 15: SCOP (35°C und mittleres Klima (Auswahl))

Abbildung 15 zeigt den Vergleich der SCOP Werte nach EN 14825 für tiefe Abgabemperaturen und mittlerem Klima. Die Werte sind grösstenteils im Bereich zwischen 5.1 und 5.5.

Das EHPA Gütesiegel Reglement verlangt einen SCOP von 4.3 bei der Anwendung.

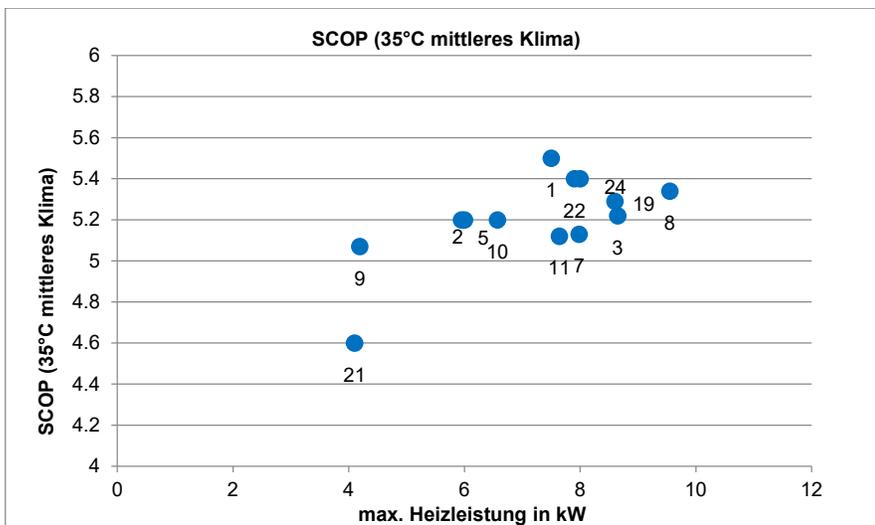


Abbildung 16: SCOP 35°C mittleres Klima in Funktion der max. Heizleistung (Auswahl)

Abbildung 16 zeigt die gleichen SCOP Werte bezogen auf die max. Heizleistung der jeweiligen Wärmepumpe. Tendenziell steigen die SCOP Werte mit den max. Heizleistungen an.



COP für Warmwasserbereitung:

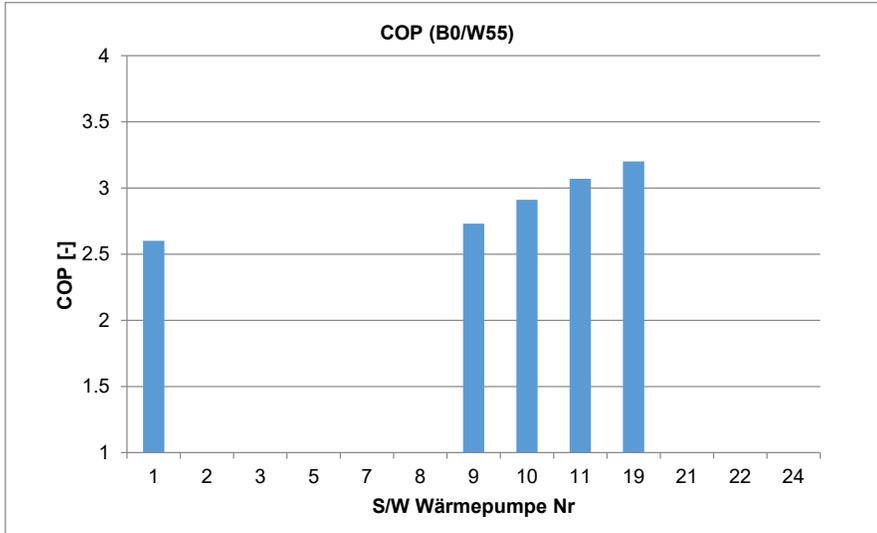


Abbildung 17: COP für Warmwasserbereitung

Abbildung 17 zeigt den Vergleich der COP Werte nach EN 14511 für B0/W55. Die Werte sind grösstenteils im Bereich zwischen 2.6 und 3.3. Es konnten nicht alle Angaben online gefunden werden. Daher die Lücken in der Darstellung. Es wird angenommen, dass die anderen Geräte im gleichen COP Bereich zwischen 2.5 und 3.2 liegen.

Das WPSM Reglement verlangt einen COP von 2.5 bei der Anwendung.



2.5 Marktfähigkeit

Die Marktfähigkeit lässt sich durch verschiedene Merkmale ableiten.

Nebst den technischen Randbedingungen, wie die Möglichkeit der EWS-Anbindung, wird die Marktfähigkeit auch massgeblich durch finanzielle Aspekte beeinflusst. Die wirtschaftliche Beurteilung ist wichtig und kann am besten mit einer Vollkostenrechnung über die Nutzungsdauer gemacht werden.

Die Nutzerakzeptanz ist bei einer Anwendung ebenso wichtig. Dezentrale Lösungen für Wohnungen in MFH wie Etagenheizungen waren viele Jahre Standard. Die Ablösung dieser Etagenheizungen durch zentrale, fossile Lösungen brachte den Vorteil, dass Wartung und Unterhalt einfacher wurden, da sich die Anlage nicht mehr in Wohnungsbereichen befand.

Dezentrale Lösungen führen daher wieder zu Interventionen in den einzelnen Wohnungen, was als nachteilig eingestuft werden könnte. Als Vorteil der dezentralen Lösung wird die individuelle Abrechnung der Heiz- und TWW-Kosten gesehen.

Die Merkmale, welche besonders für das HpCosy Projekt relevant sind, werden nachfolgend aufgeführt.

2.5.1 Technische Umsetzung

Quellenanbindung

Das HpCosy-System funktioniert am effizientesten bei Quellenanbindungen an EWS, Anergienetzen, Grundwasser oder Fliessgewässer. Der Solezwischenkreis bei einem Luftregister reduziert die Anlageneffizienz infolge des zusätzlichen Wärmeübertragers.

Anpassungen der Leitungen bei der Sanierung/Umrüstung:

Bei den Gebäuden mit Potenzial gemäss 2.1.1 besteht die Möglichkeit zu einem Wechsel von den bestehenden Heizungssystemen zum HpCosy-System, wenn folgende Leitungssysteme angepasst, ersetzt und hinzugefügt werden:

- Kaltwasserleitungen
- Warmwasserleitungen
- Heizleitungen
- neue Quellenleitungen

Kaltwasserleitungen:

Die Kaltwasserleitungen führen in aller Regel in der Steigzone zu den Etagen, und von da an zu den Entnahmestellen. Der neu in der Wohnung installierte TWW-Speicher muss an das KW-Netz angeschlossen werden.

Warmwasserleitungen:

Die bereits verlegten Warmwasserleitungen können nur teilweise wiederverwendet werden. Das System muss in den jeweiligen Etagen/Wohnungen zwischen den Entnahmestellen und der Hauptsteigleitung angepasst werden.



Heizungsleitungen (bisher) und die neuen Quellenleitungen:

In der Regel sind die Heizungshauptleitungen in Schwarzstahl ausgeführt und führen vom Keller über die Steigzone zu den einzelnen Etagen.

Die mit dem HpCosy System neu benötigten Leitungen für die WP-Quelle müssen korrosionsbeständig ausgeführt werden, also entweder in PE z.B. oder rostfreiem Stahl.

Da die Quellenkreise infolge der geforderten kleineren Temperaturspreizungen höhere Volumenströme führen als die Heizkreise, muss auch die Dimension der Leitungen geprüft, ggf. entsprechend angepasst bzw. erhöht werden.

Zusätzlich muss die Dämmung/Isolierung auf eine diffusionsdichte Variante umgerüstet werden, da die Leitungstemperaturen den Taupunkt der Luft unterschreiten, und sich sonst die Luftfeuchte an den kalten Leitungen niederschlagen könnte.

Aus diesen genannten Gründen lassen sich die bestehenden Heizungsleitungen in aller Regel für die Quellenseite nicht umnutzen.

Technische Ausführung im Neubau:

Bei einer Neuinstallation sind einzig spezielle Anforderungen an die Wärmepumpen- Quellenleitungen gestellt: PE oder rostfreiem Stahl mit diffusionsdichter Dämmung/Isolierung und entsprechende Dimensionierung

2.5.2 Wirtschaftliche Beurteilung, Kostenermittlung und -vergleich nach VDI 2067

Die wirtschaftliche Beurteilung ist ebenso massgebend wie die technische im Hinblick auf die Umsetzbarkeit und Marktakzeptanz einer dezentralen WP-Lösung. Hierzu muss ein Kostenvergleich, in der Regel ein Vollkostenvergleich mit sämtlichen Kosten während der Nutzungszeit gemacht werden.

Dazu werden nach VDI 2067 «Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen» die Annuitätenmethode bei den Investitionsrechnung verwendet, bei der alle unterschiedlichen Kosten und Preisänderungen in konstante Zahlungen während des Betrachtungszeitraums transformiert werden.

Gemäss VDI 2067 werden für einen Vollkostenvergleich vier Kostengruppen unterschieden:

A) Kapitalgebundene Kosten (inklusive Erneuerung)

Diese umfassen:

- Investitionskosten für die technischen und baulichen Anlagen
- Abschreibungen und Zinsen
- Instandsetzungskosten während der rechnerische Nutzungsdauer
- Anschlusskosten für Strom z.B.

B) Bedarfsgebundene Kosten

Umfasst sind alle Kosten, die in direktem Zusammenhang mit der Wärmeerzeugung stehen (wie die Energiekosten):

- Leitungsgebundene Energieträger (z.B. Strom), meist Grundpreis, Energie-, und Leistungspreis.
- Nicht leitungsgebundene Energieträger, wie z.B. Heizöl, Pellets, (hier nicht relevant)

C) Betriebsgebundene Kosten



Diese stehen mit dem Betrieb der Wärmeerzeugungsanlage im direkten Zusammenhang:

- Kosten für Instandhaltung, Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Schwachstellenbeseitigung
- Kosten für die Bedienung

D) Sonstige Kosten

Umfassen die Kosten für Versicherung, allgemeine Abgaben etc.

2.5.3 Investitionskosten

Die Investitionskosten fassen sämtliche Kosten zusammen, die anfallen, bis ein HpCosy-System verbaut worden ist. Dies beinhaltet die Materialkosten, Beschaffungskosten sowie Installationskosten.

Diese Investitionen werden mit Hilfe von finanziellen Unterstützungslösungen in Form von Energiesparpaketen z.B. reduziert und somit gefördert. Die sich ergebenden Netto-Investitionskosten variieren je nach Kanton und Gebäude. Im Rahmen dieses Projekts wird keine Berechnung dieser Kosten gemacht.

Installationskosten sind Bestandteil der Investitionskosten und werden hauptsächlich durch die Menge des Materials, Anzahl der Komponenten und dem Schwierigkeitsgrad der Umsetzung zusammengesetzt.

Beim Einsatz des HpCosy-Systems ist zwischen Sanierung/Umrüstung und Neuinstallation zu unterscheiden. Im Falle einer Sanierung/Umrüstung ist mit höheren Kosten für die Modifikation der Leitungen zu rechnen. Bei Neuinstallationen sind die Unterschiede zwischen zentraler und dezentraler Lösung weniger ausgeprägt.

Generell:

Sind die Investitionskosten zu hoch, so kann sich ein potenziell effizienteres Heiz- und TWW-Bereitungssystem im Markt in der Regel nicht durchsetzen.

Es wird davon ausgegangen, dass die dezentrale Lösung bei einem MFH-Objekt von der Investition her teurer ist, wie die zentrale Lösung. Hier im angenommenen Beispiel sind die sechs dezentralen WP teurer sind als eine zentrale WP. Der betriebliche Vorteil bei den dezentralen Systemen ist aber bei der geringeren elektrischen Leistungs- und Energieaufnahme, was sich während der Nutzungsdauer bemerkbar macht. Hier können nur Vollkosten

Höhere Investitionskosten können nur mit geringeren bedarfsgebundenen Kosten (Energiekosten) gerechtfertigt werden. Die genaue Berücksichtigung ist mit einer Vollkostenrechnung gemäss VDI 2026 möglich.



2.6 Zusammenfassung Marktanalyse

Die Marktanalyse hat gezeigt, dass im Gebäudebestand Potenzial für die Nutzung des HpCosy Systems vorhanden ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments stehen rund 0.31 Mio. Gebäude mit 3-9 Wohnungen in der Schweiz.

Für die Simulation wird ein MFH mit 3 Stockwerken und 6 Wohnungen vorgeschlagen. Die Wohnfläche soll im Bereich von 120 m² liegen. In den Wohnungen sollen 2-4 Personen mit unterschiedlichen Nutzerverhalten leben.

Die Analyse des geographischen Potentials hat gezeigt, dass die EWS-Quellennutzung in den vielen Teilen der Schweiz möglich ist. Beschränkungen entstehen hauptsächlich durch Wasserschutz zonen in Fluss- und Seenähe. Der Einsatz muss in jedem Einzelfall beantragt und bewilligt werden.

Als Quellen kommen nebst EWS auch Grundwasser, Fliessgewässer, Anergienetze und Luft mit den Nachteilen der etwas schlechteren Effizienz infolge des zusätzlichen Wärmeübertragers und der Schallproblematik infrage.

Die nötigen S/W-Wärmepumpen mit den TWW-Speichern sind bereits auf dem Markt erhältlich. Es gibt zahlreiche Geräte, die sich für die Anwendung mit dem erforderlichen Heizleistungsstellbereich eignen.

Die technische Analyse, welche sich auf Forschungen von Vetsch et. al stützen, zeigt, dass sich ein dezentrales TWW-Bereitungssystem in Bezug auf die Energieeffizienz lohnt. Dies gilt umso mehr, je länger die eingesetzten Leitungen bei zentralen Systemen sind.

Die Kosten-/Amortisationsanalysen, welche von Vetsch et. al. gemacht wurden, weisen darauf hin, dass die Installationskosten der Leitungen massgeblich sind.

Im Falle der Wärmeerzeuger-Umrüstung müssen die Leitungssysteme im Gebäude angepasst werden, und Platz für den TWW-Speicher, bzw. die jeweilige Wärmepumpe innerhalb der Wohnung geschaffen werden. Diese Anpassungen sind mit erheblichen Zusatzinvestitionen verbunden, da die bestehenden Heizungsverteilungen umgebaut werden müssen.

Bei den Investitionen muss der Vergleich der Kosten von einer zentralen Wärmepumpe zu den mehreren dezentralen Wärmepumpensysteme gemacht werden. Ein Vollkostenvergleich ist nötig, um die betrieblichen Vorteile der dezentralen Lösung kostenmässig sichtbar zu machen.



3 Simulationen

3.1 Rahmenbedingungen Klima und Last

3.1.1 Wetterdaten

Für die Simulationen wurden Wetterdaten von MeteoSchweiz für den Standort Zürich verwendet (SIA, SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik 2010). Die Messdaten stammen vom Schweizerischen Ingenieur- und Architektenverein (SIA) für die Jahre von 1986 bis 2003. Aus den Daten wurde ein «typical meteorological year» (TMY) zusammengestellt wie beschrieben in (Haller MY 2013) Abbildung 18 zeigt die Umgebungstemperatur als monatlicher Boxplot während eines Jahres. Die jährliche Durchschnittstemperatur beträgt 9,3 °C. Die jährliche horizontale Globalstrahlung (GHI) beträgt 1092 kWh/m² (Abbildung 19).

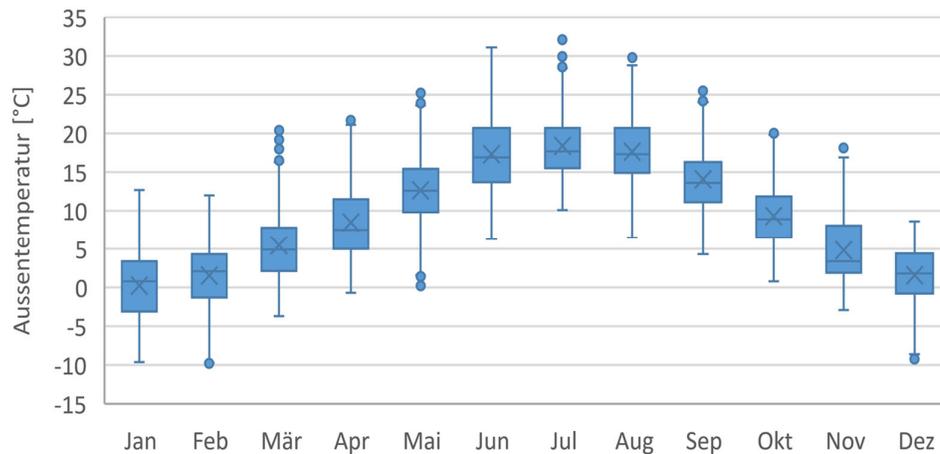


Abbildung 18: Aussentemperatur im Jahresverlauf in Zürich.

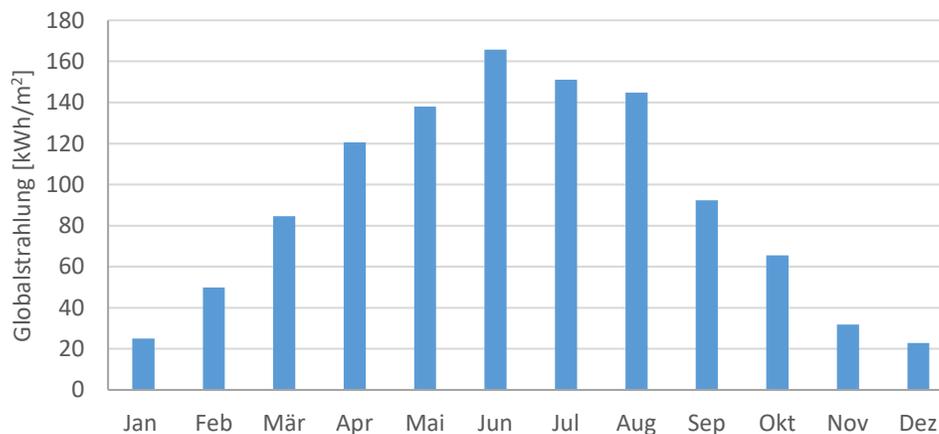


Abbildung 19: Globalstrahlung in Zürich.



3.1.2 Gebäude

Die Auswahl des Gebäudes für die vorliegende Untersuchung basiert auf der Marktanalyse und dem daraus abgeleiteten Anforderungsprofil. Das Gebäude mit der Bezeichnung "Sanierung MuKE" ist ein Mehrfamilienhaus (MFH) mit einem idealen Heizsystem. Die Modellierung erfolgte mit dem als "Type 56" bezeichneten Gebäudemodell in der Software TRNSYS. Es handelt sich um ein dreistöckiges, renoviertes Gebäude, das aus sechs Wohnungen besteht: 3 auf der Ostseite und weitere 3 auf der Westseite, wie in Abbildung 20 dargestellt (Mojic, et al. 2019). Im Simulationsmodell ist das Gebäude auf acht thermische Zonen aufgeteilt: sechs Wohnungen, der Keller und das Treppenhaus, welches die einzelnen Wohnungen miteinander verbindet. Andere Gebäude oder Objekte wie Bäume beschatten das Gebäude nicht. Ausserdem gibt es im Gebäude keine aktive Lüftung. Tabelle 5 zeigt die allgemeinen Spezifikationen des für die Simulation verwendeten Gebäudes.

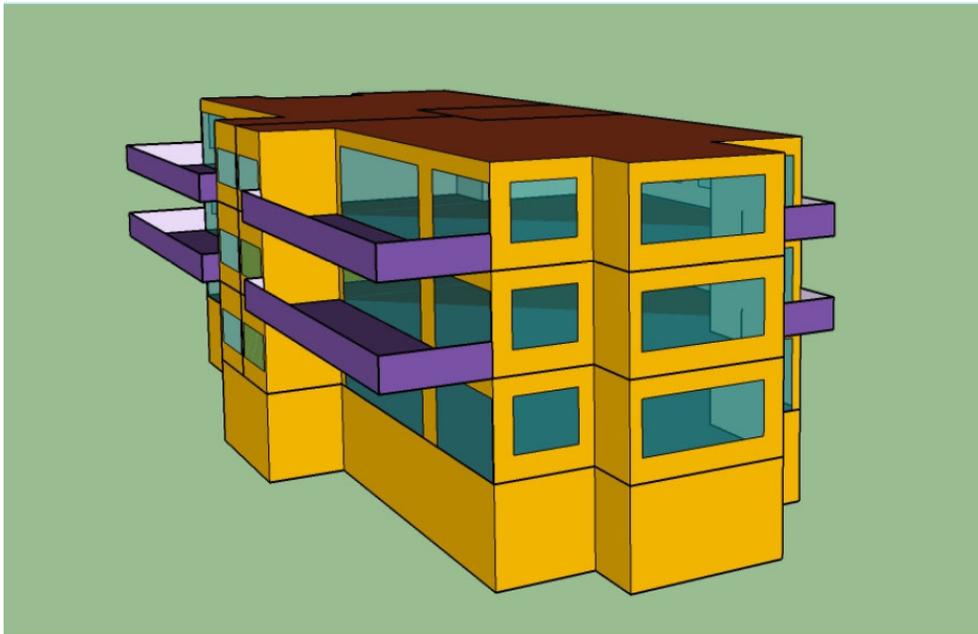


Abbildung 20: Simuliertes Mehrfamilienhaus "Sanierung MuKE" (Mojic, et al. 2019).

Tabelle 5: Allgemeine Merkmale des Gebäudes.

Energiebezugsfläche (EBF)	1'302 m ²
Nettogeschossfläche	1'103 m ²
Spezifischer Wärmebedarf	45 kWh/(m ² .a)
Gebäudehüllzahl	1.3



Tabelle 6 zeigt die beheizte Wohnfläche der einzelnen Wohnungen. Die in der Tabelle verwendete Nomenklatur zur Bezeichnung der einzelnen Wohneinheiten mit Ausrichtung und Zuordnung zu einem Stockwerk (z.B. 1OG_West für das Appartement mit Ausrichtung nach Westen im ersten Obergeschoss) wird im Weiteren verwendet.

Tabelle 6: Beheizte Wohnfläche der einzelnen Wohnungen.

	West	Ost
2. OG	2OG_West 148.9 m ²	2OG_Ost 167.8 m ²
1. OG	1OG_West 148.9 m ²	1OG_Ost 167.8 m ²
EG	EG_West 148.9 m ²	EG_Ost 167.8 m ²
Total	950.0	

Die Dachfläche des Gebäudes beträgt total ca. 360 m².

3.1.3 Nutzerprofile

Mit Hilfe des Programms LoadProfileGenerator (LPG) (Pflugradt 2018) wurden Profile für sechs Haushalte angelegt. Diese Profile enthalten Anwesenheitsprofile der jeweiligen Personen und Verbrauchsprofile sowohl für die elektrischen Haushaltsgeräte als auch für den Warmwasserbedarf. In Tabelle 7 ist eine Beschreibung der einzelnen Profile zu sehen, in Tabelle 8 deren Zuordnung zu den einzelnen Wohnungen.

Tabelle 7: Beschreibung der Haushaltstypen.

Bezeichnung	Beschreibung	Anzahl Personen [-]	Haushaltsstrom [MWh]
CHR44	Familie mit zwei Kindern, ein Elternteil berufstätig.	4	3.52
CHR33	Ehepaar, beide unter 30 Jahre.	2	2.88
CHS04	Ehepaar, beide im Ruhestand.	2	1.97
CHR27	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile berufstätig.	4	2.96
CHR18	Familie mit zwei Kindern, beide Elternteile zu Hause.	4	3.03
CHR55	Ehepaar, beide berufstätig.	2	2.40
Total		18	16.16



Tabelle 8: Zuordnung der Haushaltstypen zu den einzelnen Wohnungen im Gebäude.

	West	Ost
2. OG	CHR55	CHR18
1. OG	CHR27	CHS04
EG	CHR33	CHR44

Sowohl aus den Anwesenheitsprofilen der Personen als auch aus den elektrischen Profilen wurden interne Lasten für die Simulation der Gebäudelasten abgeleitet. Zur Bestimmung der Wärmelasten durch Personen dienen die Vorgaben aus der ISO 7730:2005 (im Durchschnitt 80 W sensible Wärmeabgabe pro Person). In Tabelle 9 sind die resultierenden jährlichen Wärmegewinne aufgrund von Belegung, Geräten und Beleuchtung der Wohnungen dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Lasten ist als Stundenwert im Anhang zu finden.

Tabelle 9: Jährliche interne Wärmegewinne aufgrund von Belegung, Geräten und Beleuchtung innerhalb der Wohnungen in kWh.

	2OG_West	2OG_Ost
Anwesenheit	207	591
Licht und Geräte	466	590
Total	673	1'187
	1OG_West	1OG_Ost
Anwesenheit	508	278
Licht und Geräte	576	383
Total	1'084	661
	EG_West	EG_Ost
Anwesenheit	235	546
Licht und Geräte	443	685
Total	678	1'231
	Total	
Anwesenheit	2'365	
Licht und Geräte	3'143	
Total	5'508	



Der Bedarf an Trinkwarmwasser (TWW) resultiert ebenfalls aus den mit dem LPG erstellten Nutzerprofilen, wo der Verbrauch auf Minutenbasis in Liter beschrieben ist. In Tabelle 10 ist der mittlere Tagesbedarf bei 35 °C sowie der Jahresverbrauch in kWh dargestellt.

Tabelle 10: Bedarf an Brauchwarmwasser in den einzelnen Wohneinheiten, als "an den Zapfstellen bezogene" Nutzenergie.

	2OG_West	2OG_Ost
Täglicher Bedarf 35 °C [l/d]	249	318
Jährlicher Bedarf ^(a) [kWh/a]	2622	3343
	1OG_West	1OG_Ost
Täglicher Bedarf 35 °C [l/d]	288	224
Jährlicher Bedarf [kWh/a]	3034	2354
	EG_West	EG_Ost
Täglicher Bedarf 35 °C [l/d]	184	377
Jährlicher Bedarf [kWh/a]	1939	3971

^(a) Wärmebedarf ohne Verluste.

3.1.4 Wärmebedarf

Der gesamte Wärmebedarf der einzelnen Wohnungen für Raumheizung bei idealer Heizung mit Solltemperatur 21 °C und Warmwasserbedarf gemäss Tabelle 10 ist in Abbildung 21 zu sehen.

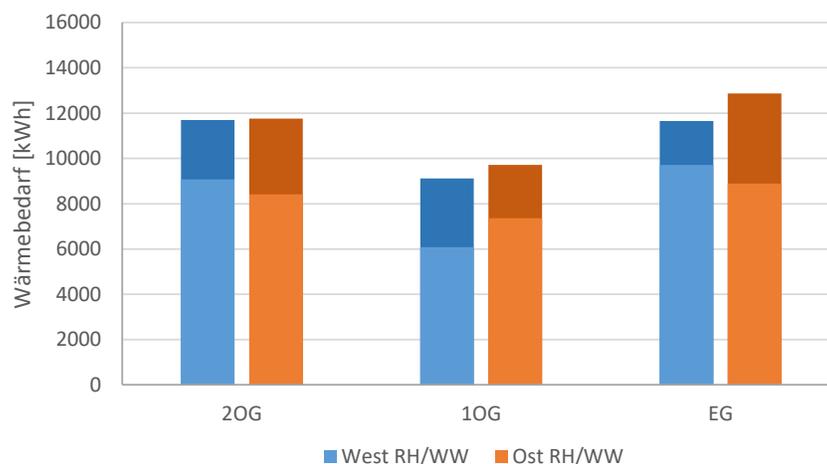


Abbildung 21: Wärmebedarf der Wohnungen für Raumheizung und Warmwasser, bei idealer Heizung und Raum-Solltemperatur von 21 °C.



3.1.5 Key Performance Indicators und Begriffserklärung

Folgende Kennwerte und Grössen werden als Key Performance Indicators (KPI) verwendet:

Arbeitszahl Heizsystem AZ_{HSys} [-]: Verhältnis Warmwasser- und Raumheizungsverbrauch zu elektrischem Energieverbrauch für das Heizsystem.

Arbeitszahl TWW $AZ_{WP,TWW}$ [-]: Verhältnis Warmwasserverbrauch zu elektrischem Energieverbrauch für die Wärmepumpe.

Autarkiegrad R_{aut} [%]: Verhältnis von Eigenverbrauch zu elektrischem Gesamtenergieverbrauch; Mass für die Unabhängigkeit vom öffentlichen Stromnetz.

Eigenverbrauch R_{eig} [%]: Verhältnis Eigenverbrauch zu PV-Ertrag.

Netzbezug W_{NB} [kWh]: aus dem öffentlichen Stromnetz bezogene elektrische Energie, basierend auf kleinstem Zeitschritt der Simulation (15 min) oder der Messung im Teststand (1 s).

Netzeinspeisung W_{NE} [kWh]: Anteil des PV-Ertrags, der ins öffentliche Stromnetz eingespeist wird, basierend auf kleinstem Zeitschritt der Simulation (15 min) oder der Messung im Teststand (1 s).

Netto-Nullenergie Gebäude: ist erreicht, wenn bilanziell über ein Jahr gleich viel Energie produziert wie verbraucht wird, d.h. PV-Ertrag und elektrischer Gesamtenergieverbrauch ist gleich hoch.

PV-Ertrag W_{PV} [kWh]: durch die PV-Anlage insgesamt selbst erzeugter PV-Strom (AC, d.h. nach dem Wechselrichter).

PV-Ertragsverhältnis R_{PV} [-]: Verhältnis von PV-Ertrag zu elektrischem Gesamtenergieverbrauch. Netto-Nullenergie Gebäude haben per Definition $R_{PV} = 1$, respektive 100 %.

3.2 Vergleich zentrale und dezentrale WP-Einheit

Zum Vergleich von zentralen und dezentralen Wärmepumpensystemen im Mehrfamilienhaus wurde eine Kombination aus Gebäudesimulationen mit der Software TRNSYS und Berechnungen des Heizsystems mittels Tabellenkalkulationen verwendet.

3.2.1 Zentrales Wärmepumpensystem

Hydraulisches Schema

Als Referenzsystem wurde ein zentrales Heizsystem mit einer Sole-Wasser Wärmepumpe definiert. Für die Warmwasserbereitung sind zwei in Serie geschaltene TWW-Speicher integriert, für die Raumheizung wurde ein Pufferspeicher integriert. In Abbildung 22 und Abbildung 23 ist das hydraulische Schema des Referenzsystems zu sehen.

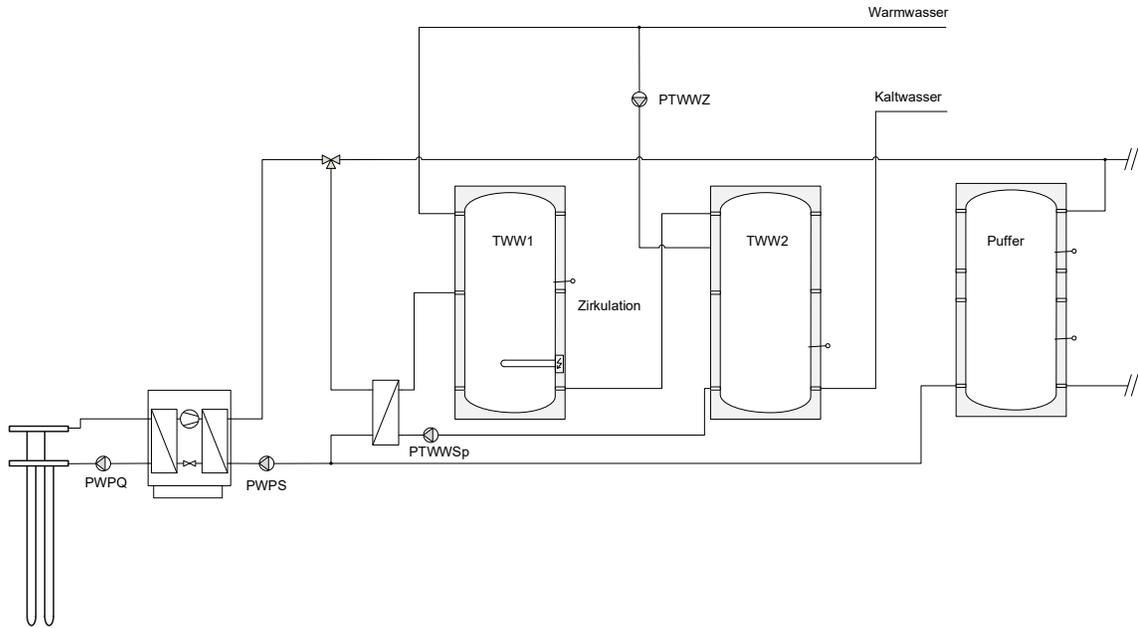


Abbildung 22: Hydraulikschema des zentralen Wärmepumpensystems: Wärmeerzeugung.

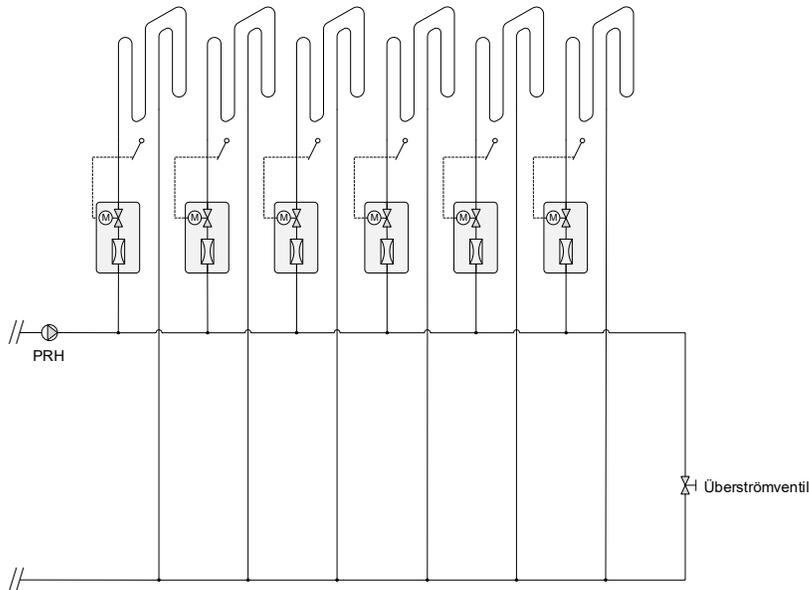


Abbildung 23: Hydraulikschema des zentralen Wärmepumpensystems: Heizkreisverteilung.

Eine zentrale Pumpe versorgt den Verteiler zu den einzelnen Wohneinheiten, die jeweils mit einem Thermostatventil versehen sind. Ein Überströmventil ist in das Heizkreislaufsystem integriert und den Druck konstant zu halten und zu vermeiden, dass die Pumpe gegen ein geschlossenes Ventil arbeitet. Um die TWW-Leitungen zu den Wohnungen warm zu halten ist eine Zirkulationsleitung integriert. Der Rohrdurchmesser ist so gewählt, dass die Strömungsgeschwindigkeit sowohl in der TWW- als auch in der SH-Verteilung maximal 1 m/s beträgt. Tabelle 11 zeigt den für die verschiedenen Pumpen im System definierten nominalen Massendurchsatz.



Tabelle 11: Nominale Massenströme der Pumpen im System.

Beschreibung		Massenstrom
		[kg/h]
PWPQ	WP Quellseite	5'000
PWPS	WP Senkeseite	5'000
PTWWSp	Beladekreis TWW Speicher	3'000
PRH	Heizkreispumpe	4'800
PTWWZ	TWW Zirkulationspumpe	100

Solltemperaturen für Brauchwarmwasser und Raumheizung

Die Beladung der TWW-Speicher wird über zwei Temperaturfühler geregelt. Die Ausschalttemperatur beträgt 60 °C mit einer Hysterese von 3 K.

Die Heizperiode startet, wenn der 24-Stunden Mittelwertes der Aussentemperatur 15 °C unterschreitet, und endet, wenn diese Temperatur über 16 °C steigt. Während der Heizperiode geht die Wärmepumpe in den Raumheizungsmodus über, wenn die Temperatur des Speichers unter den aktuellen Vorlaufswert sinkt, sofern sie nicht durch den TWW-Modus übersteuert wird (TWW-Priorität). Die Vorlauf- und Rücklaufswerttemperaturen für die Raumheizung bei Referenzbedingungen ($T_{ambD} = -9,8 \text{ °C}$, $T_{Sole} = 3 \text{ °C}$, $T_{Raum} = 21 \text{ °C}$) betragen 35/30 °C. Der tatsächliche Vorlaufswert wird anhand einer Heizkurve berechnet, welche den Tages-Mittelwert der Aussentemperatur ($T_{amb,24}$), den tatsächlichen Raumtemperatur-Sollwert und den Heizkörper-Exponenten ($n = 1,1$) berücksichtigt. Für verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Raumtemperatursollwerten der Wohnungen wird der Vorlaufswert bei Referenzbedingungen (und damit die Heizkurve) auf der Grundlage der Wärmeübertragungsleistung der Fussbodenheizung und des idealen Wärmebedarfs für die einzelnen Wohnungen berechnet (vgl. Anhang C). Bei der zentralen Heizungsanlage gibt es nur einen Vorlaufswert. Dieser wird jeweils durch die Wohnung mit dem höchsten Vorlaufswertbedarf bestimmt. Bei individuellen Heizsystemen für jede Wohnung kann für jede Wohnung eine eigene Heizkurve verwendet werden, die an die Bedürfnisse der jeweiligen Wohnung angepasst ist.

Dimensionierung der Wärmepumpe

Die Dimensionierung der Wärmepumpe für das zentrale Heizsystem erfolgte basierend auf dem Wärmebedarf des oben beschriebenen Gebäudes. Ziel der Auslegung war ein Modell, welches den Wärmebedarf mit 2500 Volllaststunden decken kann. Der gesamte Raumwärmebedarf (inkl. Verluste) im Gebäude beträgt rund 58 MWh. Unter Berücksichtigung der Volllaststunden von 2500 für den Wärmepumpenbetrieb ergibt sich eine Wärmepumpenleistung von 23.11 kW. Es wurde das Modell Opti Heat Inverta (OHI) 17e der CTA AG mit einer Leistung von 25.6 kW bei einer Verdichterdrehzahl von 70 rps als Basis der Berechnungen ausgewählt.



Tabelle 12: Parameter der Wärmepumpe OHI 17e der CTA AG.

Wärmepumpen Modell	OHI 17e		
Geräteart	Sole/Wasser		
B0/W35			
Heizleistung	kW	9.5 -35.0	
COP	-	4.9	
Leistungsaufnahme (ohne Elektroinsatz)	kW	3.4	
B0/W55			
Heizleistung bei B0/W55	kW	8.5 – 32.0	
COP bei B0W55	-	2.8	
Leistungsaufnahme (ohne Elektroinsatz)	kW	5.3	
Volumenstrom nominal Quelle	[m ³ /h]	3.4	
Volumenstrom nominal Heizung	[m ³ /h]	2.1	

Abbildung 24 zeigt den COP der Inverter geregelten Sole-Wärmepumpe in Abhängigkeit der Verdichterdrehzahl und der Kondensatoraustrittstemperatur.

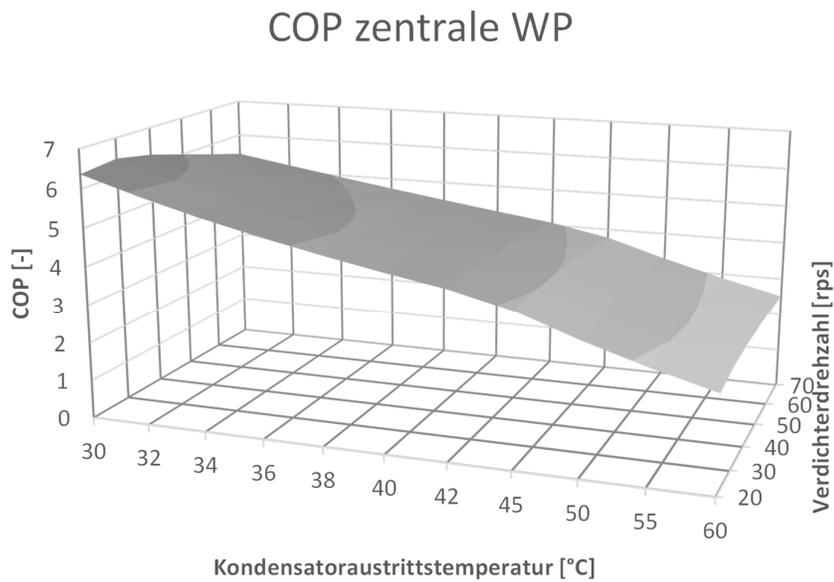


Abbildung 24: COP der Sole-Wärmepumpe im zentralen Heizsystem in Abhängigkeit der Kondensatoraustrittstemperatur und der Verdichterdrehzahl.



Dimensionierung der Speicher

Die Grösse des Warmwasserspeichers wurde auf der Grundlage des Spitzenwarmwasserbedarfs von 60 Normliter pro Person und Tag bestimmt (SIA 385/2). Im hier vorliegenden Fall resultiert eine Speichergrosse von 1080 l. Die nächsthöhere Grösse eines bei der Firma CTA erhältlichen Speichers beträgt 1250 l mit einer Speicherhöhe von 2.24 m (mit Isolierung) und einem Kippmass von 2.26 m. Da ein Speicher dieser Grösse in üblichen Raumhöhen im Keller nicht aufgestellt werden kann wurden stattdessen zwei Speicher mit jeweils einem Volumen von 600 l ausgewählt.

Der Heizungspuffer wurde nach der Empfehlung von STASCH & WPSM von 35 l/kW dimensioniert. Mit der gegebenen Wärmepumpe resultiert eine Grösse von 853.5 l. Entsprechend wurde ein Modell mit 850 l Inhalt bei einem Durchmesser von 0.79 m ausgewählt.

Leitungslängen

Die Leitungslängen für die Installation im Kellerraum sowie für die Heizwärmeverteilung sowie TWW-Zirkulation wurden aus den Gebäudedimensionen abgeleitet. Die Aufteilung der einzelnen Stränge auf Zonen im Gebäude und den Zweck (z.B. TWW-Zirkulation) wurde entsprechend der Grafik in Abbildung 25 vorgenommen.

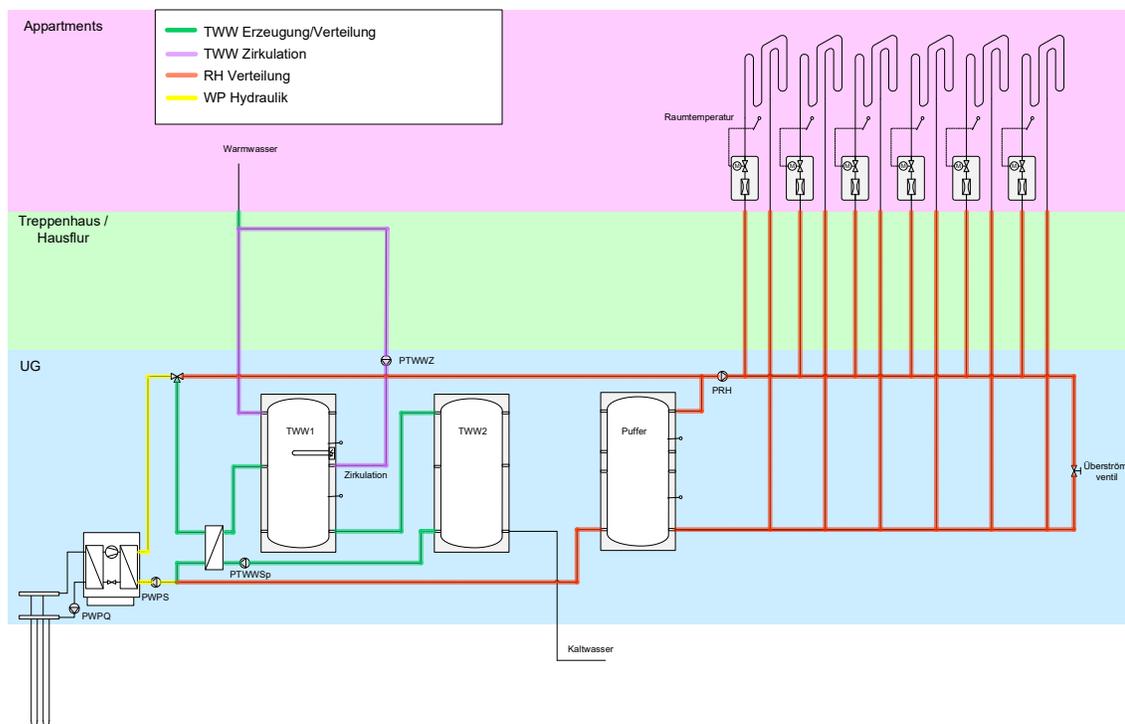


Abbildung 25: Hydraulisches Schema des zentralen Heizsystems mit Aufteilung der Rohrleitungen in Gruppen und räumlicher Zuteilung zu Zonen im Gebäude.

Tabelle 4 1 in Anhang C fasst die Rohrlänge, den Durchmesser und die Lage der Rohre im UG (Keller) oder im Treppenhaus für alle Rohrsysteme (Verflüssigerkreislauf der Wärmepumpe, Verteiler- und Zirkulationskreislauf des TWW und Verteilerkreislauf der Raumheizung) zusammen. Die Unterscheidung der thermischen Zonen im Gebäude erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Temperaturen, die in den jeweiligen Zonen angenommen werden.



3.2.2 Dezentrale Wärmepumpeneinheiten

Hydraulisches Schema

Die dezentrale Wärmepumpeneinheit ist ein kompaktes System mit TWW-Speicher und WP in einem Gehäuse. Der TWW-Speicher wird über einen internen Wärmeübertrager beladen, die Raumwärme wird direkt (ohne Puffer) an das Heizsystem geliefert. Abbildung 26 zeigt ein vereinfachtes hydraulisches Schema des Systems.

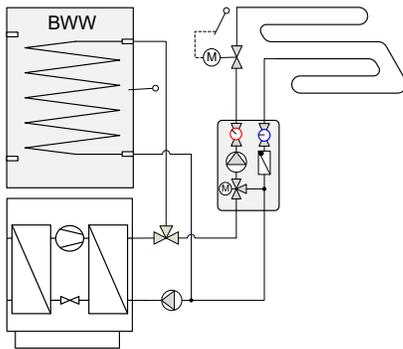


Abbildung 26: Hydraulisches Schema einer dezentralen Wärmepumpeneinheiten.

Solltemperaturen für Brauchwarmwasser und Raumheizung

Die Ausschalttemperatur im TWW-Speicher beträgt 55 °C.

Das Heizsystem ist auf eine Temperatur von 35/30 °C ausgelegt, die Berechnung der aussentemperaturabhängigen Vorlauf Solltemperatur erfolgt analog zur Berechnung im zentralen Heizsystem, dabei wird die Raumsolltemperatur der jeweiligen Wohneinheit berücksichtigt.

Dimensionierung der Systemkomponenten

Als Basis der Berechnungen wurde ein kompaktes Wärmepumpenmodell mit integriertem Boiler der Firma CTA AG ausgewählt. Das Modell Optiheat Inverta (OHI) 4esr TWW ist mit einem Leistungsbereich von 2.0 – 7.5 kW bei B0/W35 gut auf den Wärmebedarf in einer einzelnen Wohneinheit abgestimmt. Die Basisdaten des Modells sind in Tabelle 13 zusammengefasst, der COP in Abhängigkeit der Kondensatoraustrittstemperatur und der Verdichterdrehzahl ist in Abbildung 27 zu sehen.



COP dezentrale WP @ $T_{\text{Quelle}} = 3 \text{ }^\circ\text{C}$

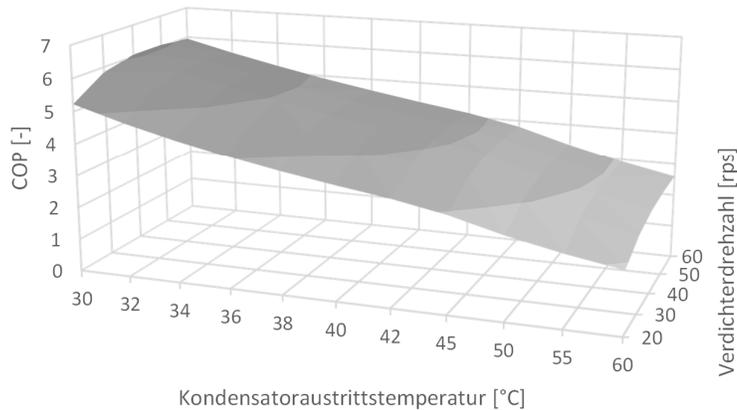


Abbildung 27: COP der Sole-Wärmepumpen der dezentralen Heizsysteme in Abhängigkeit der Kondensatoraustrittstemperatur und der Verdichterdrehzahl.

3.2.3 Wärmeverluste

Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgte für das zentrale wie auch für das dezentrale System in ähnlicher Weise mit Hilfe von Tabellenkalkulationen in Excel. Die Formeln zur Berechnung von Rohrleitungs- und Speicherverlusten sind in Anhang C aufgeführt. In den folgenden Berechnungen wurden jeweils die Umgebungstemperaturen berücksichtigt, die in Tabelle 14 dargestellt sind. Für alle Rohrleitungsverluste wird eine Wärmeleitfähigkeit von $0.034 \text{ W}/(\text{mK})$ angenommen.

Tabelle 13: Parameter der Wärmepumpe Optiheat I 4esr TWW der CTA AG.

Wärmepumpen Modell	Optiheat I 4esr TWW	
Geräteart	Sole/Wasser	
B0/W35		
Heizleistung	kW	3.8
COP	-	4.7
Leistungsaufnahme (ohne Elektroinsatz)	kW	0.8
B0/W55		
Heizleistung bei B0/W55	kW	3.2
COP bei B0/W55	-	2.7
Leistungsaufnahme (ohne Elektroinsatz)	kW	1.2
Volumenstrom nominal Quelle	$[\text{m}^3/\text{h}]$	0.77
Volumenstrom nominal Heizung	$[\text{m}^3/\text{h}]$	0.47



Tabelle 14: Temperaturen in den thermischen Zonen des Gebäudes.

Wohnung	[°C]	21 – 25
Treppenhaus	[°C]	15
Keller	[°C]	12

Warmwasser-Verteilung und Zirkulationsverluste

Für die Berechnung der Wärmeverluste der Warmwasserverteilung und der Zirkulation die nur im zentralen System auftreten wird die Vor- und Rücklaufemperatur mit 60 °C bzw. 55 °C angenommen. Die Gesamtröhlänge für die Verteilung des TWW beträgt 11 m und für die Zirkulation 54 m (vgl. Tabelle 32 in Anhang B).

Raumheizungs-Verteilung

Ebenso wie die TWW-Zirkulation ist die Raumheizungsverteilung nur im zentralen System relevant. Die Gesamtlänge der Leitungen für die Raumwärmeverteilung an die sechs Wohnungen beträgt etwa 120 m. Die einzelnen Röhlängen, -durchmesser und -dämmstärken sind in Tabelle 32 in Anhang B aufgeführt. Abbildung 28 zeigt die berechneten täglichen Vor- und Rücklaufemperaturen der Raumheizung im Standardfall mit einer Raumsolltemperatur von 21 °C.

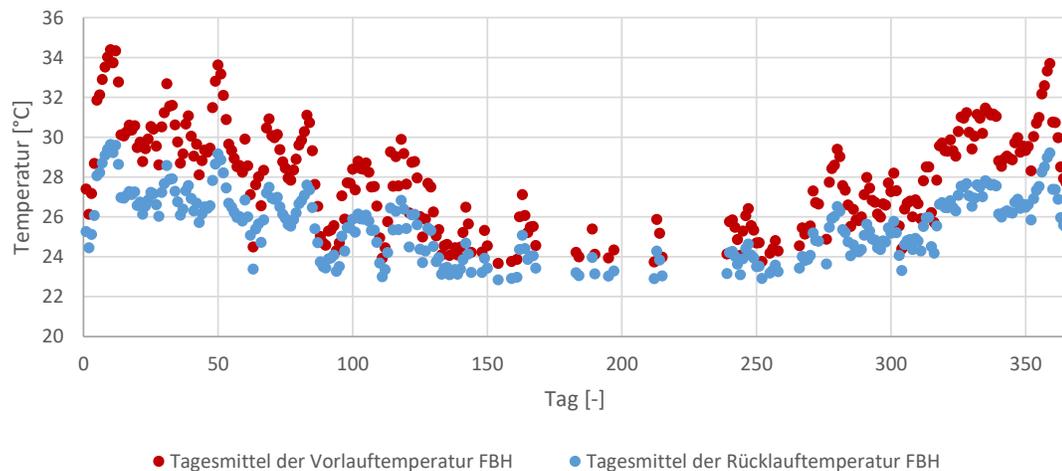


Abbildung 28: Tagesmittelwerte der Vor- und Rücklaufemperaturen der Raumheizung während der Heizsaison.

Speicherverluste

Die Speicherverluste setzen sich aus den Verlusten über die Oberfläche des Speichers und den Wärmeverlusten über nicht siphonierte Anschlüsse zusammen. Als Isolationsmaterial wird bis zu einem Volumen von 600 l eine fix geschäumte PUR Isolation mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.027 W/(mK) angenommen, bei grösseren Speichern eine abnehmbare Isolation aus Hartschalen in Kombination mit einem Vlies mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0.034 W/(mK). Die Verluste durch nicht siphonierte Anschlüsse werden mit 0.25 W/K in den Warmwasserspeichern bzw. 0.14 W/K im Pufferspeicher angenommen (Steinweg, et al. 2013). Eine Übersicht über die Parameter inklusive Dämmstärken und die resultierenden Wärmeverluststraten der verschiedenen Speicher ist in Tabelle 15 zu sehen.



Tabelle 15: Parameter der thermischen Speicher.

		Brauchwarm- wasser (zentral)	Brauchwarm- wasser (dezent- ral)	Heizungspuffer zentral
Anzahl	[-]	2	6	1
Volumen	[l]	600	220	850
Oberfläche	[m ²]	6.12	4.29	7.57
Wärmeleitfähigkeit	[W/(mK)]	0.027	0.027	0.034
Isolationsstärke	[mm]	60	60	100
Anzahl nicht siphonierter Anschlüsse	[-]	2 ^(a)	1	2
Wärmeverlustkoeffizient eines nicht siphonierten Anschlusses ^(b)	[W/K]	0.25 ^(b)	0.25 ^(b)	0.14 ^(c)
Wärmeverlustkoeffizient des Speichers ^(d)	[W/K]	3.31	1.45	2.36

^(a) je zwei nicht siphonierte Anschlüsse pro TWW-Speicher.

^(b) bei 65 °C

^(c) bei 40 °C

^(d) Verluste über Speichermantel inklusive der Anschlüsse.

3.2.4 Effizienz der Wärmepumpe

Für die Berechnung der elektrischen Leistungsaufnahme der Wärmepumpe wird die Soletemperatur mit 3 °C festgelegt. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf am Verdichter beträgt 3 K und diejenige am Verdampfer 5 K.

Tabelle 16: Randbedingungen zur Berechnung der Wärmepumpe.

Sole	3 °C
ΔT Verdichter	3 K
ΔT Verdampfer	5 K

Im Raumheizungsmodus wird die Arbeitszahl der Wärmepumpe auf Tagesbasis ermittelt, wobei sowohl die mittlere tägliche Vorlauftemperatur als auch der Leistungsbedarf berücksichtigt wird. Dazu wird diejenige Kompressordrehzahl im Bereich zwischen 20 und 70 rps in einer Schrittweite von 10 rps ermittelt, die bei der nötigen Vorlauftemperatur den Tagesbedarf für Raumwärme decken kann.

Dabei wird angenommen, dass im Falle des zentralen Heizsystems eine Überhöhung von 2 K gegenüber der nach Heizkurve bestimmten Vorlauftemperatur notwendig ist, um Verteilverluste der Verteilung



zu decken. Im Fall der dezentralen Heizsysteme wird direkt die nach Heizkurve bestimmte Vorlauftemperatur verwendet. Der COP dieser Betriebsbedingungen fließt als Tagesarbeitszahl in die Berechnungen ein. In Abbildung 29 sind die Tageswerte im Jahresverlauf für den Basisfall im zentralen Heizsystem dargestellt.

Die Berechnung der Arbeitszahl der Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung erfolgt unter folgenden Annahmen:

- Die Beladung des Speichers erfolgt mit konstant ansteigender Temperatur, mit Start bei 20 °C.
- Die WP muss eine Temperaturüberhöhung von 5 K gegenüber der Speichertemperatur liefern, um Temperaturverluste durch den Wärmeübertrager sowie Schichtungsverluste zu kompensieren.
- Die WP erreicht eine maximale Austrittstemperatur von 60 °C.
- Für das zentrale Heizsystem mit einer TWW-Solltemperatur von 60 °C im Speicher wird die verbleibende Temperaturdifferenz zum Erreichen der angestrebten Speichertemperatur direkt elektrisch umgesetzt.
- Die Beladung erfolgt aus Effizienzgründen mit einer auf 50 rps reduzierten Kompressordrehzahl.

In Tabelle 17 sind die unter diesen Annahmen bestimmten Tages-Arbeitszahlen für den Raumheizungs-betrieb gezeigt.

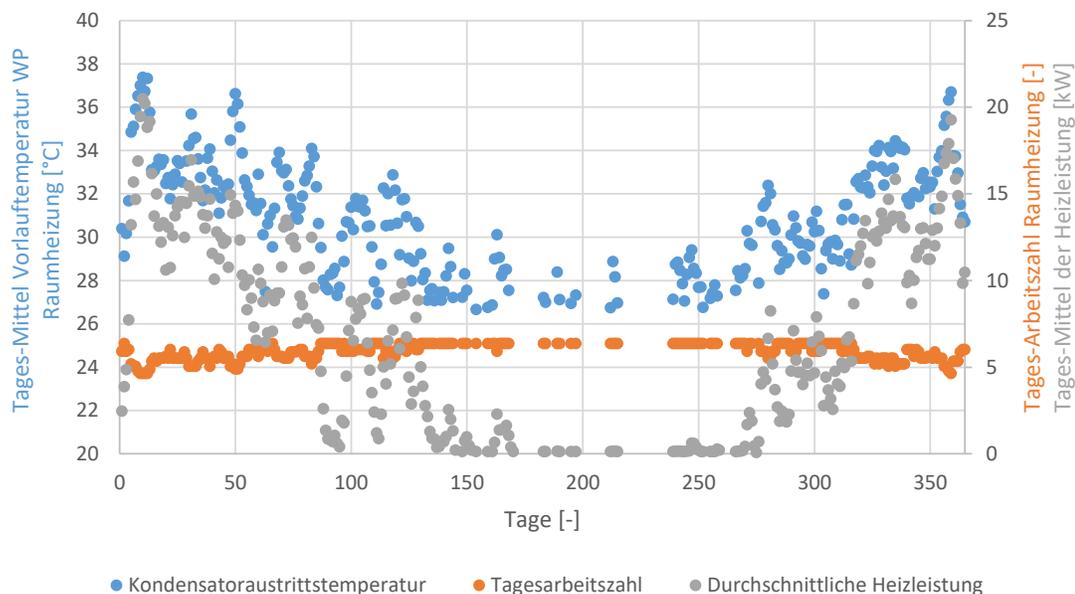


Abbildung 29: Vorlauftemperatur, Leistung und Arbeitszahl der Raumwärmeversorgung im Tagesmittel.



Tabelle 17: Berechnung der Arbeitszahl der Brauchwarmwasserbereitung bei einer Kompressordrehzahl von 50 rps.

Kondensatoraustritts- temperatur [°C]	erreichte TWW Speichertemperatur(°C)	zentral		dezentral		
		COP	∅-COP	COP	∅-COP	
25	20	6.78		7.32		
30	25	5.93		6.05		
35	30	5.15		5.14		
40	35	4.46	4.35	4.41	4.46	
45	40	3.84		3.97		3.83
50	45	3.30		3.36		
55	50	2.85		2.96		
60	55	2.47		2.6		
65	60	1 ^(a)		-		

(a) Der COP wird bei Austrittstemperaturen ≥ 60 °C mit 1 angenommen (Elektroheizung).

3.2.5 Resultate

Zentrales Heizsystem

Der gesamte Wärmebedarf des Mehrfamilienhauses beträgt 66.8 MWh ohne Verluste, bestehend aus 49.6 MWh Heizwärmebedarf und 17.3 MWh Warmwasserbedarf. Die Verluste betragen insgesamt 9.0 MWh bzw. 13 % des Wärmebedarfes. Die Verluste im TWW-Teil aus Speicherung und der Verteilung (inklusive der Zirkulation) sind mit 7.4 MWh der grösste Anteil der Verluste. In Abbildung 30 ist die Aufteilung der Verluste für TWW und RH dargestellt.

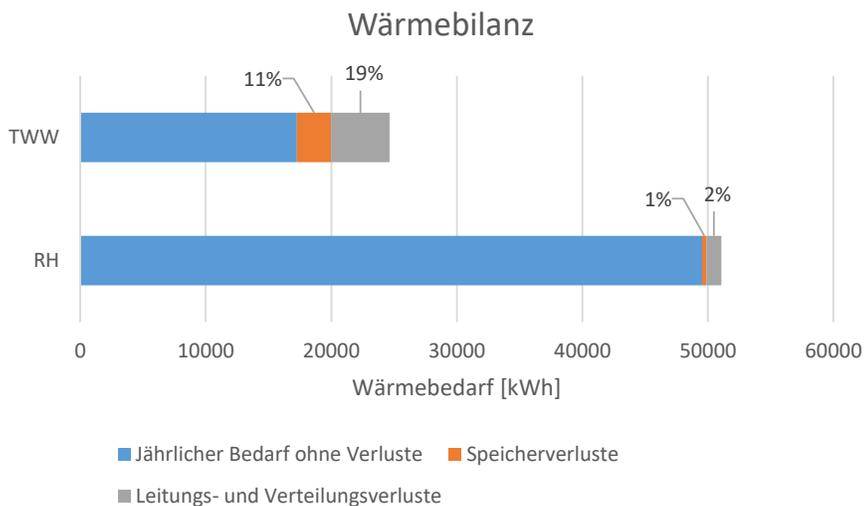


Abbildung 30: Wärmebilanz des Gebäudes und des Warmwassersystems mit zentralem Heizsystem.



Jährlicher Strombedarf (WP + Heizstab)

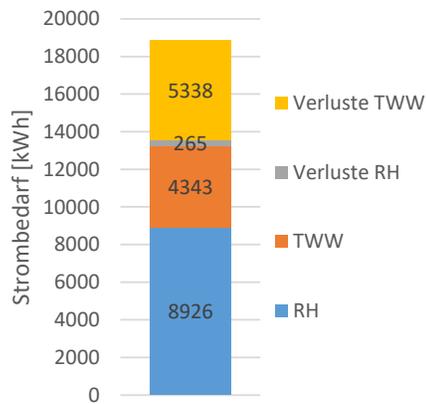


Abbildung 31: Jährlicher Strombedarf des zentralen Heizsystems.

Der jährliche Strombedarf des zentralen Heizsystems ist in Abbildung 31 dargestellt. Dieser wurde aufgeteilt in den Strombedarf zur Deckung des Wärmebedarfs für Raumheizung und Warmwasser sowie zur Deckung der Verluste von Raumheizung und Warmwasser.

Im Fall der Raumheizung betragen die Verluste mit 265 kWh ca. 3 % des Strombedarfs zur Deckung des Wärmebedarfs. Bei der Warmwasserbereitung übersteigt der Strombedarf zur Deckung der Verluste denjenigen zur Deckung des Wärmebedarfes. Grund dafür ist die Annahme, dass hohe Speichertemperaturen (60 °C) nötig sind zur Erfüllung der hygienischen Anforderungen der Zirkulation gemäss SIA 385/1:2020, und diese direkt elektrisch gedeckt werden müssen. Auch die Zirkulationsverluste werden letztendlich direkt elektrisch gedeckt, da sie in einem Temperaturbereich anfallen der von dieser Wärmepumpe nicht erreicht werden kann.

In Abbildung 32 sind die Jahreszahlen des zentralen Heizsystems inklusive Warmwasser zu sehen. Insgesamt ergibt sich eine Jahresarbeitszahl von 4.01.

Jahresarbeitszahlen (JAZ)

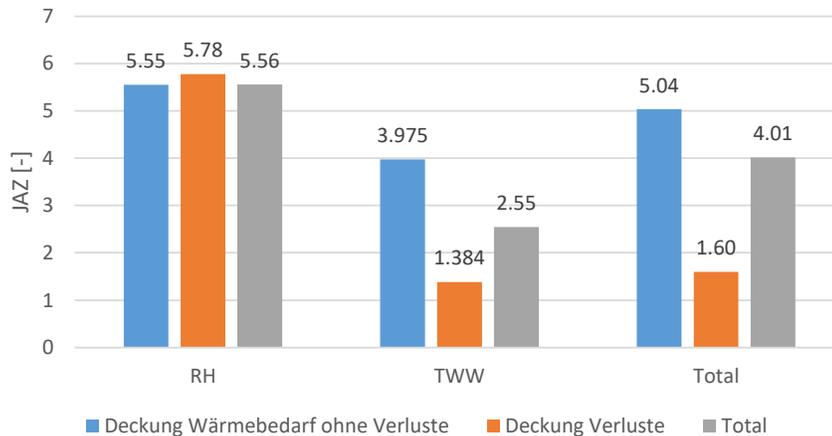


Abbildung 32: Jahresarbeitszahlen des zentralen Heizsystems inklusive Warmwassersystem.



Dezentrales Heizsystem

Der gesamte Wärmebedarf des Mehrfamilienhauses mit dezentralen Heizsystemen bleibt unverändert bei 66.8 MWh ohne Verluste, bestehend aus 49.6 MWh Heizwärmebedarf und 17.3 MWh Warmwasserbedarf. Die Verluste betragen insgesamt 2.9 MWh bzw. 4 % des Wärmebedarfes. Die Wärmeverluste der identischen TWW-Speicher betragen jeweils 494 kWh. Da diese innerhalb der beheizten Wohnfläche auftreten werden diese als interne Lasten im Gebäude behandelt und tragen entsprechend ihrer Saisonalität zur Gebäudeheizung bei. Abbildung 33 zeigt die Wärmebilanz des Gesamtsystems.

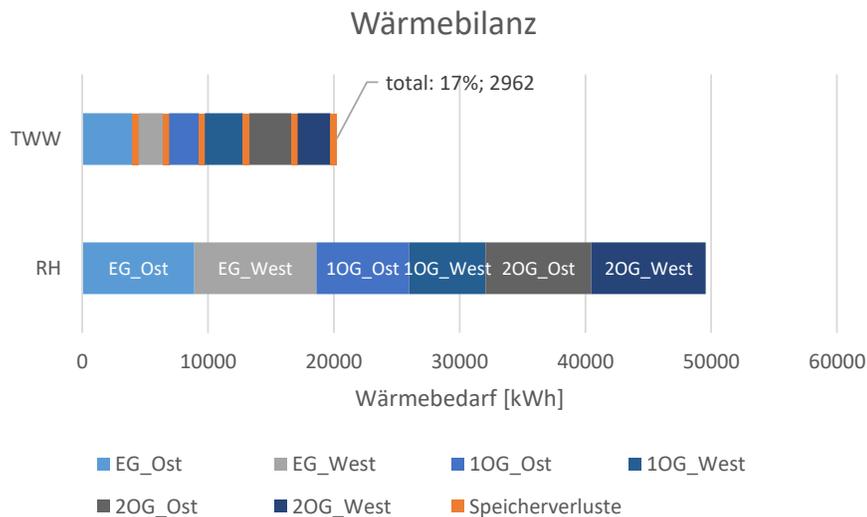


Abbildung 33: Wärmebilanz des Gebäudes mit dezentralen Heizsystemen, inklusive Warmwasser.

Der jährliche Bedarf an elektrischer Energie der dezentralen Heizsysteme in den Berechnungen mit einer Raumsolltemperatur von 21 °C ist in Abbildung 34 dargestellt. Insgesamt beträgt der Strombedarf 13.8 MWh. Zur Deckung der Verluste werden 664 kWh benötigt, die sich gleichmässig auf die einzelnen Wohnungen aufteilen. Der Strombedarf zur Warmwasserbereitung variiert zwischen 435 und 891 kWh, der Strombedarf für die Raumwärme variiert zwischen 1159 und 1849 kWh. Klar ersichtlich ist, dass diejenigen Wohnungen, welche im mittleren Geschoss sind auf Grund ihrer Sandwichlage mit beheizten Räumen darüber und darunter deutlich weniger Heizwärmebedarf und in der Folge auch weniger elektrischen Energiebedarf haben.

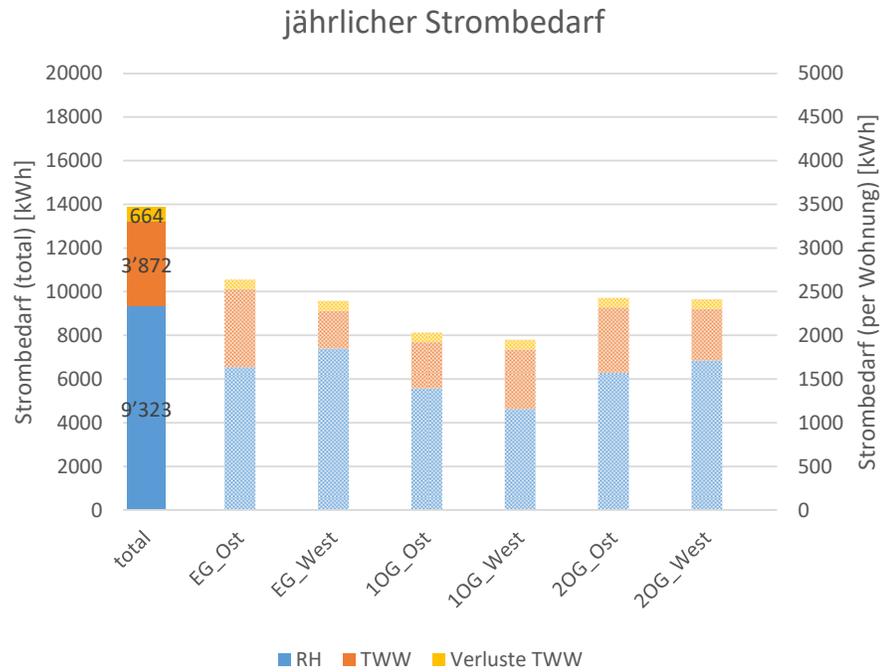


Abbildung 34: Jährlicher Strombedarf der dezentralen Heizsysteme für Raumheizung und Warmwasser.

Die Jahresarbeitszahlen der sechs einzelnen dezentralen Heizsysteme sind in Abbildung 35 dargestellt.

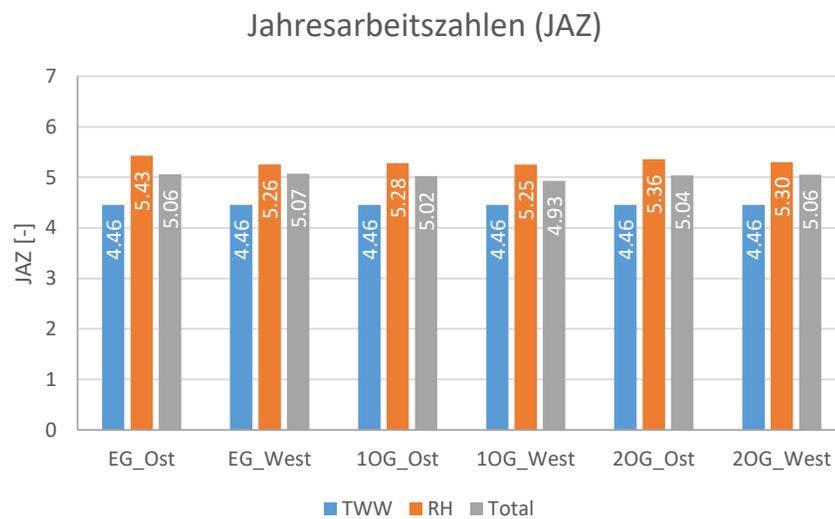


Abbildung 35: Jahresarbeitszahlen der dezentralen Heizsysteme.



Variation der Raumsolltemperatur

Ein wesentlicher Vorteil der dezentralen Systeme ist, dass unterschiedliche Komfortansprüche der Bewohner auch exakt bedient werden können. So führt zum Beispiel ein höherer Raumtemperatur-Sollwert für eine der Wohnungen im Obergeschoss nicht zu einer generellen Erhöhung der Heizkreis-Vorlauf-temperatur, da die anderen Wohnungen unabhängig davon bedient werden können. Entsprechend ist zu erwarten, dass der Vorteil der dezentralen Systeme vor allem dann zum Tragen kommt, wenn die Ansprüche an die Raum-Solltemperaturen in den einzelnen Wohnungen deutlich unterscheiden.

Zur Untersuchung des Einflusses der Raumsolltemperaturen auf die Resultate wurden Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, in welchen unterschiedliche Solltemperaturen für die einzelnen Wohnungen zufällig im Bereich 21 – 25 °C (in ein-Grad-Schritten) angenommen wurden. Abbildung 36 zeigt die Raumsolltemperaturen der ersten vier Durchgänge.

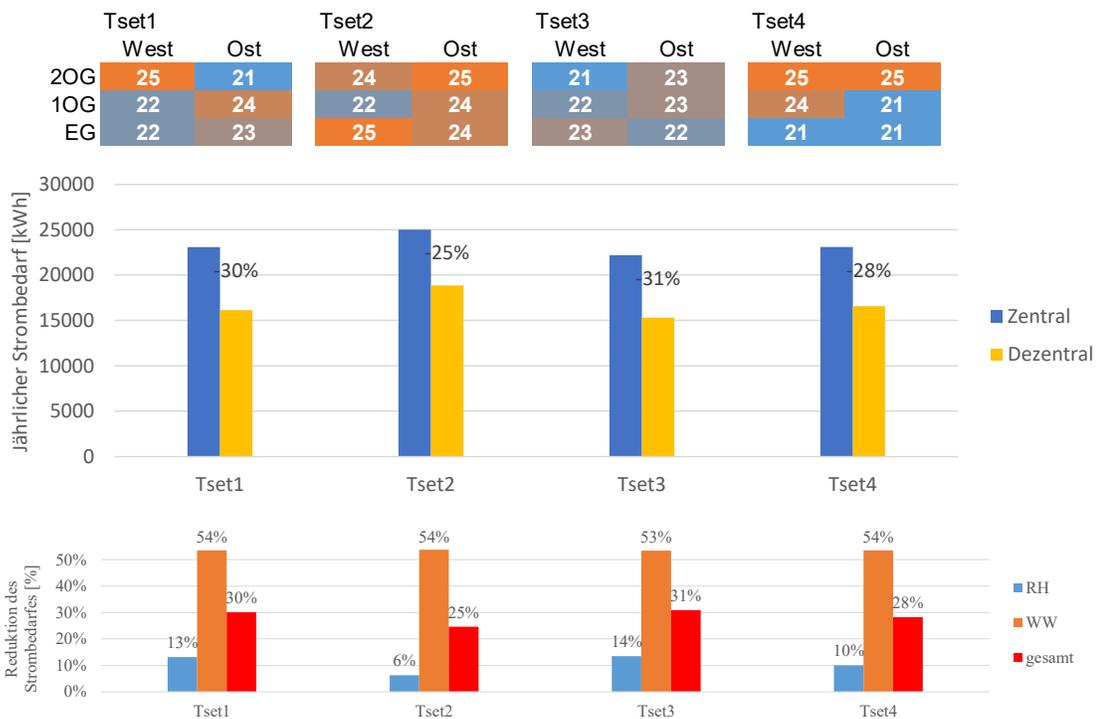


Abbildung 36: Raumsolltemperaturen der sechs Wohneinheiten auf Grund der Monte-Carlo Simulationen und die Erreichten Einsparungen.

Auf Grund der verschiedenen Temperatur-Sollwerte wurde sowohl ein zentrales als ein dezentrales System simuliert und die Resultate wurden miteinander verglichen (Tabelle 18). Diese zeigen, dass das dezentrale System gegenüber dem zentralen System je nach Situation, d.h. in Abhängigkeit der Komfort-Präferenzen der Bewohner, eine Reduktion des elektrischen Energiebedarfs für die Wärmepumpe(n) zwischen 24 % und 31 % erreicht.



Tabelle 18: Resultate der Monte-Carlo Simulationen.

	Tset1		Tset2		Tset3		Tset4	
	Zentral	Dezentral	Zentral	Dezentral	Zentral	Dezentral	Zentral	Dezentral
Brauchwarmwasser								
Wärmebedarf	17262	17262	17262	17262	17262	17262	17262	17262
Speicherverluste	2735	2802	2735	2700	2735	2846	2735	2802
Leitungs- und Verteilungsverluste	4650	-	4650	-	4650	-	4650	-
Raumheizung								
Wärmebedarf	62750	62750	71978	71978	58530	58530	62896	62896
Verluste	1757	0	2015	0	1639	0	1761	0
Strombedarf								
TWW	9681	4500	9681	4478	9681	4510	9681	4500
RH	13384	11625	15332	14380	12507	10814	13413	12070
Total	23065	16125	25013	18857	22188	15325	23094	16571
Reduktion elektrische Energie		30%		25%		31%		28%



3.2.6 Diskussion des Vergleichs zentral vs. dezentral

Arbeitszahl der Warmwasserbereitung

Im BFE-geförderten Projekt DHWStrat¹ wurde die Schichtungseffizienz verschiedener WW-Speicher bestimmt. Dabei wurde eine Methode verwendet, die realitätsnahe Be- und Entladevorgänge garantiert. Es wurden sieben Messungen an monovalenten Speichern durchgeführt. Der Durchschnitt der mittleren, nach Leistung gewichteten Vorlauftemperaturen der Beladung durch eine WP betrug 45.8 °C wobei die ab Speicher gelieferte Warmwassertemperatur in allen Fällen > 50 °C war. Bezogen auf die in Abbildung 37 gezeigte Abhängigkeit des COP von der WP-Vorlauftemperatur kann davon ausgegangen werden, dass die Arbeitszahl der WW-Bereitung 3.75 betragen hätte. Im Vergleich dazu ist die im vorliegenden Projekt durch Berechnungen ermittelte Arbeitszahl der WW-Bereitung durch die WP mit 4.35 hoch. Dies würde einer WW-Bereitung mit einer durchschnittlichen Vorlauftemperatur von ca. 41 °C entsprechen (vgl. Abbildung 37).

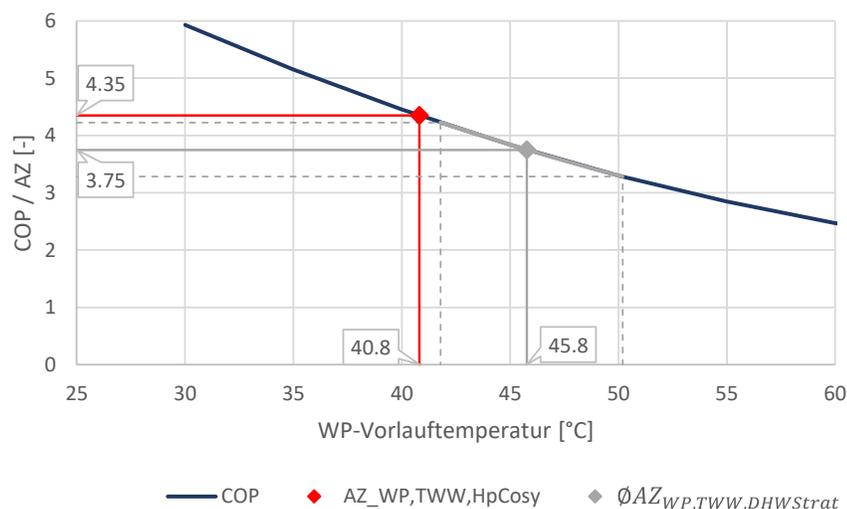


Abbildung 37: COP und Arbeitszahlen der WW-Ladung in Abhängigkeit der mittleren Vorlauftemperatur während der Beladung.

Betriebskosten

Die Berechnungen des Strombedarfs zur Deckung des Wärmebedarfes des ausgewählten Gebäudes mit sechs Wohneinheiten ergaben einen Verbrauch von total 19.1 MWh mit einem zentralen Heizsystem und 13.9 MWh mit dezentralen Heizsystemen. Im Jahr 2022 bezahlten Haushaltskunden in der Schweiz durchschnittlich 21 Rappen pro Kilowattstunde Strom (Statista 2023). Dies entspricht jährlichen Energiekosten zur Deckung des Wärmebedarfes von CHF 4019 mit zentralem Heizsystem bzw. CHF 2910 mit dezentralen Systemen.

Für die dezentralen Systeme können die Stromkosten detailliert je Wohnung, direkt gekoppelt an den Verbrauch bestimmt werden. Diese betragen zwischen 409 Franken im 1. OG, West und 554 Franken im EG, Ost (vgl. Abbildung 38). Bei abweichenden Raum-Solltemperaturen erhöhen sich die Kosten in der jeweiligen Wohnung.

¹ Forschungsprogramm Solarthermie und Wärmespeicher, Vertrags-Nr.: SI/500315-03, www.spf.ch/dhwstrat.

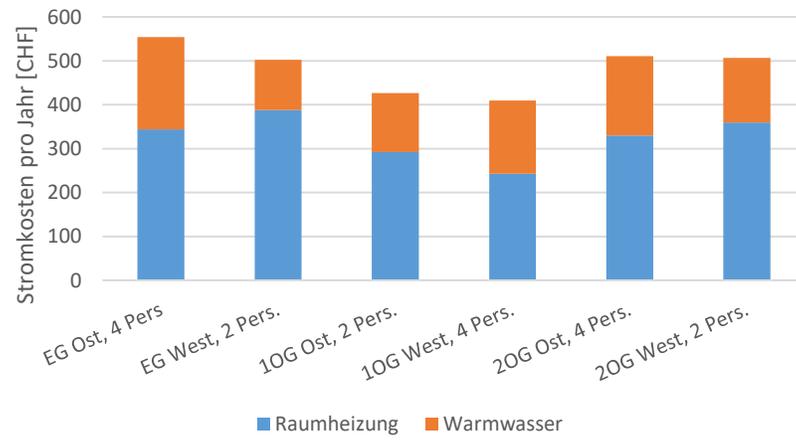


Abbildung 38: Stromkosten der einzelnen Wohnungen nach den Berechnungen aus Kapitel 3.2 mit 21 Rp/kWh_{el}.



3.3 Simulationen der dezentralen Systeme

3.3.1 Übersicht

Die Simulationen mehrerer Einzelsysteme im Mehrfamilienhaus wurden in der Software Python mit Hilfe objektorientierter Programmierung vorgenommen. Die Randbedingungen dieser Simulationen sind grösstenteils identisch zu den Untersuchungen im Vergleich zentraler und dezentraler WP-Einheiten (vergleiche Kapitel 3.1 Rahmenbedingungen Klima und Last). Eine Ausnahme bildet das TWW-Profil aus der ostorientierten Wohnung im 2. Obergeschoss. Hier wurde das Profil durch das Profil «L» der EN 16147: 2017 (CEN 2017) verwendet. Der Grund für diese Ausnahme ist die noch folgende Beschreibung der Messung einer Wärmepumpe, bei welcher dieses Profil am Prüfstand umgesetzt wurde. Zur besseren Vergleichbarkeit der Resultate fanden auch die Simulationen mit dem identischen Profil in einer der Wohnungen statt.

Der Raumwärmebedarf wurde so weit als möglich auf die Python-Simulationen übertragen.

Die Strahlungsdaten der noch folgenden PV-Simulationen entsprechen der Einstrahlung auf eine 45° geneigte Fläche mit Südausrichtung mit den beschriebenen hochaufgelösten Wetterdaten. Zur Bestimmung des PV-Ertrages wurden konstante Werte für Effizienz und Verluste angenommen:

- Effizienz der PV-Module: 17 %.
- Effizienz des Wechselrichters: 94 %.
- Verluste: 7 %.

Das abgebildete System enthält:

- Ein einzelnes PV-Feld, basierend auf den Strahlungsdaten des Wetterprofils und konstanter Effizienz der Module und des Wechselrichters.
- Haushaltsstrom (HH) Profile für die einzelnen Wohneinheiten.
- TWW-Bereitung mit einem vereinfachten Modell eines TWW-Speichers, den oben beschriebenen TWW-Zapfprofilen und einem WP-Modell zur Beladung der Speicher.
- Eine Raumheizlast, basierend auf den Definitionen des oben beschriebenen Gebäudes, inklusive der Gebäudehülle, den internen Lasten und dem Luftwechsel sowie einer vereinfachten Berechnung der solaren Gewinne.
- Einer WP-Berechnung zur Deckung der Raumheizlast unter Berücksichtigung der Heizkurve.
- Ein Schwarmsignal, resultierend aus der Differenz aus Strombedarf (primär für Haushaltsgeräte und zusätzlich für die Deckung des Wärmebedarfes) und Stromangebot durch die PVA.

Die Simulation erfolgt in 15 min Zeitschritten. Diejenigen Elemente, welche keine Wechselwirkungen untereinander haben, werden zuerst nacheinander simuliert. Dazu werden zuerst die Wetterdaten für jeden Zeitschritt des Jahres eingelesen, der PV-Ertrag berechnet und der Haushaltsstromverbrauch gerechnet.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Wohneinheiten als Instanzen mit eigenen Parametern und Zuständen als Schwarmelemente aufgerufen. Hier sind die Zustände Warmwasserladung durch Wärmepumpe und Raumwärmelieferung durch Wärmepumpe nicht gleichzeitig möglich und abhängig über das Schwarmsignal auch abhängig vom Zustand des letzten Zeitschrittes aller Instanzen. Deshalb werden diese Elemente nach der Initialisierung im ersten Zeitschritt jeweils für jeden Zeitschritt nacheinander aufgerufen, d.h. über alle Zeitschritte des Jahres iteriert. Die Berechnung der TWW-Speicher folgt einem einfachen Vorgehen: Das Speichervolumen ist unterteilt in zwei Zonen, die warme Zone «oben» und die meist kältere Zone «unten». Zum Ende einer Beladung haben beide Zonen eine identische Temperatur. Danach wird zum einen die Temperaturänderung durch die Verluste an die Umgebung bestimmt und zum anderen wird die Zone «unten» durch TWW-Bezüge vergrössert und entsprechend



die Zone «oben» verkleinert (Plug-Flow Ansatz). Eine Nachlade-Anforderung erfolgt entweder dann, wenn die Temperatur in der oberen Zone unter einen Schwellwert fällt, oder wenn die Grösse der oberen Zone unter 50 % des Volumens fällt (angenommene Position des Einschaltfühlers). Dies entspricht der Nachladung in Realität, wenn der Thermoklin im Speicher die Position des Sensors bei etwa 50 % der Speicherhöhe erreicht. Die Berechnung im Betriebszustand «Raumheizung» erfolgt aufgrund der aktuell nötigen Heizleistung inklusive der Vorlauftemperatur nach der Aussentemperatur. Die Kompressordrehzahl wird anhand der in Kapitel 3.2.2 (Dezentrale Wärmepumpeneinheiten) bestimmt und die elektrische Leistungsaufnahme berechnet.

3.3.2 PV und Haushaltsstrom

Aus der Simulation von PV-Ertrag und Haushaltsstrom ergibt sich der Überschuss an PV-Strom. Die zugrunde liegenden Profile wurden in Kapitel 3.1.3 Nutzerprofile beschrieben.

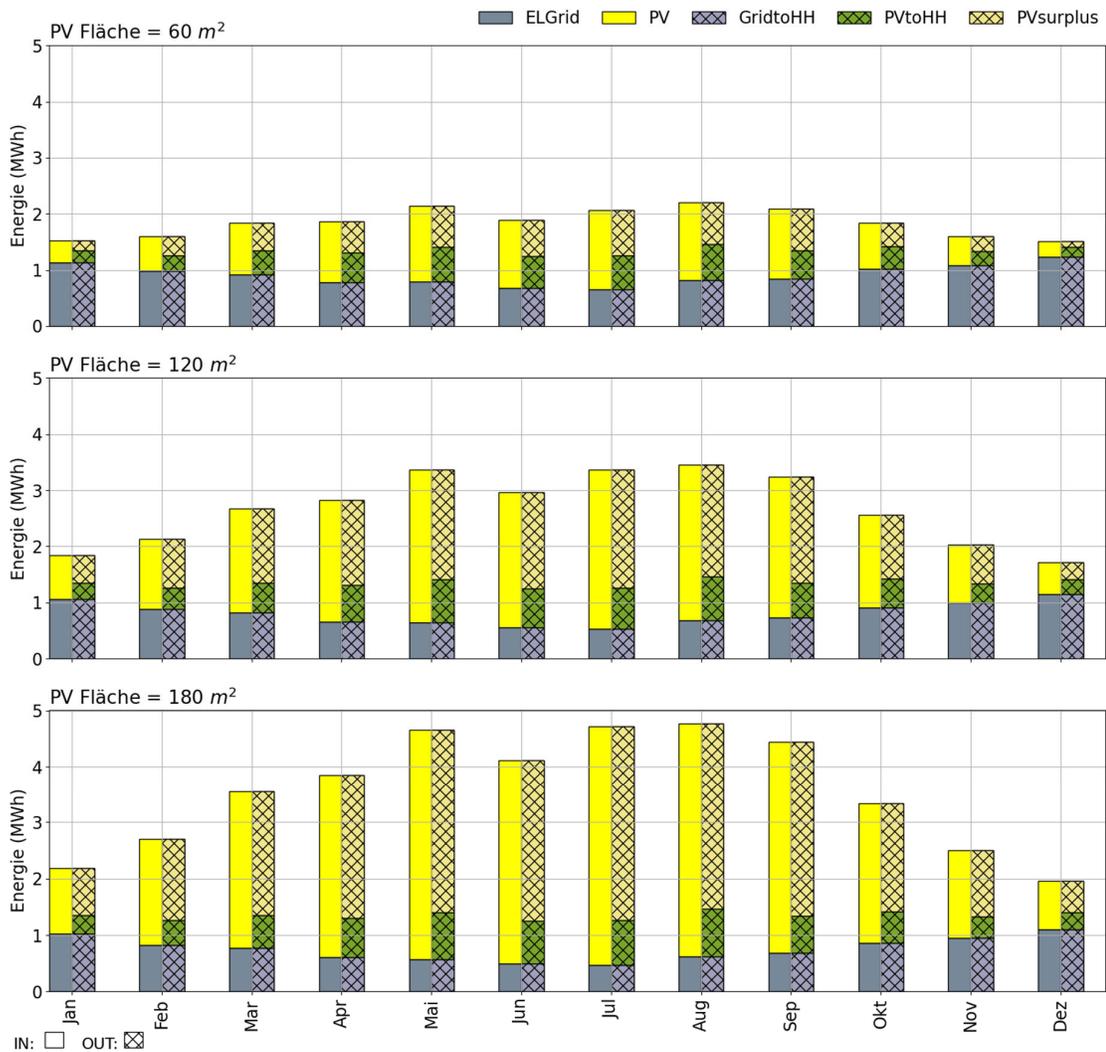


Abbildung 39: El. Energiebilanz PV und Haushaltsstrom mit verschieden grossen PV-Feldern, ohne Heizsystem.



In Abbildung 39 ist die el. Bilanz von PV und Haushaltsstrom, dargestellt als Monatswerte, für die PV-Feldgrößen 60 m², 120 m² und 180 m² zu sehen (bei einer Dachfläche von insgesamt 360 m² (Flachdach) hätten alle Feldgrößen ausreichend Platz).

Die Jahreswerte der Energiebilanz sind in Tabelle 19 als «Bilanz PV und Haushaltsstrom» aufgelistet.

Der gesamte Bedarf an Haushaltsstrom, welcher aus den vorgegebenen Profilen definiert ist, kann aufgeteilt werden in denjenigen Teil der durch PV-Ertrag zeitlich gedeckt wird (PVtoHH) und dem Netzbezug für Haushaltsstrom (GridtoHH), welcher den restlichen Bedarf deckt. Der PV-Ertrag, welcher den Bezug an Haushaltsstrom übersteigt, ergibt den Überschuss, welcher noch für den Betrieb der Wärmepumpen zur Verfügung steht (PVsurplus).

3.3.3 Bedarfsgeregelte dezentrale Systeme

Nach der Berechnung der Jahresprofile für PV und Haushaltsstrom werden die einzelnen Heizsysteme berechnet. Dazu wurde ein System definiert und dann objektbezogen aufgerufen, um in Abhängigkeit der jeweiligen Last berechnet zu werden.

Tabelle 19: Elektrische Energiebilanz auf Jahresbasis.

PV-Feldgrösse	[m²]	60	120	180
Bilanz PV und Haushaltsstrom				
PV-Ertrag	[MWh]	11.3	22.5	33.8
Haushaltsstrom	[MWh]	16.2	16.2	16.2
PV-Deckung Haushaltsstrom	[MWh]	5.2	6.5	7.2
Netzbezug Haushaltsstrom	[MWh]	10.9	9.7	9.0
PV-Überschuss	[MWh]	6.0	16.0	26.6
Bilanz inkl. Heizsysteme				
Gesamtverbrauch Heizsysteme	[MWh]	15.0	15.0	15.0
PV-Deckung Heizsysteme	[MWh]	1.4	2.3	2.8
Netzbezug gesamt	[MWh]	24.5	22.4	21.3
Netzeinspeisung inkl. Heizsystem	[MWh]	4.6	13.7	23.8
Autarkiegrad	[%]	21	28	32
Eigenverbrauchsquotient	[%]	59	39	29
PV-Ertragsverhältnis	[-]	0.36	0.72	1.08

In Abbildung 40 ist der Verlauf exemplarisch für zwei Wohnungen des Gebäudes dargestellt. Der Ausschnitt entspricht demselben Zeitraum im Jahres-Zapfprofil, der auch den in Kapitel 4.3 beschriebenen Laborexperimenten hinterlegt wurde. In rot und blau sind die Temperaturen der beiden Zonen im Speicher dargestellt (T_oben und T_unten). Die orange Linie zeigt den Anteil der gespeicherten Energie im oberen Teil des Speichers (fr_oben). Dieser Anteil entspricht in etwa dem Volumenanteil des Speichers bzw. der Position des Thermoklin. Es ist deutlich zu sehen, dass eine Nachladung der TWW-Speicher



jeweils durch grosse Bezüge im jeweiligen Profil ausgelöst wird. In der Wohnung 2OG_Ost sind diese jeweils am Morgen um 8:00 Uhr und am Abend um 21:00 Uhr.

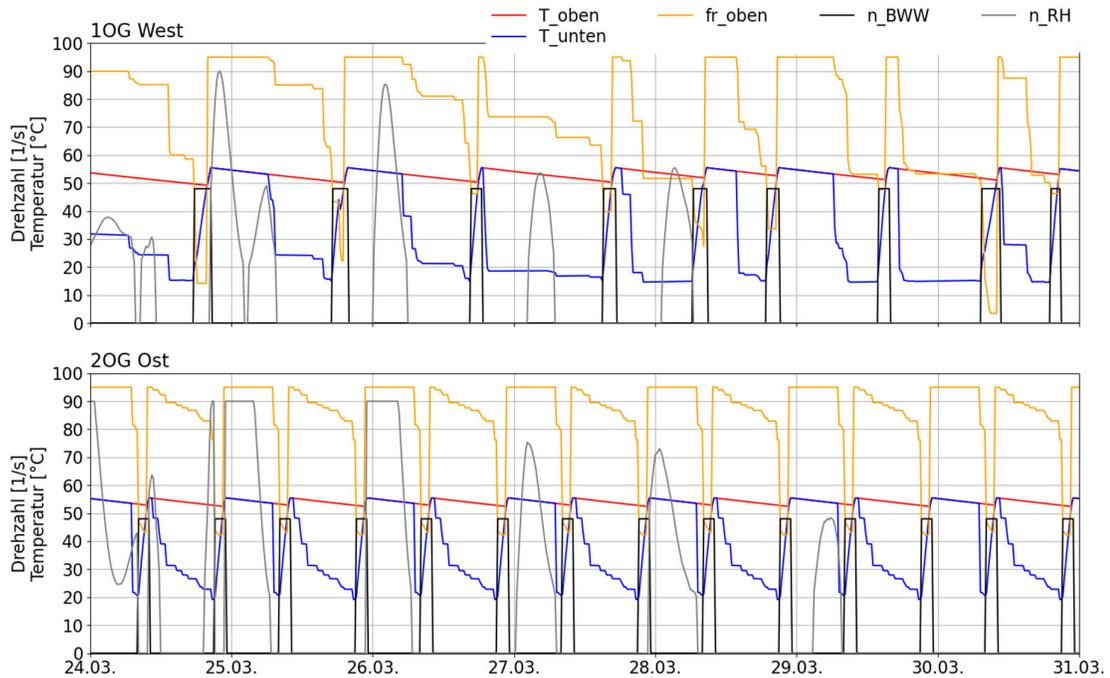


Abbildung 40: Ausschnitt aus den Simulationen mit bedarfsorientierter Regelung. Gezeigt werden Kennwerte für die TWW-Speicher sowie die WPs für zwei Wohnungen. In rot und blau sind die Temperaturen der beiden Zonen im Speicher dargestellt (T_{oben} und T_{unten}). Die orange Linie zeigt den Anteil der gespeicherten Energie im oberen Teil des Speichers (fr_{oben}). Die graue und schwarze Linie zeigt die Kompressordrehzahl in den Zuständen TWW und Raumheizung (n_{TWW} und n_{RH}).

Der resultierende jährliche elektrische Energiebedarf der einzelnen Wärmepumpen im MFH ist in Abbildung 41 dargestellt. Total beträgt der Energiebedarf für Raumheizung und TWW 15.0 MWh/a, davon 6.2 MWh/a für TWW und 8.8 MWh/a für Raumwärme.

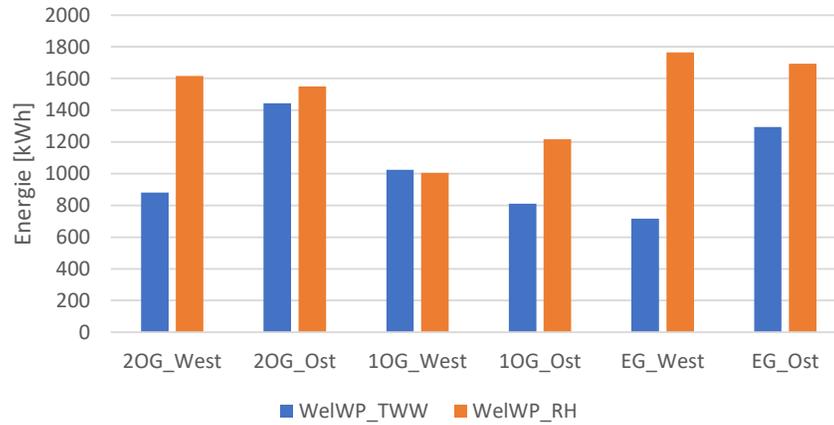


Abbildung 41: Jahreswerte des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpen der einzelnen Wohnungen bei bedarfsgeregelter Steuerung. WelWP_TWW = Energiebedarf TWW; WelWP_RH = Energiebedarf Raumheizung.

Wie in der Berechnung der Energiebilanz für PV und Haushaltsstrom ergibt sich auch in Kombination mit den Heizsystemen bei rein bedarfsgesteuerter Regelung ein Eigenverbrauch immer dann, wenn PV-Überschuss zeitgleich mit dem Wärmebedarf anfällt. In Abbildung 42 wird auf Monatsbasis bei verschiedenen grossen PV-Feldern gezeigt, wie hoch dieser zufällige zusätzliche Eigenverbrauch für die Wärmepumpe (PVtoHP) ausfällt.

In der Variante mit 60 m² PV-Feld beträgt der PV-Ertrag 11.2 MWh. Davon werden 5.2 MWh direkt zur Deckung des Haushaltsstrombedarfes verwendet (PVtoHH), 1.4 MWh PV-Ertrag werden zusätzlich durch die Wärmepumpen konsumiert (PVtoHP) und die restlichen 4.6 MWh ins Netz eingespielen. Die Daten sind zusammen mit denjenigen für 120 m² und 180 m² PVA in Tabelle 19 gezeigt.

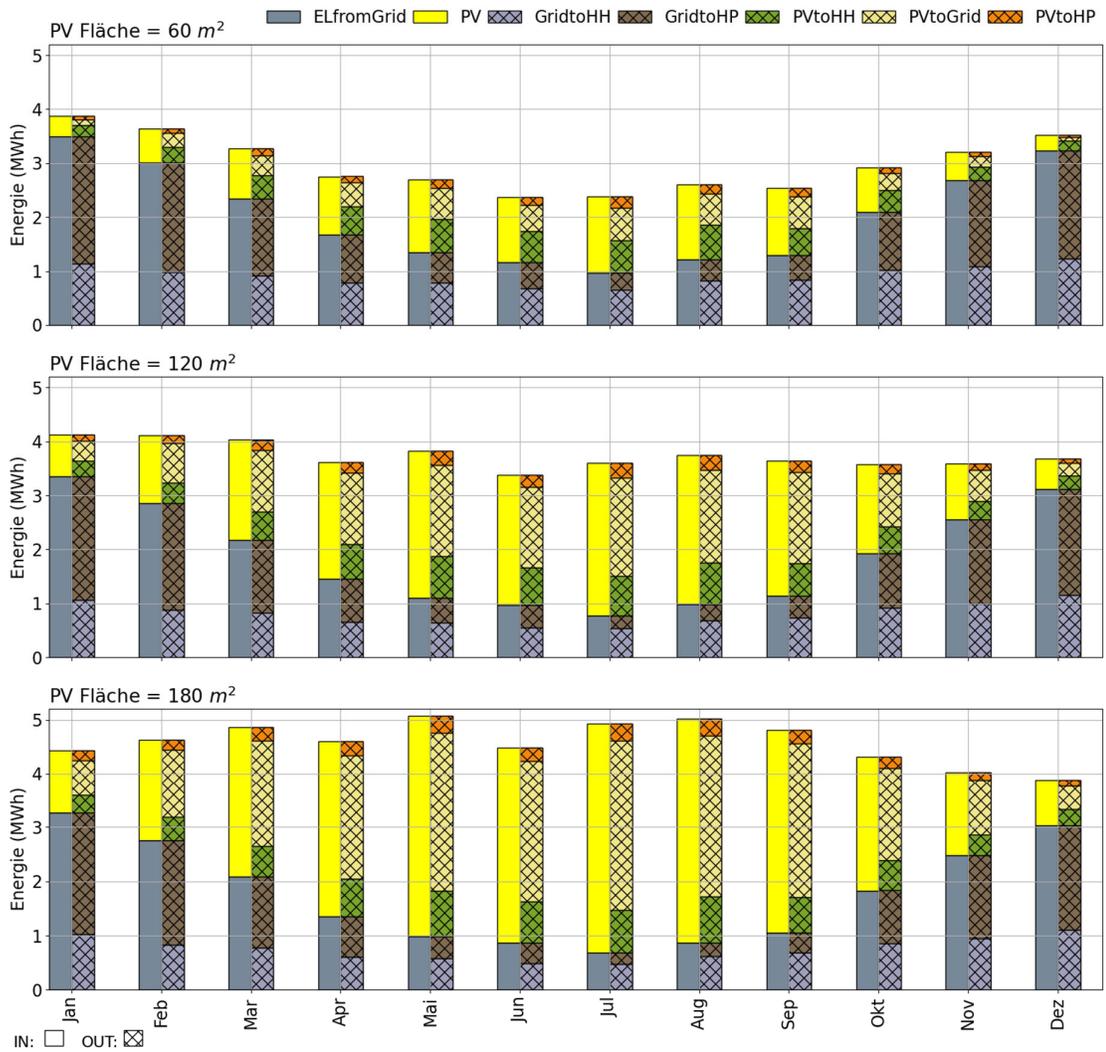


Abbildung 42: El. Energiebilanz des Gesamtsystems bei bedarfsorientierter Regelstrategie und verschiedenen grossen PV-Flächen.



4 Regelungsstrategien

4.1 Bedarfsorientierte Regelung

Bei der bedarfsorientierten Regelung wird grundsätzlich jede Wärmepumpe mit dem Ziel betrieben, den Wärmebedarf des Kunden zu decken, der aus dem Wärmebedarf für Raumheizung und dem Wärmebedarf für die Warmwasserbereitung besteht.

Für die Warmwasserbereitung wird der Ist-Wert des Speichers (TWW-Sensor) mit dem Einschaltwert verglichen. Falls die Temperatur unter diesen Einschaltwert fällt, startet die Beladung des TWW-Speichers. Diese läuft so lange, bis die Einschalttemperatur plus eine Hysterese erreicht sind. Die Regelung der Pumpen- sowie der Kompressordrehzahl ist während der Warmwasserladung vordefiniert um möglichst schnell eine ausreichend hohe Temperatur im Speicher zu gewährleisten (Reduktion des Massenstroms in den ersten Minuten der Ladung). Die Kompressordrehzahl bleibt während der TWW-Ladung konstant. Die Warmwasserbereitung ist nicht über Zeitfenster limitiert und hat gegenüber der Raumheizung Vorrang.

Für die Raumheizung wird die Aussentemperatur zur Bestimmung der Heizperiode sowie zur Bestimmung der Soll-Vorlauftemperatur nach der Heizkurve verwendet. In diesem Betriebszustand wird die Kompressordrehzahl mit dem Ziel angepasst, die geforderte Vorlauftemperatur zu liefern. Falls die Temperatur im beheizten Raum bzw. in der beheizten Wohnung zu stark ansteigt, wird der Massenstrom in der Heizverteilung bzw. Fussbodenheizung durch das Thermostatventil gedrosselt. In Folge des reduzierten Massenstroms bzw. der reduzierten Wärmeabgabe an den Raum würde die Vorlauftemperatur steigen und als Reaktion darauf die Kompressordrehzahl reduziert.

Im ersten Schritt wurde der Wärmebedarf für Raumheizung und die Warmwasserbereitung mit der beschriebenen, bedarfsorientierten Regelung untersucht.

4.2 Regelung im Schwarm

4.2.1 Schwarmsignal

Eine zentrale Reglereinheit erfasst die Zielgrösse, nämlich die Differenz S zw. lokaler Stromerzeugung durch die PVA und dem elektrischen Gesamtverbrauch des Gebäudes, welcher dem Verbrauch aller Wohnungen für Haushaltsgeräte und den Betrieb der Wärmepumpen entspricht. Ziel der Schwarmsteuerung ist es, diese Differenz zu minimieren.

Die Differenz S wird als unidirektionales Signal an die einzelnen HpCosy Einheiten übermittelt. Die Übertragung ist an die Produktion der lokalen PVA gebunden. Erst ab einem Schwellwert von 200 W wird das Signal aktiviert. Somit ist das Signal mindestens von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang inaktiv, bzw. 0.

Zudem ist das Signal limitiert auf die Peak-Leitung der PVA in kW: $-P_{PV}$ in kWp ... S ... P_{PV} in kWp.

4.2.2 Zustand der Schwarmteilnehmer

Um den Betrieb in Bezug auf die eingehende Anforderung an den Schwarm abzugleichen, müssen die einzelnen Verbrauchsteilnehmer ein entsprechendes Abnahmeszenario unter Berücksichtigung der Schwarmdynamik implementiert haben.

Es kann bei einer unbekanntem Anzahl von Schwarmteilnehmern davon ausgegangen werden, dass die einzelnen Teilnehmer in einem sehr ähnlichen Zustand sein werden (getaktet durch den Verbrauch, ausgelöst durch die Benutzer (Personen) und den markanten Tagesverlauf auf der Erzeugerseite bzw. dem Profil der Einstrahlung), daher ist auch die gleichzeitige Reaktion auf eine markante Veränderung des Eingangssignals zu erwarten.



Es wird von folgenden Betriebszuständen ausgegangen:

1) WP im Stillstand	TWW Sollwert erreicht oder Betrieb ausgeschaltet Heizbetrieb, Aus / Sommer <u>oder</u> Ausschalthysterese (bzw. Integral) erreicht <u>oder</u> extern gesperrt / oder im Alarmzustand
2) WP im Startup Mode	WP läuft 3 min mit einer fixierten Drehzahl / Leistung unabhängig zur aktuellen Anforderung. Anschliessend geht die WP in die Zustände 3, 4 oder 6 über.
3) WP im TWW Betrieb	aktuelle Anforderung ist eine TWW Bereitung. WP läuft bei konstanter Drehzahl / Leistung bis zum Erreichen des aktuellen Lade- oder Nachladesollwertes.
4) WP im Heizbetrieb	WP läuft leistungsmoduliert und entsprechend der aktuellen Anforderung (PID-Regelung über die Temperatur im WP Vorlauf und den Sollwert Heizbetrieb).
5) WP im Free-Cooling Betrieb	Dieser Betrieb erfolgt nur über die Aktivierung der Umwälzpumpen und Umschaltung auf einen zusätzlichen Wärmeübertrager. Der Leistungsverbrauch ist gegenüber anderen Teilnehmern vernachlässigbar.
6) WP im Aktivkühlbetrieb	Der Betrieb ist in begrenztem Rahmen leistungsmodulierend und über eine PID-Regelung aktiv. Dieser Zustand wurde in den Simulationen noch nicht berücksichtigt.
7) Legionellenbetrieb	Wärmeerzeugung direkt elektrisch über Heizeinsatz. (WP gesperrt).

Die einzelnen Teilnehmer sind also grundsätzlich frei und unabhängig zueinander und bedienen die aktuell am höchsten priorisierte Anforderung (in der Regel TWW vor Heizen oder Kühlen). Ist das Eingangssignal der Schwarmsteuerung im Gleichgewicht (bei 0), so ist die Wahrscheinlichkeit einer Änderung im Schwarmverhalten gering.

4.2.3 Aktionen

Die Aktion der WP als Reaktion auf das Signal hängt im Wesentlichen von deren aktuellem Betriebszustand ab. Anpassungen sind in den Zuständen 1 (Stillstand), 3 (TWW Betrieb) und 4 (Heizbetrieb) möglich.

Während dem Heizbetrieb erfolgt keine *direkte* Anpassung der Drehzahl des Kompressors, da dies zu einer Unter- oder Überdeckung des Wärmebedarfes führen kann. Stattdessen erfolgt eine Parallelverschiebung der Heizkurve mit entsprechenden Auswirkungen auf die Leistungsanforderung der WP. Diese Aktion beeinflusst die WP auch im Stillstand: Bei einer Erhöhung der Heizkurve wird u.U. die Einschaltsschwelle der WP überschritten, so dass die WP in den Zustand 2 (Startup) wechselt.

Während dem TWW Betrieb erfolgt zum einen eine direkte Anpassung der Kompressordrehzahl und zum anderen eine Anpassung der Hysterese (Ausschaltpunkt) bis maximal zur Temperatur der Legionellenschaltung. Somit wird sowohl die Leistung der WP als auch das Energiemanagement des Speichers aktiv beeinflusst.



4.3 Dezentrale Systeme im Schwarm

Die oben beschriebene Regelstrategie wurde auf das Simulationsmodell übertragen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Verschiebung der Heizkurve in den Simulationen um ± 1 K erfolgte².

In Abbildung 43 ist ein Ausschnitt aus den Simulationen mit Zeitverläufen von zwei Wohneinheiten zu sehen. Speziell an der Entwicklung der Kompressordrehzahl (n_{TWW}) in der Wohnung «2OG_Ost» ist zu erkennen, dass die Warmwasserbereitung, wie auch in der bedarfsorientierten Regelung, jeweils zweimal pro Tag stattfinden, jeweils ausgelöst durch dieselben Zapfungen im hinterlegten Zapfprofil «L». Durch die Reduktion der Kompressordrehzahl wird die Beladung des Speichers jedoch soweit ausgedehnt, dass mit dem später einsetzenden PV-Überschuss bereits die Solltemperatur im Speicher überhöht werden muss auf 60 °C um zusätzlich Wärme einzuspeichern (z.B. 28.03. in beiden gezeigten Wohnungen). Die Warmwasserladungen in den beiden gezeigten Wohnungen erfolgt nur per Zufall zur selben Zeit, nicht durch die Forcierung der Beladung auf Grund des erhöhten Sollwertes mit positivem Schwarmsignal.

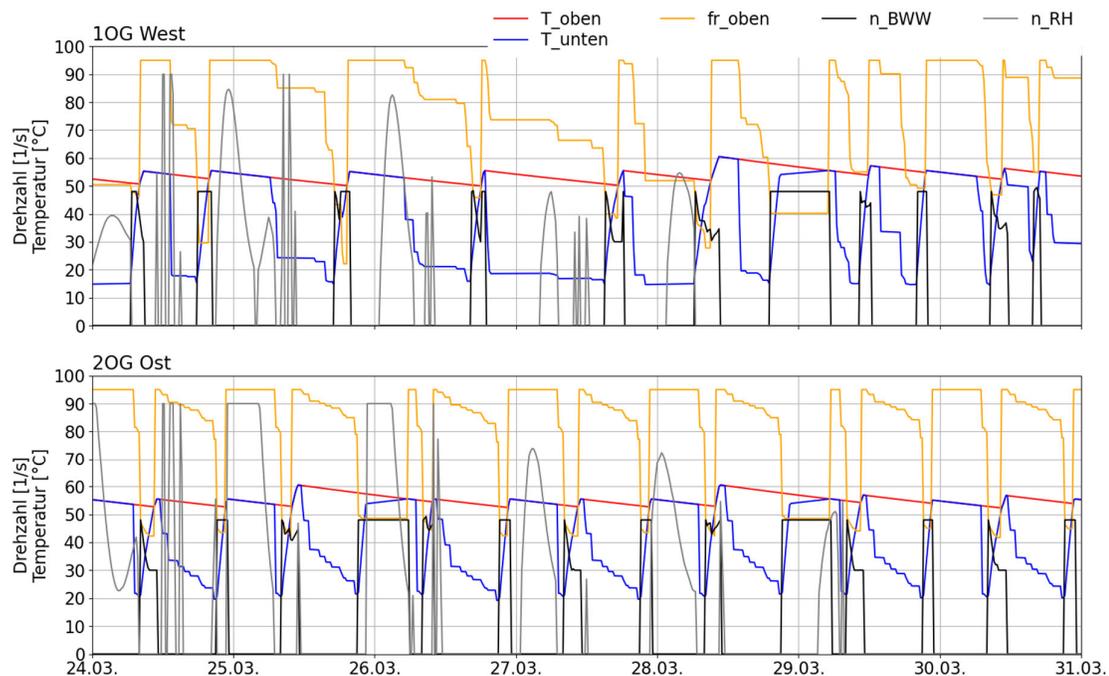


Abbildung 43: Ausschnitt aus den Simulationen mit Schwarmsignal und entsprechender Schwarm-Regelung. Gezeigt werden Kennwerte für die TWW-Speicher sowie die WPs für zwei Wohnungen. In rot und blau sind die Temperaturen der beiden Zonen im Speicher dargestellt (T_{oben} und T_{unten}). Die orange Linie zeigt den Anteil der gespeicherten Energie im oberen Teil des Speichers (fr_{oben}). Die graue und schwarze Linie zeigt die Kompressordrehzahl in den Zuständen TWW und Raumheizung (n_{TWW} und n_{RH}).

In Abbildung 44 sind die Energiebilanzen mit Schwarmregelung für verschieden grosse PV-Flächen auf Monatsbasis zu sehen. Im Vergleich zu den in Abbildung 42 gezeigten Resultaten mit bedarfsorientierter Regelung ist zu erkennen, dass ein grösserer Teil des PV-Ertrages durch die WPs in Wärme umgewandelt wird.

² Die Messungen aus Kapitel 5 wurden mit einer grösseren Verschiebung der Heizkurve um ± 3 K durchgeführt.

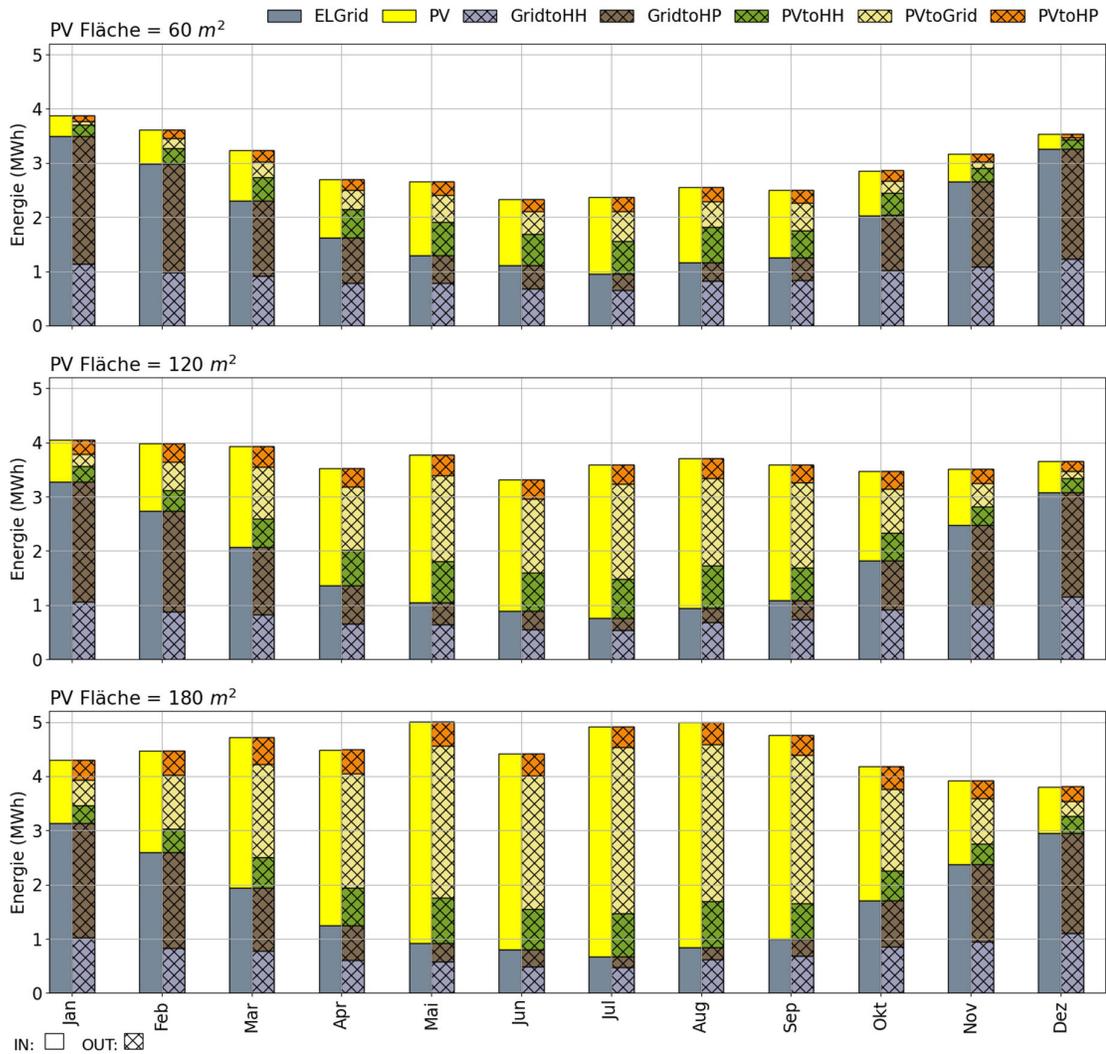


Abbildung 44: Energiebilanz des Gesamtsystems mit Schwarmregelung und verschieden gossen PV-Flächen.

Die Resultate der Jahressimulation dezentraler Heizsysteme im Schwarm sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Resultate der Jahressimulation mit dezentralen Heizsystemen im Schwarm.

PV-Feldgrösse	[m ²]	60	120	180
PV-Ertrag	[MWh]	11.3	22.5	33.8
Gesamtenergieverbrauch	[MWh]	31.7	31.9	32.1



Gesamtverbrauch Heizsysteme	[MWh]	15.5	15.8	16.0
PV-Deckung Heizsysteme	[MWh]	2.3	3.9	4.8
Netzbezug	[MWh]	24.1	21.6	20.2
Netzeinspeisung	[MWh]	3.7	12.1	21.8
Eigenverbrauchsquotient	[%]	67	46	35
Autarkiegrad	[%]	24	32	37
PV-Ertragsverhältnis	[-]	0.36	0.70	1.05

Abbildung 45 zeigt den Netzbezug und die Netzeinspeisung der Systeme mit Schwarmregelung im Vergleich zu denjenigen mit rein bedarfsorientierter Regelung. Der Vergleich wurde für verschiedene PVA-Größen durchgeführt. Wie erwartet fällt jeweils die Reduktion des Netzbezuges kleiner aus als die Reduktion der Netzeinspeisung. Dies ist bedingt durch die Verringerung der Effizienz bei forciertem Betrieb mit höheren Vorlauftemperaturen. Das Verhältnis von eingespartem Netzbezug zu entgangener Einspeisung liegt zwischen 1:2.2 (bei 60 m² PV) und 1:1.9 (bei 180 m² PV).

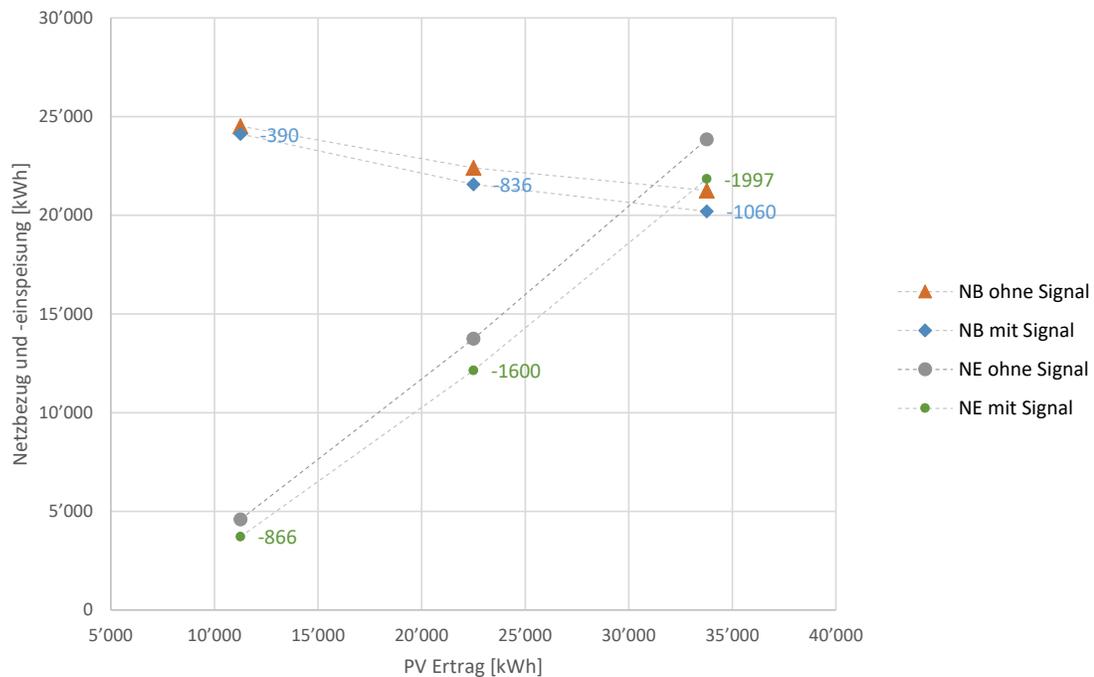


Abbildung 45: Netzbezug und -einspeisung bei bedarfsorientierter Regelung und Schwarmregelung im Vergleich.

Die deutlich höhere Reduktion der Einspeisung im Vergleich zur Reduktion des Netzbezuges ist zum einen bedingt durch den WP-Betrieb mit erhöhten Temperaturen durch die Schwarmregelung und zum anderen durch die veränderte Kompressordrehzahl. Um den Einfluss der Anpassungen im TWW- und im Raumheizungsmodus zu ermitteln, wurden Simulationen durchgeführt, in welchen nur jeweils eine Anpassung für einen Betriebszustand umgesetzt wurden. Abbildung 46 zeigt die resultierenden Werte für Netzbezug und -einspeisung in der Variante mit 180 m² PV-Fläche. Es ist deutlich zu sehen, dass



die Regelung, welche nur im TWW-Betrieb eingreift, nur zu einer marginalen Reduktion des Netzbezuges führt, gleichzeitig aber deutliche Einbussen in der Netzeinspeisung zur Folge hat. Im Gegensatz dazu führt die alleinige Anpassung des Raumheizbetriebes zu einer Reduktion des Netzbezuges bis fast zum Wert der kombinierten Anpassung («Schwarm»).

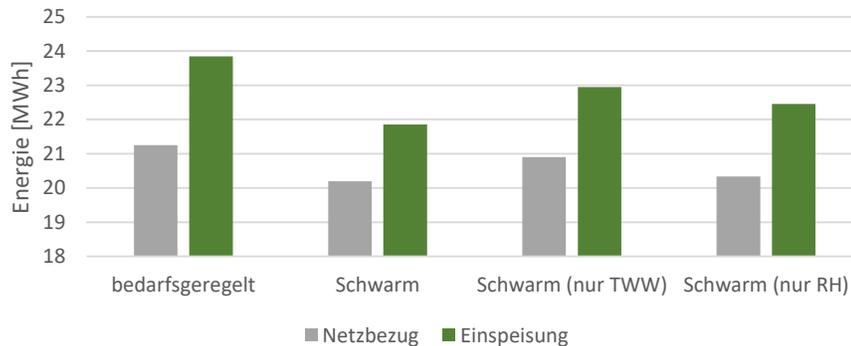


Abbildung 46: Netzbezug und Einspeisung im Fall eines Gebäudes mit 180 m² PV mit verschiedenen Regelstrategien.

Das Verhältnis aus Eingespartem Netzbezug zu den Einbussen der Netzeinspeisung beträgt mit der kombinierten Schwarmregelung beträgt 1:1.9. Bei alleiniger Anpassung der TWW-Bereitung verschlechtert sich dieses Verhältnis auf 1:2.6 (jede eingesparte Kilowattstunde Netzstrom wird durch 2.6 kWh PV-Strom «erkauft»). Bei alleiniger Anpassung im Raumheizbetrieb verbessert sich das Verhältnis auf 1:1.5 (vgl. Abbildung 47).



Abbildung 47: Verhältnis aus Eingespartem Netzbezug und Einbussen bei der Netzeinspeisung.

4.4 Dezentrale Systeme im Scharm mit Anpassung der TWW-Strategie

Der Energiemenge, welche in einem TWW-Speicher mit 220 l Volumen gespeichert werden kann, beträgt bei 40 K Temperaturdifferenz circa 10 kWh. Dies entspricht in etwa dem täglichen Energiebedarf für TWW eines 4-Personen Haushaltes.

Bei einem Temperatursensor in der Mitte des Speichers bedeutet dies, dass eine Nachladung des Speichers jeweils zweimal pro Tag stattfinden muss. Eine Anpassung der Solltemperatur hat hier nur einen sehr begrenzten Einfluss. Bei der Entladung des Speichers durch TWW-Bezüge bildet sich bei guter Speicherschichtung ein Thermoklin aus, welche bei jedem TWW-Bezug weiter nach oben wandert (das Volumen von Kaltwasser im unteren Teil des Speichers wird vergrößert, und entsprechend das bevorzugte TWW-Volumen verkleinert). Sobald dieser Thermoklin die Position des Sensors erreicht, sinkt dort die Temperatur markant ab und es wird eine Beladung des Speichers ausgelöst. Entsprechend



wird diese Nachladung wahrscheinlicher jeweils während oder nach einem grösseren Bezug an TWW ausgelöst. Dies ist typischerweise am frühen Morgen und am späten Abend der Fall.

Um eine effiziente Bewirtschaftung des Speichervolumens zu ermöglichen, müsste idealerweise der Ladezustand des Speichers bekannt sein. Eine Möglichkeit dazu wäre die Erfassung der TWW-Entnahmen über einen Energiemengenzähler, eine weitere Möglichkeit die Positionierung eines zweiten Sensors im Speicher.

In einer Simulationsvariante wurde vorausgesetzt, dass der Ladezustand des Speichers bekannt ist. Ein Mindestladezustand von 30 % wurde definiert, um den Komfort jederzeit zu erfüllen. Diese Änderung führt zu einer späteren Beladung des Speichers mit entsprechend tieferen Vorlauftemperaturen der WP (durch die tiefere Speichertemperatur im Vergleich zur Standardregelung). Bei PV-Überschuss wird die Beladung vorzeitig ausgelöst und – wie in der oben beschriebenen Regelung – zusätzlich die Speichertemperatur erhöht.

Tabelle 21 zeigt die Resultate der Jahressimulation mit dezentralen Heizsystemen im Schwarm mit Anpassung der TWW-Strategie.

Abbildung 48 zeigt die Energiebilanz des Gesamtsystems mit Schwarmregelung und angepasster TWW-Bewirtschaftung und verschiedenen PV-Flächen auf Monatsbasis. Im Vergleich zur in Abbildung 44 gezeigten Bilanz mit der «normalen» Schwarmregelung fällt ein deutlich erhöhter Anteil der durch die WPs in Wärme umgewandelten Anteil von PV-Strom auf (PVtoHP) auf.

In Abbildung 49 ist der Netzbezug und die Netzeinspeisung dieser Variante den Werten der bedarfsorientierten Regelung gegenübergestellt. Die Reduktion von Netzeinspeisung und -bezug ist mit dieser Regelung nahezu gleich.

Tabelle 21: Resultate der Jahressimulation mit dezentralen Heizsystemen im Schwarm mit Anpassung der TWW-Strategie.

PV-Feldgrösse	[m²]	60	120	180
PV-Ertrag	[MWh]	11.3	22.5	33.8
Gesamtenergieverbrauch	[MWh]	30.9	31.2	31.5
Gesamtverbrauch Heizsysteme	[MWh]	14.7	15.1	15.3
PV-Deckung Heizsysteme	[MWh]	2.8	4.4	5.3
Netzbezug	[MWh]	22.8	20.3	19.0
Netzeinspeisung	[MWh]	3.2	11.6	21.3
Eigenverbrauchsquotient	[%]	72	48	37
Autarkiegrad	[%]	26	35	40
PV-Ertragsverhältnis	[-]	0.36	0.72	1.07

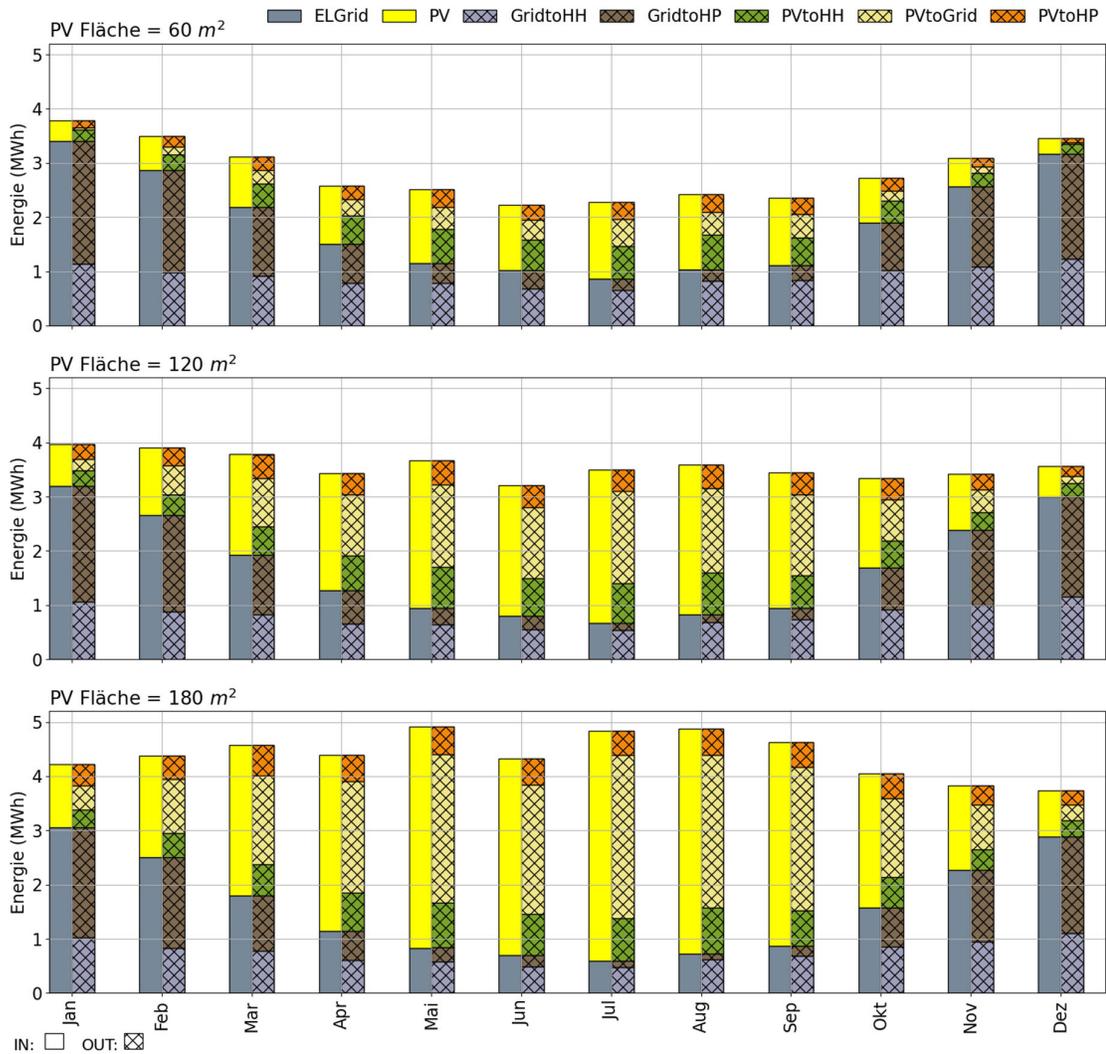


Abbildung 48: Energiebilanz des Gesamtsystems mit Schwarmregelung mit angepasster TWW-Bewirtschaftung und verschieden grossen PV-Flächen.

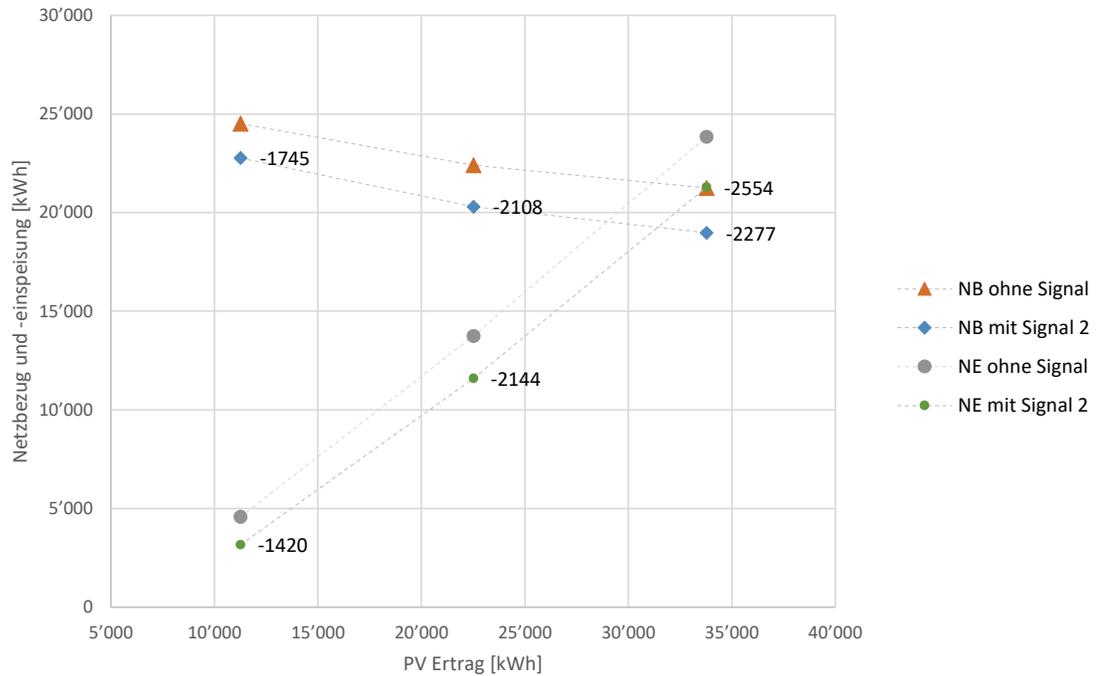


Abbildung 49: Netzbezug und -einspeisung bei bedarfsorientierter Regelung und Schwarmregelung mit angepasster TWW-Bewirtschaftung im Vergleich.

Abbildung 50 zeigt die Verschiebung der WP Betriebszeiten aufgrund der Schwarmregelung in der Übergangszeit. Der Betrieb der WPs im TWW-Modus ist in der bedarfsorientierten Regelung Abhängig von den Bezugszeiten in den einzelnen Wohnungen. Durch die Schwarmregelung wird die Beladung der Speicher nach wie vor durch die Zapfprofile bestimmt, allerdings wird durch die Anpassung der Kompressordrehzahl der TWW-Betrieb verlängert. Erst durch die genauere Berücksichtigung des Ladezustandes des Speichers (wie z.B. durch einen zweiten Sensor) wird die TWW-Ladung an Tagen mit PV-Überschuss überwiegend auf die Mittagszeit verschoben.

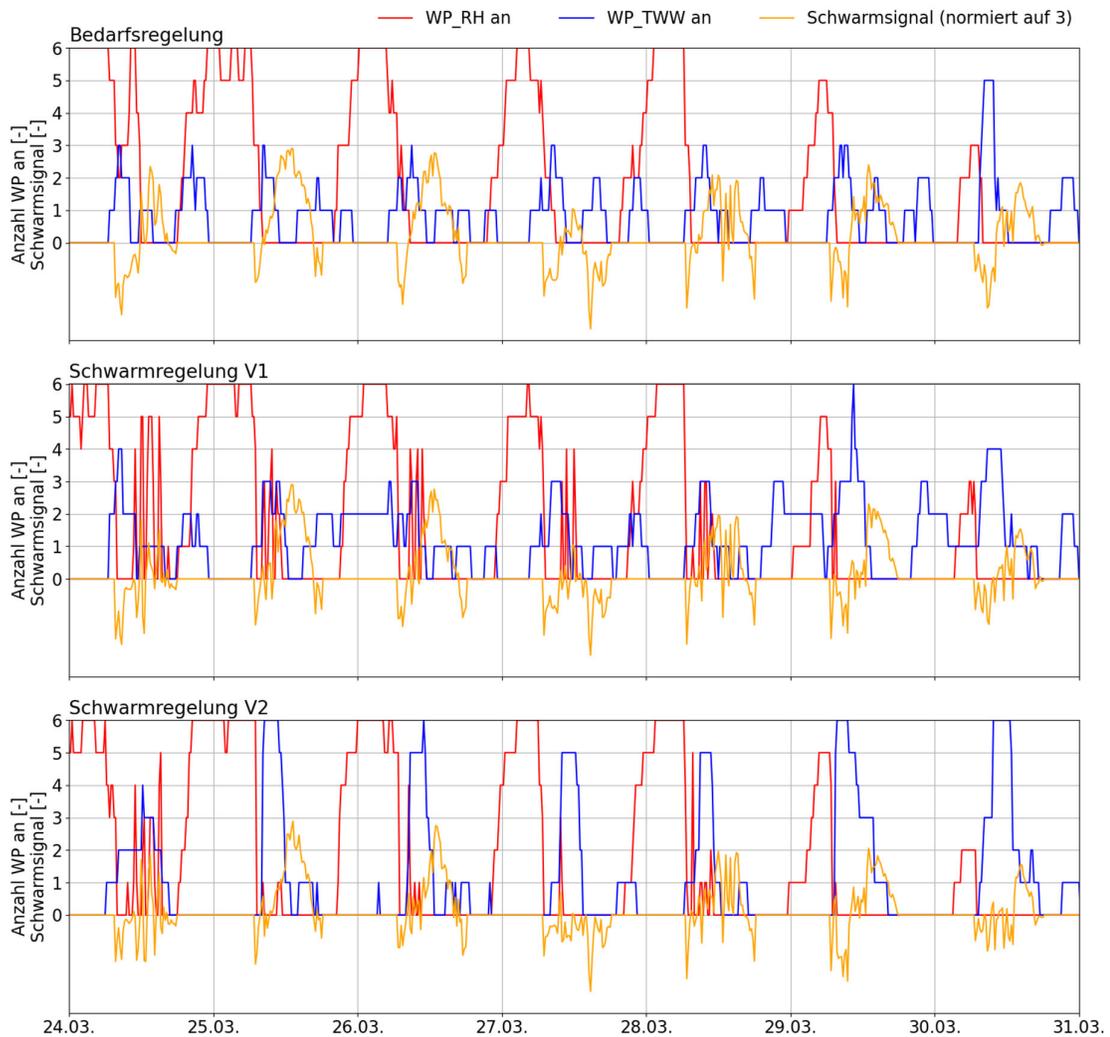


Abbildung 50: Verschiebung der WP Betriebszeiten aufgrund der Schwarmregelung in der Übergangszeit.

4.5 Diskussion Schwarmregelung

4.5.1 Komforteinbussen durch die Schwarmregelung

Die Schwarmregelung greift in Abhängigkeit des vorhandenen PV-Stroms in die Regelung der Heizsysteme ein. Im Fall der Raumheizung wird dies durch eine Parallelverschiebung der Heizkurve umgesetzt, mit Folgen für die Raumtemperatur. In Abbildung 51 sind die Temperaturen der einzelnen Wohnungen mit rein bedarfsgeregelter Steuerung des Heizsystems dargestellt.

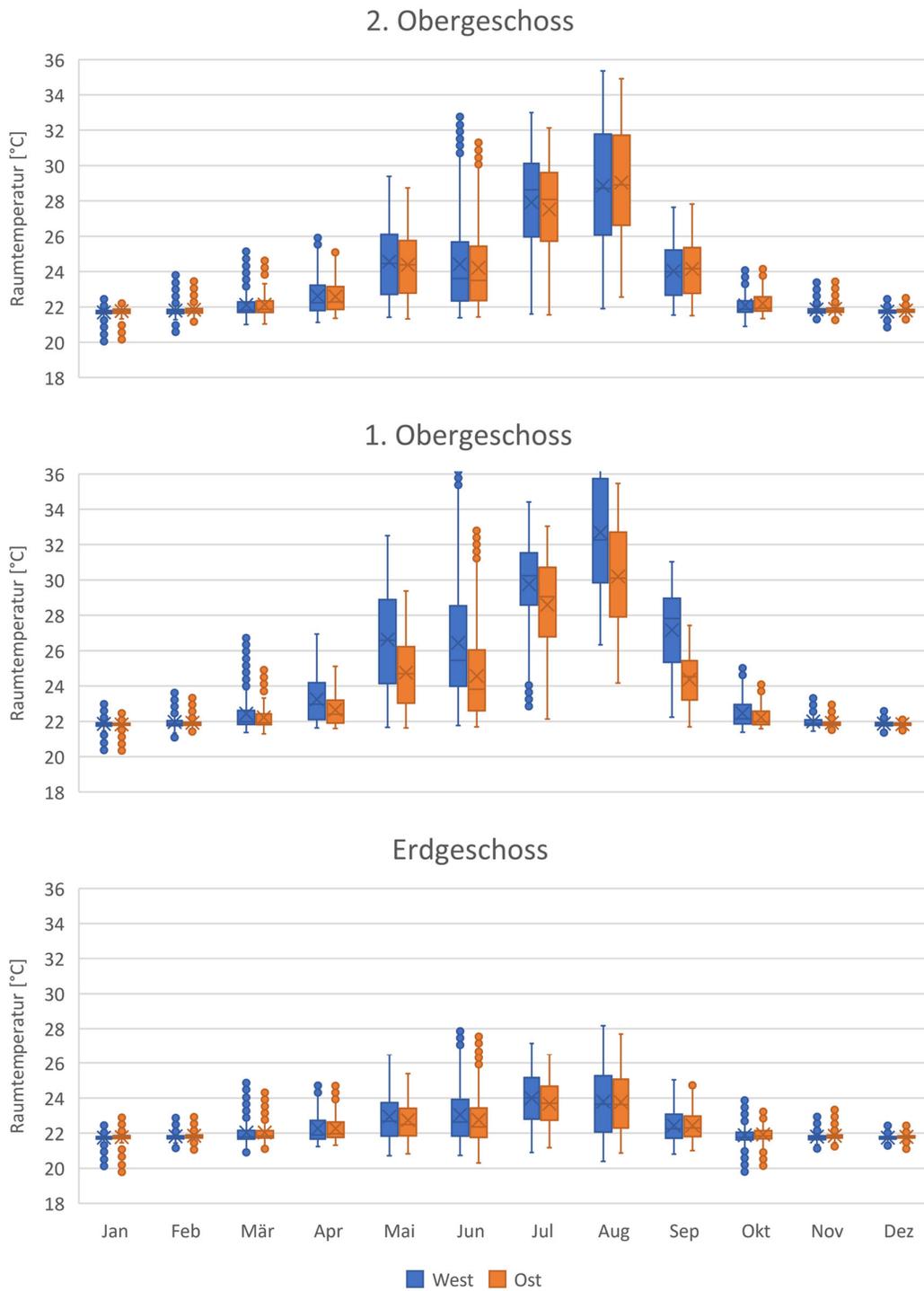


Abbildung 51: Raumtemperatur der bedarfsgesteuerten Simulationsvariante (keine Anpassung der Raumsolltemperatur).



Die Raumtemperaturen für die Wohnungen im Erdgeschoss sind in Abbildung 52 bei bedarfsgeregelter Wärmepumpe, sowie mit Schwarmregelung und verschiedenen PV-Feldern während der Monate mit Heizwärmebedarf dargestellt. Die Unterschiede des Medianwertes (markiert mit einem Kreuz) sind im Bereich von Zehntel-Grad. Die Extremwerte weichen nur während weniger 15-min Abschnitte ab.

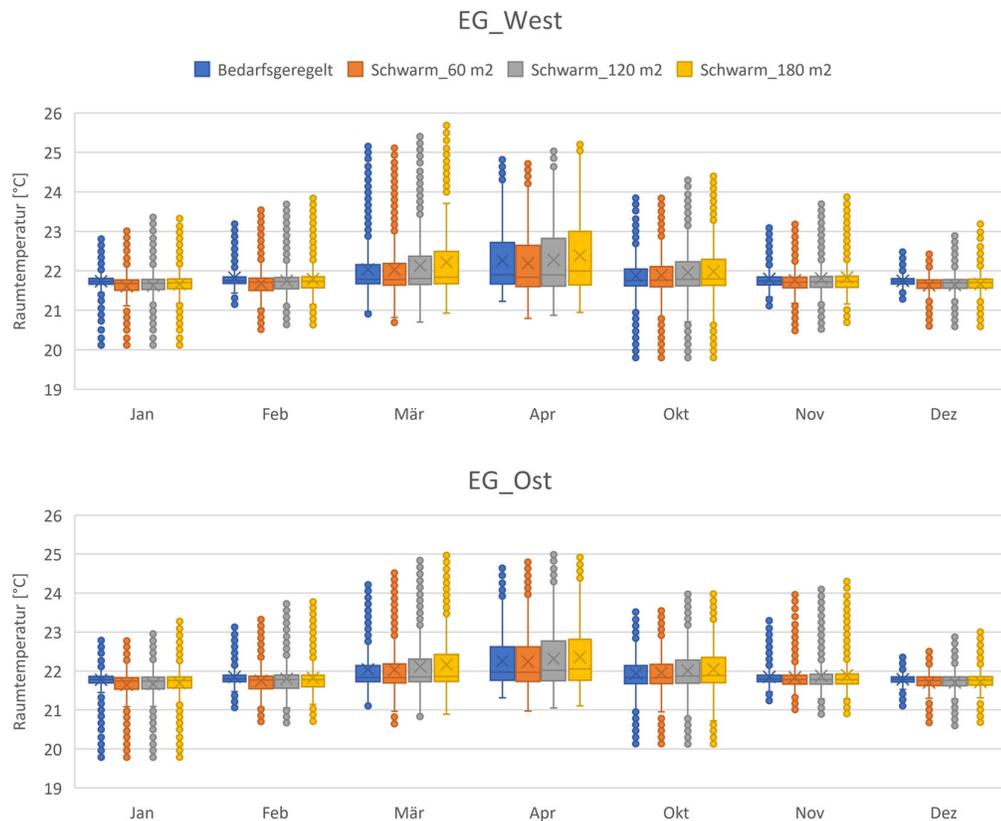


Abbildung 52: Raumtemperatur der Wohnungen im Erdgeschoss bei bedarfsgeregelter Wärmepumpe, sowie mit Schwarmregelung und verschiedenen PV-Feldern während der Monate mit Heizwärmebedarf.

Die Differenz der Mittelwerte der Raumtemperatur mit Schwarmregelung zur Temperatur bei reiner Bedarfsregelung ist in Abbildung 53 als Monatswert für die einzelnen Wohnungen des MFH mit verschiedenen PV-Fläche dargestellt. Generell gibt es Abweichungen nach oben, also hin zu höheren Raumtemperaturen bedingt durch die Anhebung der Heizkurve bei PV-Überschuss, und Abweichungen nach unten.

Die maximale Abweichung nach unten beträgt im Fall mit 60 m² PV weniger als 0.2 K. Generell finden die Abweichungen nach unten nur in den kältesten Wintermonaten Dezember, Januar und Februar statt. Dabei ist die Abweichung nach unten für alle PV-Flächen ähnlich stark ausgeprägt.

Im Frühjahr und Herbst ergibt sich überwiegend eine leichte Erhöhung der Raumtemperaturen. Diese ist mit grösserer PV-Fläche stärker ausgeprägt.

Insgesamt sind die Abweichungen der Raumtemperatur aufgrund der Begrenzung des Schwarmsignals sehr gering: Erst ab einem PV-Ertrag von 200 W wird das Signal generiert. Von Sonnenuntergang bis zum nächsten Morgen bleibt das Signal entsprechend bei 0. An den Abweichungen der Raumtemperatur lässt sich ablesen, ob das Signal überwiegend positiv (Übergangszeit und Sommer) oder negativ (Winter) ist.

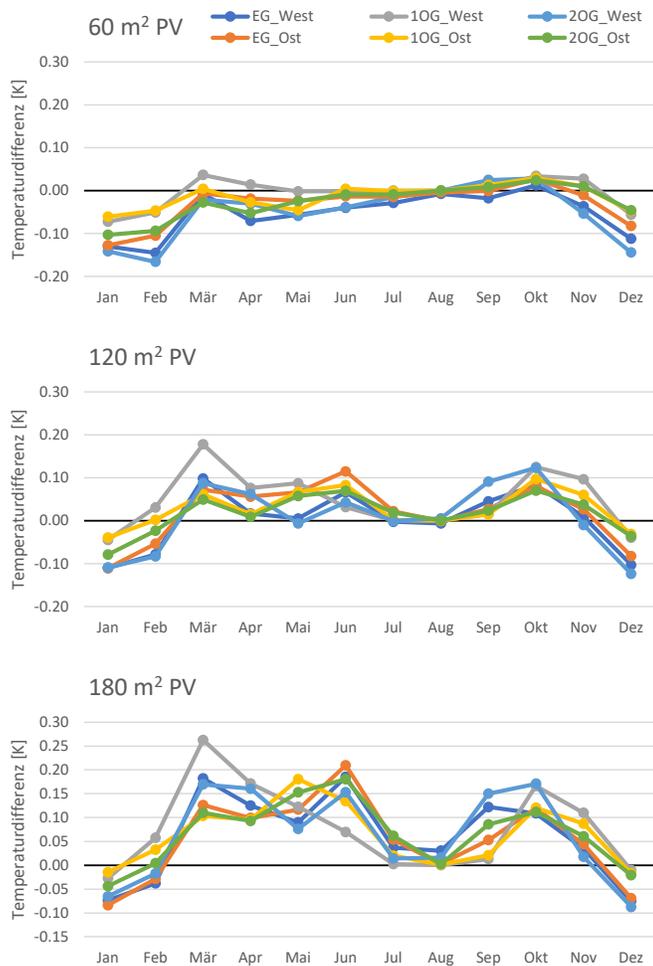


Abbildung 53: Abweichung der durchschnittlichen Raumtemperaturen im Gebäude mit 120 m² PV-Fläche und Schwarmregelung gegenüber demselben Gebäude mit bedarfsgesteuerter Regelung.

4.5.2 Belastung der Kompressoren

Die Reaktion auf das Schwarmsignal verändert die Betriebspunkte der einzelnen Heizsysteme. Eine pauschale Aussage zum Einfluss der geänderten Betriebsweise auf die Lebensdauer ist nicht möglich. Allerdings gibt es Einflussfaktoren, welche bewertet werden können. Diese sind vor allem die Anzahl der Kompressorstarts bzw. Kaltstarts sowie die Belastung bei hohen Temperaturen.

Bezüglich der Kompressorstarts gibt es, bedingt durch die Reaktion auf das Schwarmsignal, nur marginale Änderungen. Die BWW-Anforderung wird in jedem Fall durch dieselbe Sensorposition bestimmt und eine Beladung des Speichers durch den BWW-Verbrauch getriggert.

Ein etwas differenzierteres Bild ergibt sich hinsichtlich der Temperaturbelastung des Kompressors. In Abbildung 54 ist ein Energie-Temperatur Diagramm zu sehen. Gezeigt ist die Energie, die geliefert wurde, sortiert nach der Kondensator-Eintrittstemperatur. Ideal hinsichtlich der Effizienz, aber auch hinsichtlich der Temperaturbelastung des Kompressors, ist die Lieferung der Energie auf möglichst tiefem Temperaturniveau. Entsprechend sollten die Linien möglichst «links» sein. Die Grafik zeigt, dass im Raumwärmebetrieb – also im Temperaturbereich unterhalb von 35 ... 40 °C - nahezu kein Unterschied



zwischen den Varianten «bedarfsgeregt» und «Schwarm» besteht. Bei der Beladung der Warmwasserspeicher – der Temperaturbereich zwischen 40 °C und 65 °C – sind zwei Unterschiede bemerkbar: Die Temperatur der Beladung ist mit der Schwarmregelung leicht erhöht.

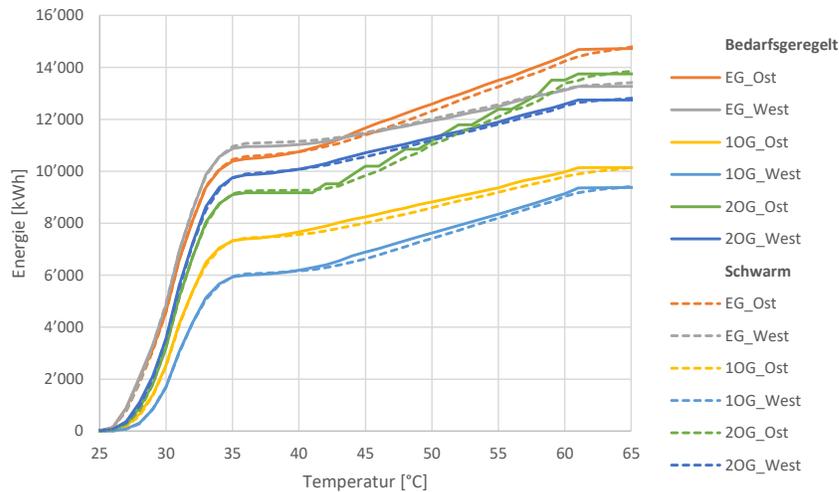


Abbildung 54: Energie-Temperatur Diagramm mit der durch die Wärmepumpen gelieferten Wärmemenge und der Kondensator-Eintrittstemperatur.

In Abbildung 55 ist ein Ausschnitt des oben gezeigten Energie-Temperatur Diagramms zu sehen. Beispielhaft sind die Bedingungen in drei Wohnungen im Bereich der BWV-Bereitung zu sehen. Es wird ersichtlich, dass die Energie auf einer im Bereich 0.5 K ... 1.5 K höheren Temperatur geliefert werden muss. Zusätzlich verschiebt sich die höchste zu liefernde Temperatur nach oben. Dabei muss allerdings erwähnt werden, dass keine Legionellenschaltung in der Bedarfsorientierten Regelung berücksichtigt wurde.

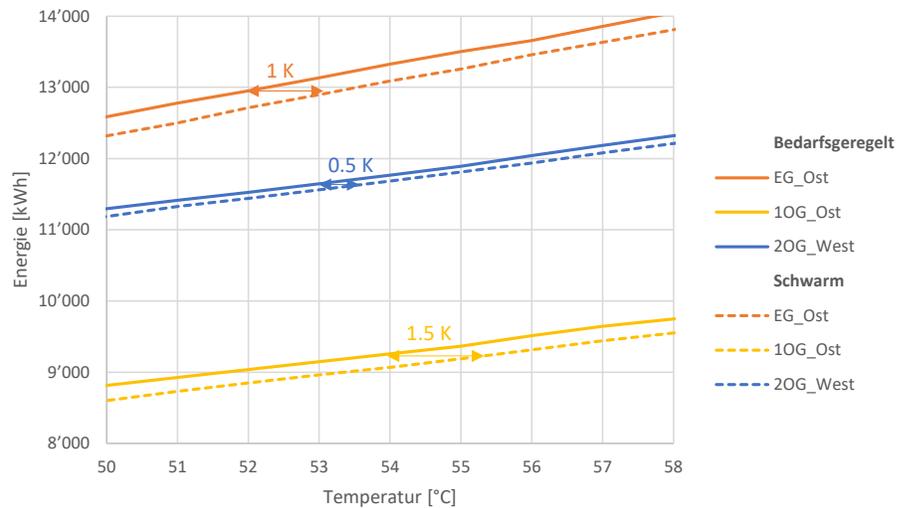


Abbildung 55: Ausschnitt aus dem Energie-Temperatur Diagrammes mit Kondensator-Eintrittstemperaturen $> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ für drei ausgewählte Wohnungen.

4.5.3 Potential Kühlung

Abbildung 51 in Kapitel 0 zeigt die Raumtemperatur des simulierten Gebäudes. Darin ist zu sehen, dass in den Monaten Juli und August die Raumtemperatur überwiegend höher als $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist. Im verwendeten Simulationsmodell ist keine Verschattung oder erhöhte Luftwechselrate durch offene Fenster bei hohen Raumtemperaturen hinterlegt. Diese Massnahmen könnten die Temperaturen im Sommer bereits stark reduzieren, Dennoch wird deutlich, dass der Komfort durch eine Raumkühlung vor allem in den Wohnungen unter dem Dach erhöht werden könnte.

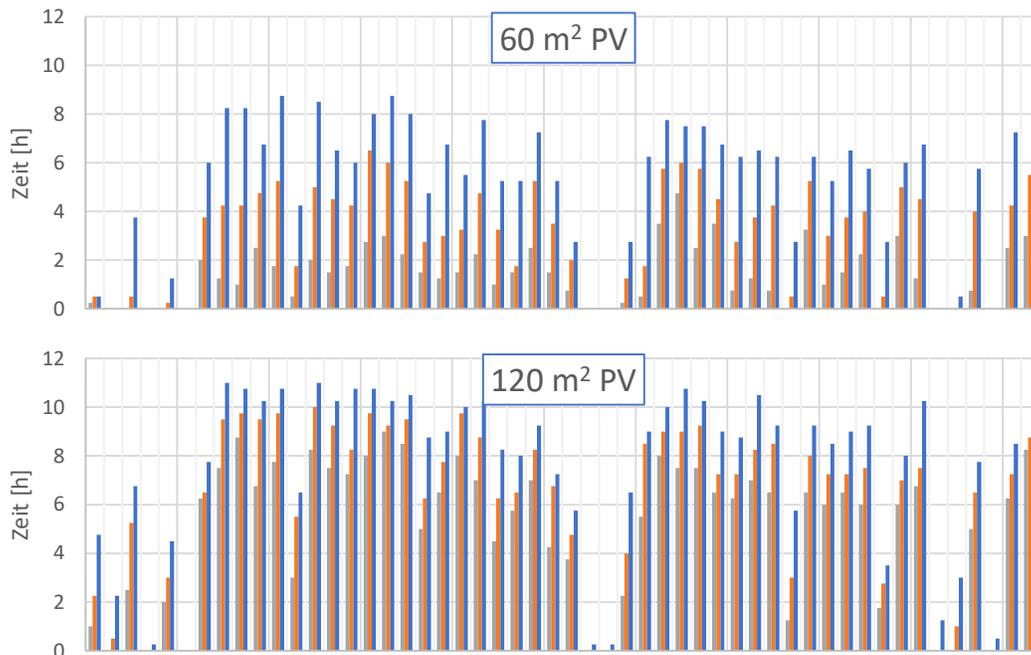
Als Massnahmen für die Kühlung kommt sowohl eine passive Kühlung mit Hilfe der Erdsonden in Frage als auch ein reversibler Betrieb der Wärmepumpen. Das Gerät, auf dessen Basis das Simulationsmodell für die gezeigten Simulationen parametrisiert wurde, und das im folgenden Kapitel (0



Experimentelle Untersuchungen) vorgestellt wird, hat die Möglichkeit eines reversiblen Betriebes.

Zur Übertragung der Kälteleistung an das Gebäude kommt die Fussbodenheizung in Frage. Dabei gilt es zu beachten, dass zur Vermeidung von Kondensation – und damit von Bauschäden – eine minimale Wasservorlauftemperatur in Abhängigkeit des Taupunktes einzuhalten ist. Der zur Ermittlung der Taupunkttemperatur nötige Raumtemperatur und -feuchte Sensor muss an den Regler der Wärmepumpe angeschlossen werden. Die minimale Vorlauftemperatur muss dann um 3 bis 5 K über dem ermittelten Taupunkt sein. Deshalb – und wegen der umgekehrten Temperaturverhältnisse im Gegensatz zur Wärmeübertragung per Fussbodenheizung³ – ist die Kühlleistung über die Fussbodenheizung limitiert. Sie beträgt nur etwa 25 W/m². (suissetec 2021)

Egal ob aktive oder passive Kühlung gewählt wird, in jedem Fall ist elektrische Energie zum Betrieb von Pumpen oder Wärmepumpen nötig. Unter der Prämisse, keinen Netzstrom für die Kühlung aufzuwenden, kann nur über den PV-Strom, der andernfalls eingespiessen werden würde, die Kühlung betrieben werden. In Abbildung 56 ist die Zeit dargestellt, in der die Einspeisung (P_{feed-in}) über bestimmten Schwellwerten liegt. Dies für verschiedene PVA-Größen.



³ «Die Fussbodenheizung ist ein Wärmeabgabesystem mit überwiegendem Wärmestrahlungsanteil «S». Der Anteil der Wärmestrahlung beträgt ca. 60 – 95 %. Wird mit der Fussbodenheizung gekühlt, reduziert sich die Kühlleistung fast gänzlich auf den Strahlungsanteil.» (suissetec 2021)

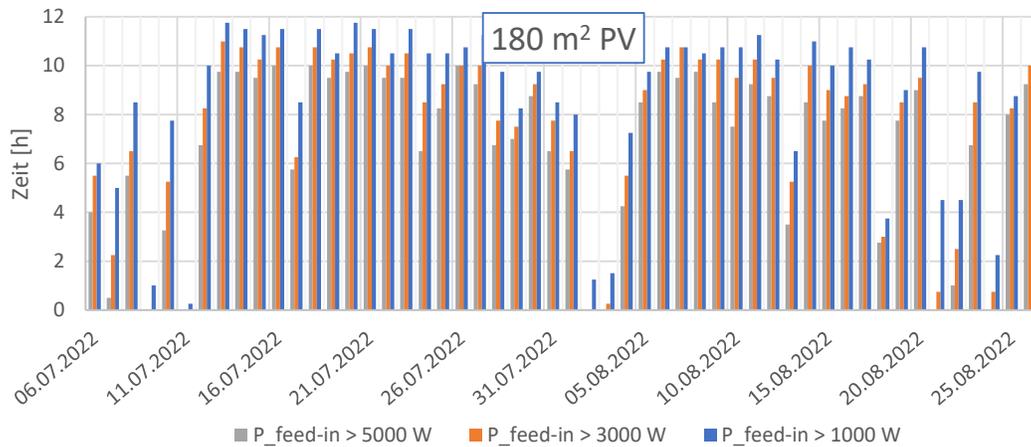


Abbildung 56: Zeit, in der die Einspeisung über bestimmten Schwellwerten liegt, für verschiedene PVA.

Mit 60 m² PV-Fläche beträgt auch im Sommer die Dauer der Einspeisung von mehr als 5 kW nur an wenigen Ausnahmetagen mehr als 2 Stunden. Die Schwelle von 3 kW wird an den meisten Tagen etwa 4 Stunden lang überschritten. Wegen der niedrigen Übertragungsleistung der Fussbodenheizung und der damit einhergehenden Notwendigkeit von langen Betriebszeiten⁴ ist eine aktive Kühlung unter Vermeidung von Strombezug ab Netz mit dieser PVA nicht möglich. Eine passive Kühlung, welche lediglich den Strombedarf der Pumpen decken muss, wäre im relevanten Zeitraum jeweils im Bereich 6 – 8 Stunden pro Tag möglich.

Erst mit der Erweiterung der PVA auf 120 m² sind die Zeiten der Einspeisung mit genügend hoher Leistung zum aktiven Betreiben einer reversiblen Wärmepumpe lange genug, um einen relevanten Beitrag zur Kühlung des Gebäudes zu liefern. In Abbildung 57 ist die Einspeisung mit verschiedenen PV-Feldern exemplarisch für wenige Sommertage dargestellt.

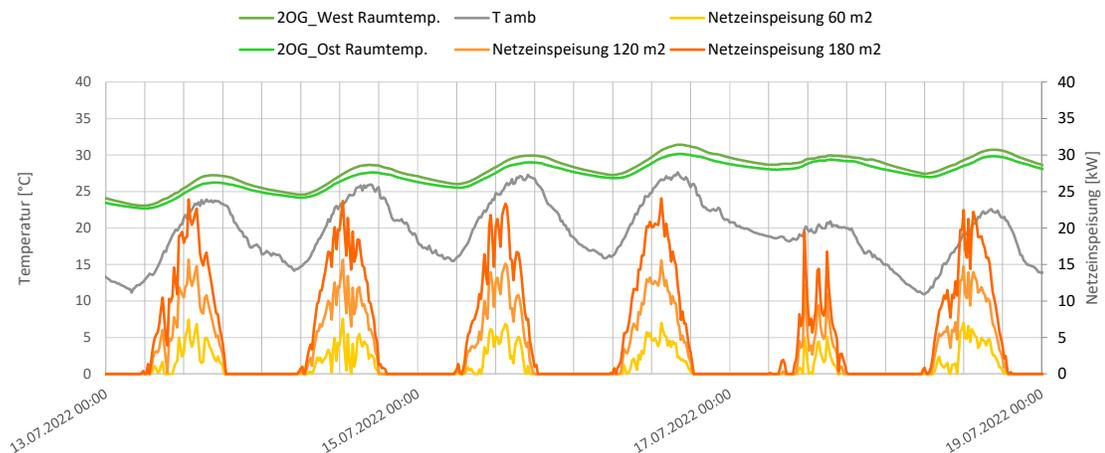


Abbildung 57: Einspeisung im simulierten Gebäude mit verschiedenen PV-Flächen.

⁴ Alternativ zur direkten Lieferung der Kälte an das Gebäude könnte auch ein Kältespeicher beladen bzw. gekühlt werden. So könnte Erzeugung und Verteilung entkoppelt werden.



4.5.4 Ökonomische Beurteilung

Im Jahr 2022 bezahlten Haushaltskunden in der Schweiz durchschnittlich 21 Rappen pro Kilowattstunde Strom. Für das Jahr 2023 wird mit einer Steigerung auf 27 Rappen pro Kilowattstunde gerechnet (Statista 2023).

Durch die Schwarmregelung wurde eine Reduktion des Netzbezuges um 390 kWh (bei 60 m² PV-Fläche) bis zu 1060 kWh (bei 180 m² PV-Fläche) gegenüber der rein bedarfsorientierten Regelung erreicht. Diese Vermeidung von Netzbezug wurde erkaufte über die Umwandlung von PV-Strom in Wärme und damit über entgangene Einspeisung. Die entgangene Einspeisung betrug zwischen 866 kWh (60 m² PV-Fläche) bis 1997 kWh (180 m² PV-Fläche).

Ökonomisch sinnvoll ist dies nur dann, wenn die entgangenen Einnahmen über den Verkauf des Stroms tiefer sind als die eingesparten Kosten. Im Jahr 2022 wäre dies bei einer Vergütung zwischen 11 Rp/kWh und 9 Rp/kWh der Fall gewesen.

Der Einfluss der Regelungsanpassungen auf die Lebensdauer der Anlage wurde bei dieser Rechnung ebensowenig berücksichtigt, wie die Kosten zur Umsetzung des Konzeptes (zentrale Einheit zum Generieren des Signals oder eventuelle Kosten für die Übertragung).

4.5.5 Zentrale Einheit zur Ausgabe des Schwarmsignals

Im vorliegenden Projekt wurde das Signal zur Übermittlung an die einzelnen Schwarmteilnehmer von einer zentralen Einheit im Gebäude übermittelt. Die einzige nötige Messstelle ist am Netzanschlusspunkt des Gebäudes. Als Schnittstelle an den Wärmepumpen wurde dazu eine schon vorhandene Schnittstelle für die Kommunikation (Smart Grid Ready – Schnittstelle) verwendet.

Prinzipiell sind dies Informationen, über die auch ein Energieversorger in digitaler Form verfügt. Tatsächlich wird ein ähnlicher Informationsfluss bereits in verschiedenen Projekten angewendet.



4.5.6 Auslösung der TWW-Bereitung

Die Simulationen zeigen, genau wie die noch folgenden Messergebnisse, dass die Erhöhung der Solltemperatur für die TWW-Bereitung nur einen marginalen Einfluss auf den Zeitpunkt der Speicherbeladung hat. Nach der Beladung des Speichers ist dieser über die gesamte Höhe auf einer nahezu homogenen Temperatur. Danach bildet sich bei TWW-Bezügen ein Thermoklin zwischen dem unten einströmenden Kaltwasser und der oberen Zone. Dieser Thermoklin wird dann bei jedem TWW-Bezug weiter nach oben wandern. In Abbildung 58 ist auf der linken Seite die Situation mit einer Sensorposition und zwei Solltemperaturen dargestellt. Der Zeitpunkt, zu dem die Auslösebedingung erreicht wird, ist bei beiden Temperaturen nahezu identisch. Auf der rechten Seite wird die Situation mit einer zweiten Sensorposition dargestellt.

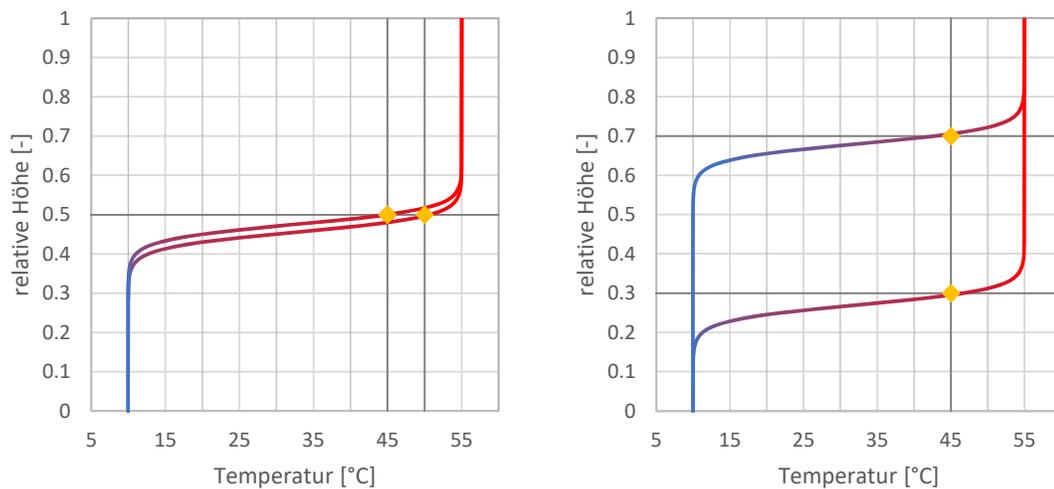


Abbildung 58: Skizze der Speichertemperaturen zum Zeitpunkt, an dem die Nachladung des Speichers bei verschiedenen Solltemperaturen oder Sensorpositionen startet.



5 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen auf dem Prüfstand des INEB verfolgten folgende Ziele:

- a. Nachmessen der in AP3 und AP4 entwickelten TWW-Ladestrategien im Hinblick auf grösstmögliche exergetische Effizienz bei gleichzeitig hohem Komfort und einwandfreien hygienischen TWW-Bedingungen.
- b. Nachweis der Funktionstüchtigkeit des Systems (Heizen, Kühlen, Warmwasser) sowie der Eigenverbrauchsregelung.
- c. Generieren von Datensätzen, insbesondere Energiebilanzen und Arbeitszahlen, für die Kalibrierung der TRNSYS-Simulationen.

Ziel der Labormessungen ist es, Erfahrungen mit dem Aufbau eines Systems mit dezentralen Wärmepumpen mit externer koordinierter Ansteuerung zu sammeln, sowie in einem Praxistest die Umsetzung und Wirkung des Zusammenspiels mit virtuell vorhandenen weiteren dezentralen Wärmepumpen zu analysieren.

Die Versuche sollten einzelne Tage der Simulation nachstellen, welche als relevant für die Jahresresultate erachtet wurden. Sie dienten der Überprüfung und Validierung der Simulation. Tendenziell sind die Sommer- und Wintertage aufgrund der beschränkten Strategie-Wahlmöglichkeiten besser in der Simulation abgebildet. Bei den Übergangstagen im Frühjahr und Herbst kommt es jedoch meist zu grösseren Abweichungen bei Simulation und Messung. Dies ist mitunter aufgrund der Unterschiede vom realen Wärmepumpen-Regler zum simulierten Regler vor allem bei drehzahlgeregeltem Betrieb des Verdichters. Die Identifikation und Erklärung dieser Unterschiede und Einflüsse ist dann sehr wichtig für die Interpretation der Resultate der Jahressimulationen.

Für den Vergleich bedarfsgeregelt und mit Schwarm-Signal wurde die Woche vom 24.-30.03. gemäss Abschnitt 3.1.1 gewählt mit ausreichend PV-Ertrag und anfänglich höherem Heizbedarf.

5.1 Aufbau im Prüfstand

Es wurde eine für das HpCosy System geeignete Wärmepumpe durch die CTA zur Verfügung gestellt, im «Hardware-in-the-Loop» (HIL) Teststand des INEB aufgebaut und in Betrieb genommen. Dabei wurden die Resultate aus in Bezug auf die Hydraulik und Warmwasser-Konfiguration und Regelung berücksichtigt.

Für die Laboruntersuchungen im AP5 wurde ein Gesamtsystem Sole/Wasser-Wärmepumpe in einem Test-Hausnetz mit emulierter TWW-Zapfung, Heizungsabgabe und EWS-Quellenversorgung realisiert. Hierdurch konnten die Einflüsse der Betriebsbedingungen auf den Betrieb der realen Wärmepumpe und den Regler untersucht werden.

Die Labormessungen, welche in mehrtägigen Prüfzyklen erfolgten, dienten zudem der Beurteilung der kurzzeitdynamischen Effekte und Güte der Umsetzung von PV-Strom in Wärme.

Der Systemaufbau im Labor beinhaltet folgende Komponenten und ist in Abbildung 59 dargestellt:

- leistungsgeregelte S/W-Wärmepumpe mit dynamisch emulierter EWS-Quelle und emuliertem Wärmebezug für Raumheizung
- in der Wärmepumpe eingebauter Warmwasser-Speicher, aus dem Warmwasser-Entnahmen nach ErP-Entnahmeprofil erfolgen
- Bemerkung: der übergeordnete Regler ist noch nicht implementiert

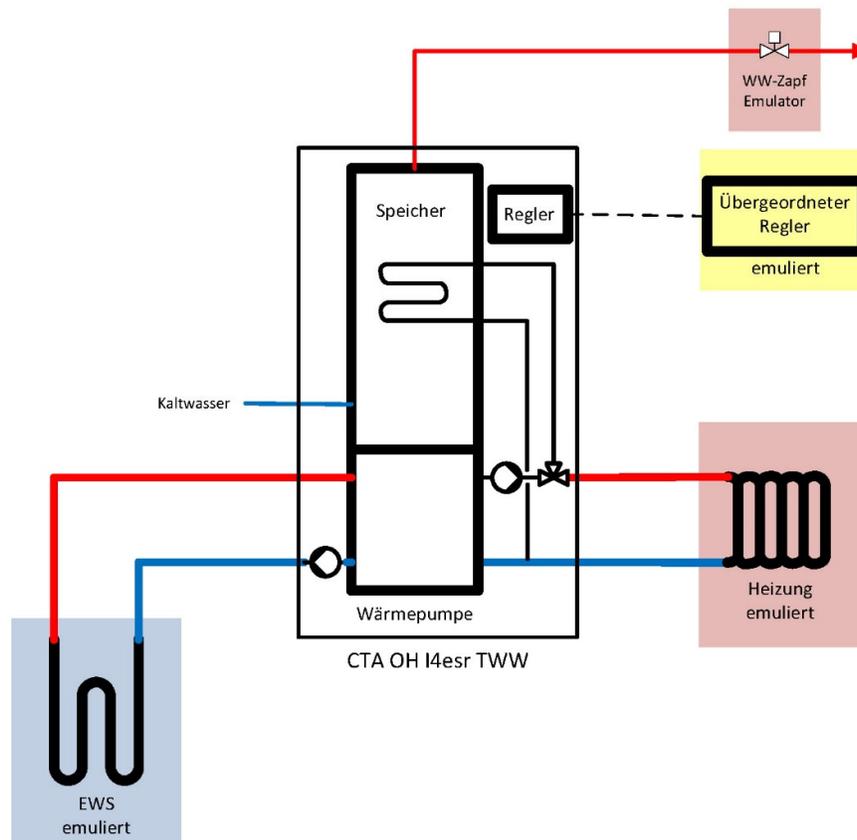


Abbildung 59: Hydraulisches Prinzipschema des Messaufbaus

5.1.1 Simulation/Emulation und "Hardware in the Loop" (HIL)

Die HIL-Komponenten, wie z.B. die Wärmepumpe, sind mithilfe von Emulatoren in das untersuchte System eingebunden.

Der Quellen- Emulator stellt die Bedingungen einer EWS simulationsgeführt nach. Dabei werden die EWS-Austrittstemperaturen und der Volumenstrom gemäss Vorgaben eingeregelt.

Der Sekundärkreis der Wärmepumpe wurde dabei für den Heizbetrieb an den sogenannten Gebäude-Emulator angeschlossen, welcher das Gebäude und dessen Heizungsabgabesystem nachbildet. Der Sekundärkreis für TWW ist innerhalb der Wärmepumpe auf den eingebauten Warmwasserspeicher geführt.

Die Umstellung des Betriebs von Heizung auf TWW-Bereitung erfolgt auf Befehl des Wärmepumpen-Reglers innerhalb der Maschine.



Den thermohydraulischen Emulatoren, wie dem Gebäude-Emulator gemäss Abbildung 60, sind jeweils PID-Software-Regler für Durchfluss, Rücklauf- / und Tanktemperaturen zugeordnet.

Untergeordnete Kaskadenregler für Kühl- und Heizleistung dienen der besseren Regelgüte der Tanktemperaturen. Die Stellventile werden über eine CAN-Bus Verbindung ab einem Leitrechner angesteuert.

Diese Regler erhalten dynamisch ändernde Sollwerte, welche mit einer Matlab/Simulink®-Echtzeit-Simulation mit Carnot-Blocksatz erzeugt werden.



Abbildung 60: Gebäude-Heizungsabgabe-Emulator



5.1.2 Simulations- und Emulationstechnik

Die Echtzeit-Anlagensimulation verrechnet Sensoreingänge mit den Modellen zu neuen Ausgangs- sowie Stellgrößen.

Sämtliche relevanten Messgrößen werden zur Laufzeit visualisiert und in einer Messwert-Datenbank zwecks späterer Auswertung gespeichert. Die Wärmeströme werden jeweils aus gemessenen Volumenströmen, Temperaturdifferenzen und Stoffdaten berechnet.

Das Prinzipschema in Abbildung 61 zeigt die Gesamtanlagenkonfiguration mit dem Bereichen Leitreechner, Datenverarbeitung, Simulation, Regelung und Ansteuerung der Emulatoren.

Die physikalisch vorhandenen Komponenten sind gemäss Herstellerangaben kommunikationsmässig miteinander verbunden.

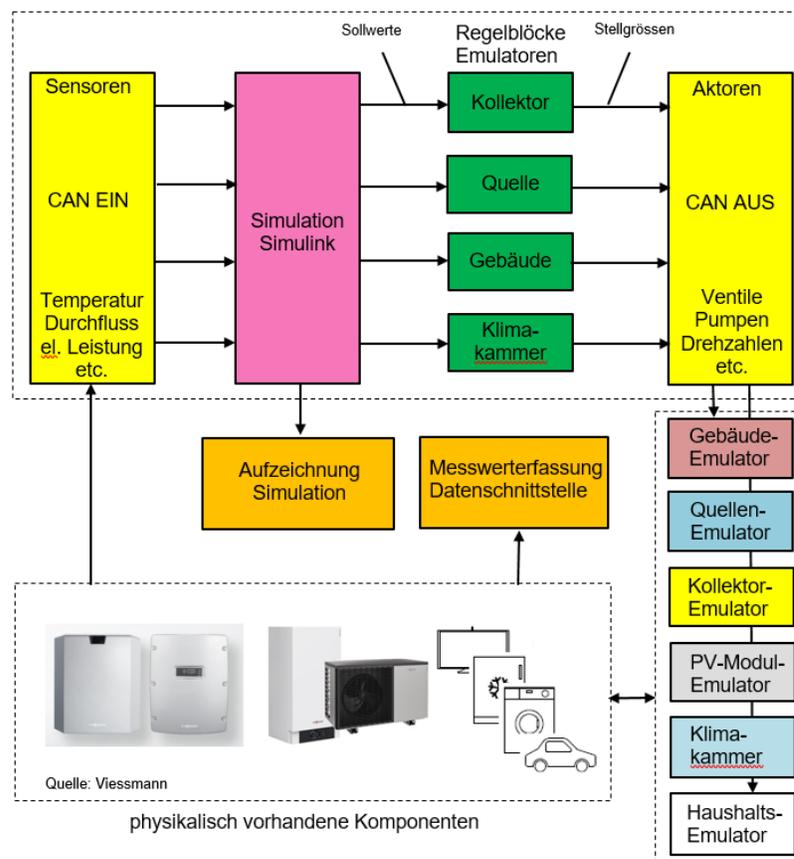


Abbildung 61: Prinzipschema Simulations- und Emulationstechnik für die HIL-Messungen

Das Labor hat auch Emulatoren für Haushaltstrom und PV-Module, welche eigene Regelungen besitzen. Hier reichen die Sollwertvorgaben als elektrische Leistungen bzw. solare Einstrahlung und PV-Modultemperatur.



5.1.3 Instrumentierung der Test-Wärmepumpe

Heizbetrieb:

Heizvolumenstrom mit Vor- und Rücklauf-Temperaturmessung, sowie Auslesung und Messwertspeicherung der Wärmepumpenregler-Informationen.

Warmwasserbezug und -bereitung:

Zapfvolumenstrom mit Temperaturmessungen für Warmwasserbezug und Kaltwassereintritt mit Auslesung und Messwertspeicherung der Wärmepumpenregler-Informationen.

Messwerterfassung Elektroanschluss



Hausanschluss und Verteiler mit Emulatoren für den Haushaltsstrombezug.

Regelung der Haushaltsstrom-Emulatoren mittel Beckhoff SPS.

Messung der elektrischen Leistungen mittels Beckhoff Leistungsklemmen und Stromspulen.

Abbildung 62: Hausverteiler mit Energy-Metern, SPS-Steuerung, Messwandlern und Haushaltsstrom-Emulatoren



5.1.4 Vorbereitungen zur HIL-Messung

Vor jedem Start einer HIL-Messung wird eine mehrtägige Vorsimulation durchgeführt, um korrekte Startwerte (Wert und zeitliche Ableitung) für Raumtemperatur, Heizungsrücklauf-Temperatur etc. zur Verfügung zu haben (sogenannte Final States). Bei der folgenden HIL-Messung und Simulation werden diese Daten dann als Startwerte (Initial States) eingelesen. Abbildung 63 zeigt den zeitlichen Ablauf einer HIL-Messung.

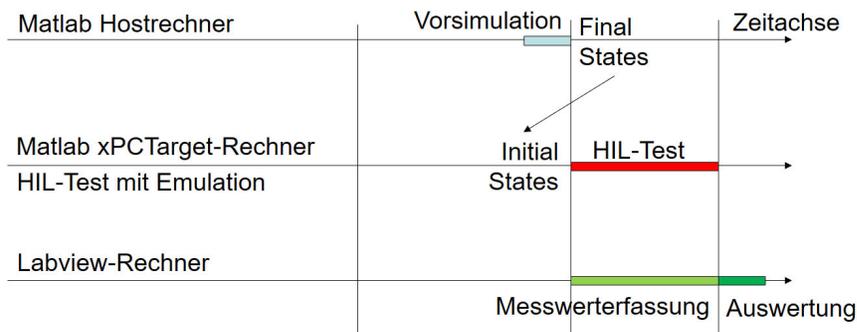


Abbildung 63: Darstellung des Messablaufes mit Vorsimulation und anschliessender HIL-Messung

5.1.5 Visualisierung

Der Testverlauf wird mithilfe von Labview-Visualisierungen gemäss Abbildung 64 verfolgt. Nachfolgend ist die Maske der Wärmepumpe mit dem Quellen- und Senken-Emulator.

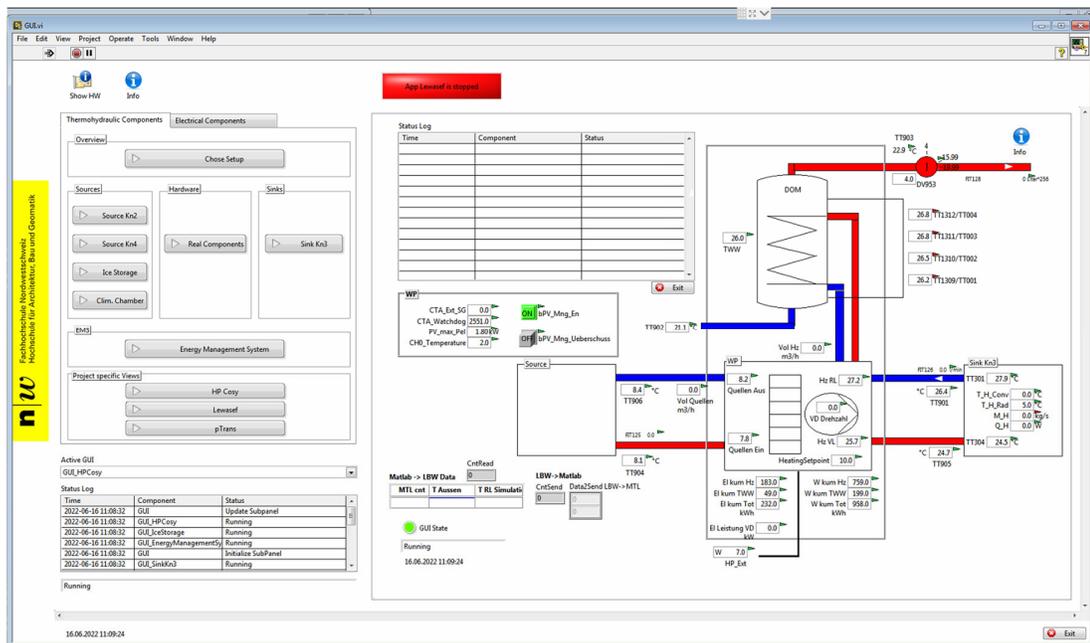


Abbildung 64: Labview-Visualisierung der Wärmepumpe am Leitstand



5.1.6 Untersuchte Hardware-Komponenten

Abbildung 65 zeigt die im ERL aufgestellte und angeschlossene Sole/Wasser Wärmepumpe CTA OH I 4esr TWW (Kompaktgerät).



Abbildung 65: Wärmepumpe CTA OH I 4esr TWW mit Warmwasserspeicher

Die Nenndaten der getesteten Wärmepumpe sind in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Nenndaten der Wärmepumpe

Normleistungsdaten (nach EN 14511:2013, Teillastbetrieb 60 Hz)	Wert	Einheit
Heizleistung B0/W35	3.8	kW
Leistungsbereich min/max	2.0 - 7.5	kW
COP bei B0/W35	4.7	-
El. Leistungsaufnahme bei B0/W35	0.8	kW
Kälteleistung bei B0/W35	3.0	kW
Warmwasserspeicher Nettoinhalt	220	Liter



Abbildung 66 zeigt das Leistungsdiagramm CTA OH I 4esr. Gut zu erkennen ist die Drehzahlabhängigkeit der Leistung und des COP-Wertes mit dem Bestpunkt bei rund 60 Hz. Auf Abbildung 67 ist die Heizleistung bei B0/W35 in Funktion der Verdichterdrehzahl und Quelltemperatur. Die Grafiken entstammen der Produktleitung.

Heizleistung in kW

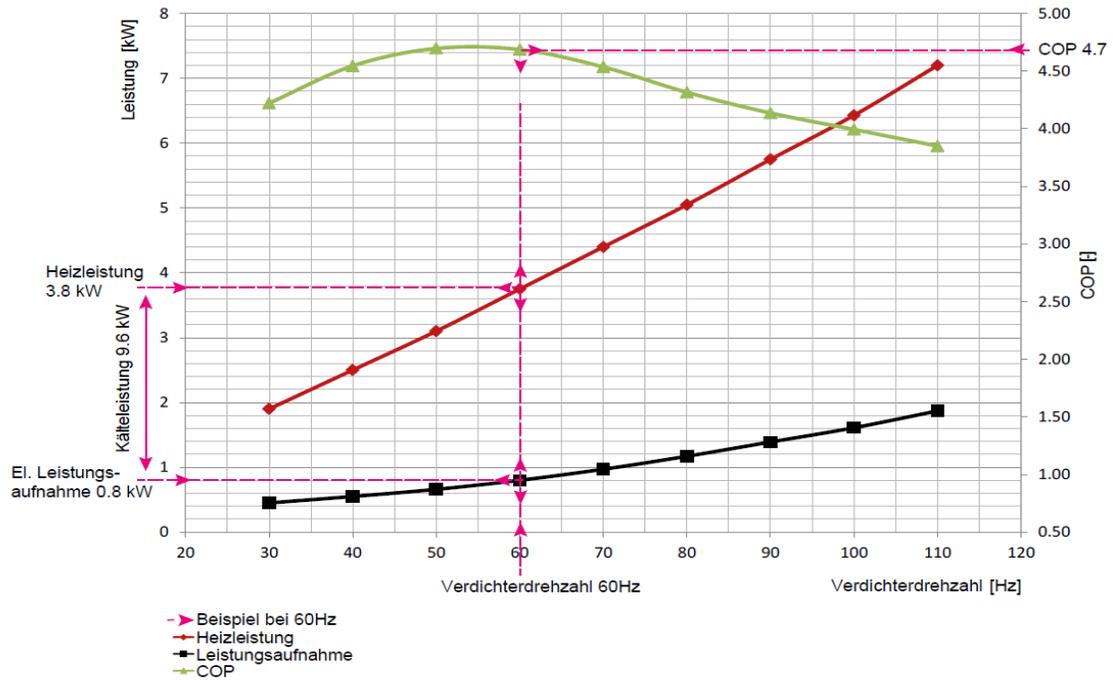


Abbildung 66: Leistungsdiagramm OH I 4esr TWW mit Optiplus Regler 3 nach EN 14511 B0/W35 (3K/5K)

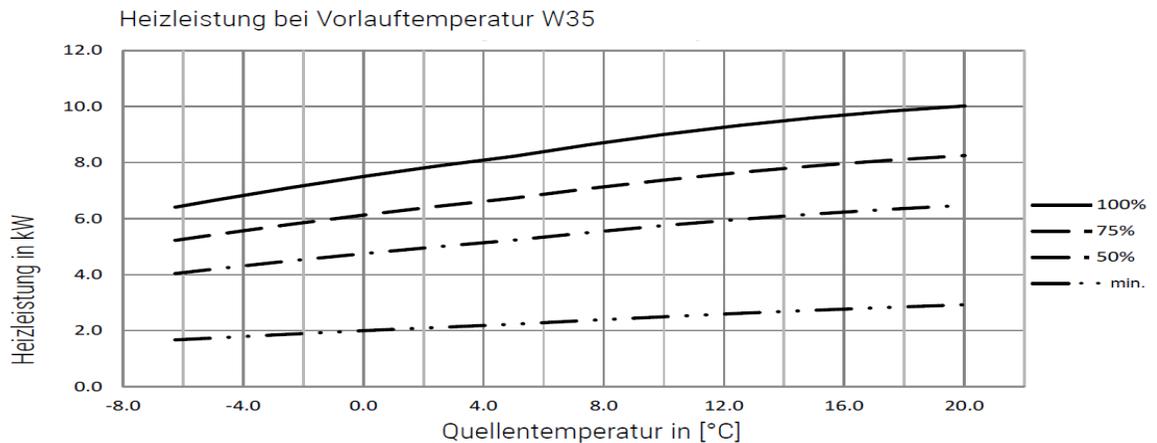


Abbildung 67: Leistungsdiagramm OH I 4esr TWW mit Optiplus Regler 3 in Funktion der Quelltemperatur



5.1.7 Messung des Schichtungsverhaltens des TWW-Speichers

Das Schichtungsverhalten konnte mit der Messung von TWW-Temperaturen auf verschiedenen Höhen im Speicher sichtbar gemacht werden. Dazu wurde eine Messtauchhülse mit vier Temperaturfühler im Speicher verbaut. Der TWW-Speicher hat eine Gesamthöhe von 1300 mm.

Die Temperaturfühler waren auf die Höhen 400, 700, 1000 und 1300 mm ab Unterkante TWW-Speicher gesetzt.

Abbildung 68 zeigt die geöffnete Wärmepumpe mit dem gedämmten TWW-Speicher. Die roten Kreise markieren die Höhen der Temperaturfühler. Die Messtauchhülse ist in rostfreiem Stahl. Dieses Material besitzt einen schlechten Wärmeleitkoeffizienten. So können Wärmeleitungen in der Höhenrichtung eliminiert werden. Die radiale Wärmeleitung ist ausreichend für die Temperaturerfassung der jeweiligen Schicht.



Abbildung 68: Temperaturmessstellen auf vier verschiedenen Höhen im TWW-Speicher



5.2 Messdatenerfassung zur Parametrisierung der Simulationsmodelle

Die Messdaten des Systems wurden zur Parametrisierung der Simulationsmodelle verwendet. Dazu wurden einzelne Betriebszustände im Kurzzeittest gemessen. Weitere 7-Tage-Tests dienten dazu, das WP-System mit TWW-Speicher eine Woche unter simulierten und emulierten Randbedingungen zu untersuchen.

Die durchgeführten Messungen:

- 7-Tage-Test Speicherladung und TWW-Zapfungen EN 16147:2017 (Messung 001)
- Heizen stationär EN 14511:2018 (Messung 002) siehe Anhang D
- 7-Tage-Test mit Heiz- und TWW-Betrieb, mit Simulation und Bedarfsregelung (Messung 007)
- 7-Tage-Test mit Heiz- und TWW-Betrieb, mit Simulation und Schwarmsignal (Messung 011)

5.2.1 7-Tage-Test Speicherladung und TWW-Zapfungen gemäss EN 16147:2017

Ziel dieser Messung war die Bestimmung der Effizienz der Warmwasserladung sowie die Erfassung von Daten zur Parametrisierung der Simulationsmodelle. Hierzu wurde der Heizbetrieb beim WP-Regler deaktiviert, sodass nur TWW Bereitungen stattfanden. Die TWW Zapfungen bzw. Entladungen wurden mittels eines automatischen Regelventils zeitprofilgesteuert durchgeführt. Bei jedem Zapfen wurde der entsprechende Energiebezug ermittelt, und beim Erreichen des Energiesollwertes das Ventil geschlossen.

Messung: 001
Messwert-File: 20211025_7Tage_Messdaten_HpCosy
Beginn: 25.10.2021 11:35
Ende: 01.11.2021 09:00

Beschrieb:
1 Speicher laden bis 55°C von 10°C aus (eff = 13°C)
2 EN 16147 Zapfungen mit Profil L während 4 Tagen
3 Bereitschaftsphase während 3 Tage
4 Quellentemperatur konstant

Tabelle 23: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen

Bezeichnung	Wert	Einheit
TQuelle	5	°C
Spreizung Quellenkreis	3	K
Sollwert am Regler eingestellt	3.5	K
TWW-Solltemperatur	55	°C
TWW-Hysterese	6	K
TWW-Lademodus	konstant	



Die Abbildung 69 zeigt die TWW-Temperaturverläufe für das Kalt- und Warmwasser, die vom WP-Regler gemessene Speichertemperatur und die TWW-Zapfvolumenströme.

Zu erkennen sind der 4 Tage Zapf- und der 3 Tage Bereitschaftsbetrieb.

Die Zapfungen erfolgten gemäss dem Bezugsprofil L nach EN 16147:2017.

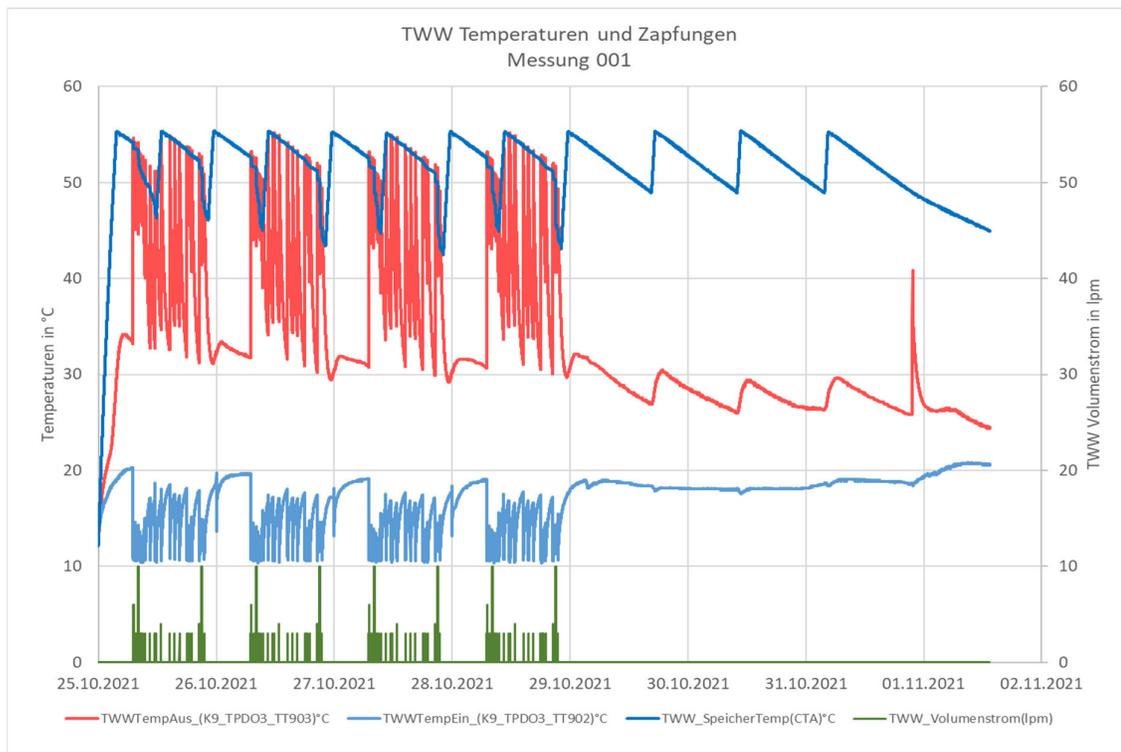


Abbildung 69: TWW-Speichertemperaturen im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb (Messung 001))

Auf Abbildung 70 sind die Temperaturen der WP-Quelle und Senke im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb) dargestellt.

Die obere blaue Kurve ist die vom Regler gemessene Tanktemperatur, welche zur Ansteuerung verwendet wird. Die Temperaturkurven (orange und gelb) sind die Vor- und Rücklauftemperaturen der WP. Gut sichtbar sind die Lade- bzw. Nachladevorgänge. Die unteren Kurven (blau und violett) sind die Quellen-Vor- und Rücklauftemperaturen. Im Nichtbetrieb der Wärmepumpe ist ein leichtes Schwingen der Quellentemperatur festzustellen, welches auf die Regelung des Emulators zurückzuführen ist. Im Betrieb werden die Temperaturen konstant gehalten.

Abbildung 71 visualisiert die Energien für die TWW-Bereitung und -Zapfung, sowie die elektrische Verdichterleistung und -energie. Die grössere Ladung am Anfang ist das Laden von 13°C auf 55°C.

Danach kommen zwei Nachladungen pro Tag (4x) und je eine kurze Nachladung während des Bereitschaftsbetriebs (3x), bei denen nur die Speicherverluste kompensiert werden.

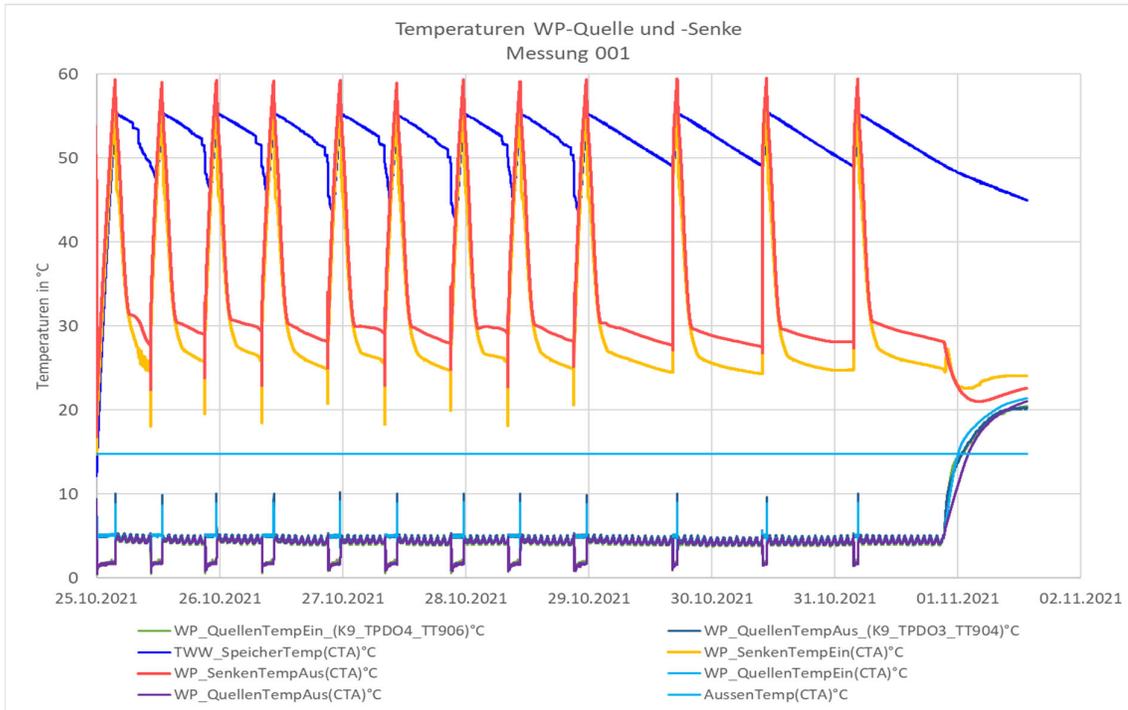


Abbildung 70: Temperaturen WP Quelle und Senke im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb)

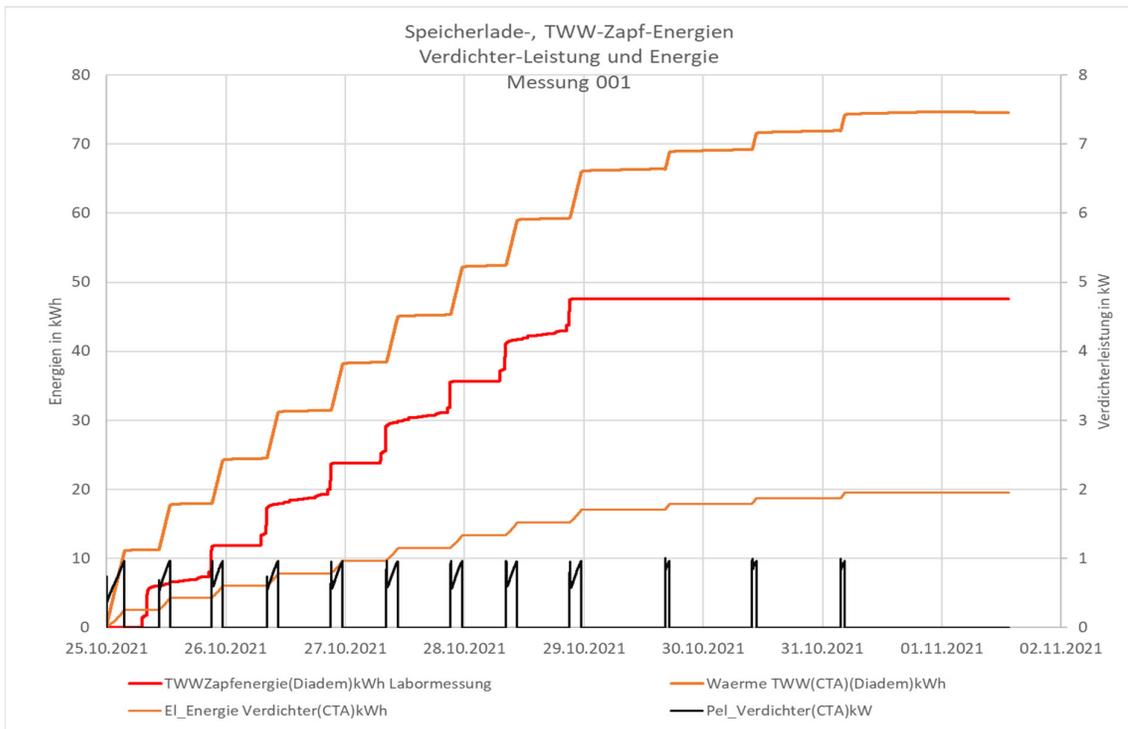


Abbildung 71: Speicherlade-, TWW-Zapf-Energien im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb)

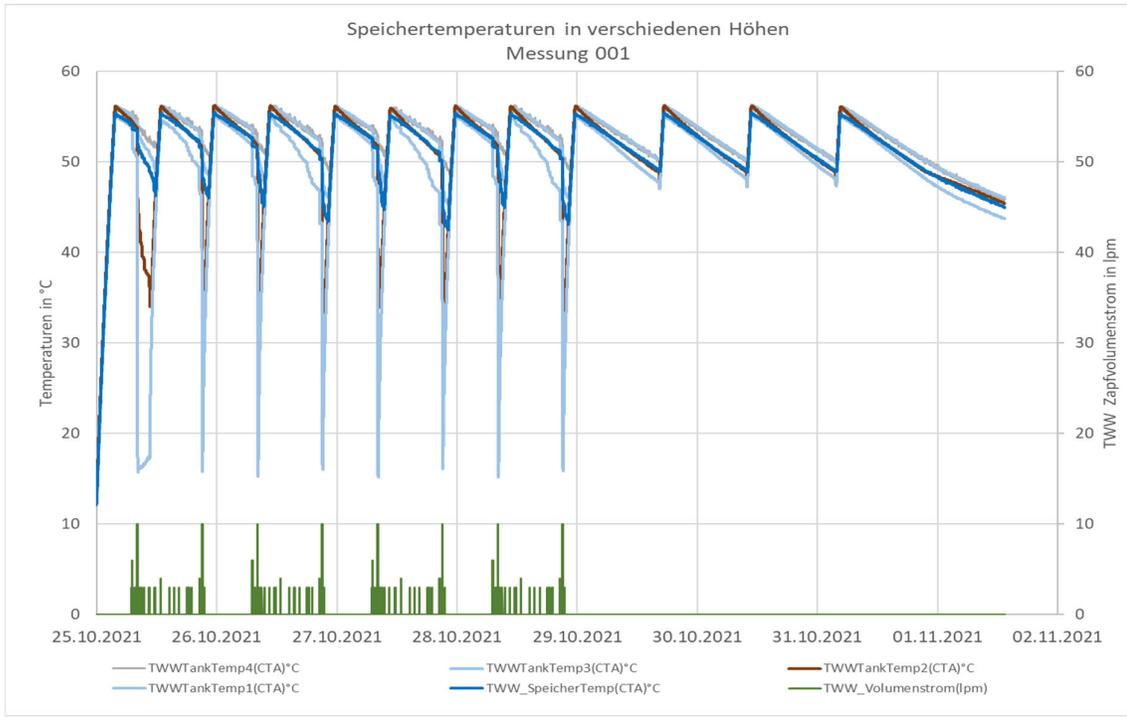


Abbildung 72: Temperaturen TWW-Speicher im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb)

Abbildung 72 zeigt den Verlauf der gesamten Messung. Die Speichertemperaturen (Tww1 bis Tww4) wurden an den, in Abbildung 68 gezeigten Positionen gemessen. Neben den Temperaturen im Speicher ist auch der Volumenstrom der WW-Zapfungen zu sehen.

Die Messung besteht aus den beschriebenen drei Phasen: Eine Initial-Aufheizung des Speichers, gefolgt von vier Tagen mit dynamischen Entladungen gemäss Zapfprofil und einer drei-tägigen Bereitschaftsphase. In dieser Phase ist ein Nachladen täglich zu erkennen, um die Speicherverluste zu kompensieren.

Abbildung 73 zeigt der Verlauf eines einzelnen 24-h Zyklus mit Entladung gemäss Zapfprofil und Beladung nach der bedarfsorientierten Regelung im Detail.

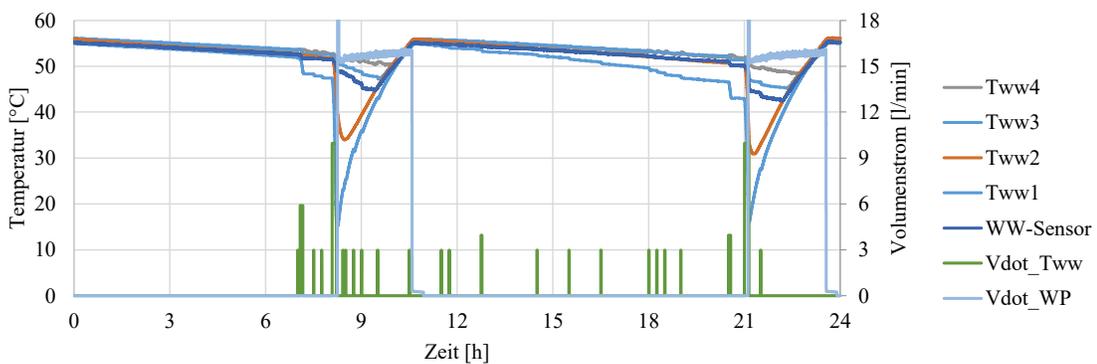


Abbildung 73: Tanktemperaturen, Lade- und TWW-Zapfvolumenströme während eines Tages



Aus den Messdaten wurde die, nach Leistung gewichtete, mittlere Vorlauftemperatur von Be- und Entladung berechnet:

$$\overline{T}_{WW,VL} = \frac{\sum(T_{WW,VL,i} \cdot \dot{Q}_{WW,i})}{\sum \dot{Q}_{WW,i}} \quad \text{Formel 1}$$

$$\overline{T}_{WP,VL} = \frac{\sum(T_{WP,VL,i} \cdot \dot{Q}_{WP,i})}{\sum \dot{Q}_{WP,i}} \quad \text{Formel 2}$$

Der Mittelwert der WW-Lieferung betrug 51.5 °C, die Wärmelieferung durch die WP (Vorlauf) erfolgte mit 44.7 °C.

Zur Deckung der täglich mittels WW gelieferten 11.9 kWh wurde der Speicher mit 13.2 kWh beladen. Entsprechend betragen die thermischen Verluste 1.4 kWh/d.

Die elektrische Energiebezug der WP betrug 4.1 kWh. Entsprechend errechnet sich die Arbeitszahl mit 3.3 bzw. 2.9 unter Berücksichtigung der thermischen Verluste.

Zusätzlich zur Auswertung von Temperaturen und Energie wurde auch die Entropiebilanz der 24-h Zyklen mit aktiver Be- und Entladung bestimmt, um daraus die Schichtungseffizienz des Speichers zu bestimmen. Die Auswertung wurde nach der am SPF entwickelten Methode zur Messung der Schichtungseffizienz durchgeführt (Haberl R. et al. 2021). In Tabelle 24 sind die berechneten Entropiewerte der Messung dargestellt. Die Entropieproduktion des gemessenen Speichers betrug 5.79 kJ/K. Die Entropieproduktion eines völlig durchmischten Speichers bei identischem Zapfprofil beträgt 12.75 kJ/K. Demnach beträgt die Schichtungseffizienz des Speichers nach Formel 3 54.6 %.

$$\text{Schichtungseffizienz} = 1 - \frac{\text{Entropieproduktion gemessen}}{\text{Entropieproduktion Referenzsystem}} \quad \text{Formel 3}$$

Tabelle 24: Entropiebilanz eines 24-h Zyklus aus der Messung mit Speicherladung und TWW-Zapfungen.

TWW	[kJ/K]	140.6
WP	[kJ/K]	151.8
Speicheränderung	[kJ/K]	-0.1
Verluste	[kJ/K]	17.1
Total	[kJ/K]	5.79



5.2.2 Heizen stationär EN 14511:2018

Mit stationären Messungen (Messung 002) wurden die Leistungsdaten gemäss Datenblatt nach EN 14511:2018 bei B0/W35 und B0/W55 überprüft.

Im Anhang D sind die Messungen bei konstanten Bedingungen dargestellt.

Auf Abbildung 91 sind die Senkenleistungen, die elektrische Aufnahmeleistung und die Soll Drehzahl des Verdichters ersichtlich, gemessen von der Laborinstrumentierung und ausgegeben vom Wärmepumpenregler.

Die elektrische Leistung des Verdichters wird vom Umrichter gemessen und dem Regler mitgeteilt. Die thermische Leistung der Abgabeseite wird mittels Messung des sekundärseitigen Volumenstroms und der Temperaturspreizung des Kreises erfasst. Die Sensoren sind bei beiden Betriebsarten TWW-Bereitung und Heizen aktiv und identisch. Der Regler ordnet die Leistungen der Betriebsart zu, sodass der nachfolgende Energierechner die Aufteilung TWW-Bereitung und Heizbetrieb erfassen kann.

Die entsprechenden Energien werden aus den gemessenen/gerechneten Leistungen im Regler intern hochintegriert.

Der Vorlauf-Temperaturfühler wurde beim CTA-Regler abgeglichen, sodass die vom Labor gemessenen und gerechneten Leistungen denen der Reglerausgabe entsprechen.

5.2.3 Warmwasser, Raumheizung bedarfsgeregelt (ohne Schwarmsignal)

Das System wird in einer Standardkonfiguration ohne PV-Eigenverbrauchsregelung ausgemessen und die Resultate werden mit den Resultaten aus AP3 verglichen.

Messung: 007
Messwert-File: HpCosy_7T_280722_Test007
Beginn/Ende: 21.07.2022 13:30 / 28.07.2021 13:30

Beschrieb:

- 1 Heiz- und TWW- Betrieb mit Simulation des Heizungsrücklaufes aus dem Gebäudemodell
- 2 TWW- Zapfungen EN 16147:2017 Profil L während 7 Tagen

Tabelle 25: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen

Bezeichnung	Wert	Einheit	Bemerkung
Quellentemperatur	3	°C	konstant
Temperaturspreizung Quellenkreis	3	K	3.5 K Sollwert am Regler
Heizkennlinie Steilheit	0.46	-	
Heizhysterese	6	K	
TWW-Temperatur Soll / reduziert	55	°C	
TWW-Hysterese	4	K	
TWW-Lademodus	konstant		
TWW-Zeitprogramm	11h45-14h00, 19h30-21h00		



5.2.4 Warmwasser, Raumheizung, Erhöhung Eigenverbrauch mit Schwarm-Steuerung

Die Eigenverbrauchsregelung / Schwarmsteuerung wird im Teststand implementiert und das System mit dieser Steuerung nochmals ausgemessen. Kompressorlaufzeiten, Start- und Stoppvorgänge sowie Temperaturniveaus der Wärmepumpe werden analysiert und mit den Resultaten aus den Simulationen verglichen.

Messung: 011
Messwert-File: HpCosy_7T_240322_300322_Test011
Beginn / Ende: 19.08.2022 13:56 / 26.08.2022 13:56

Beschrieb:

- 1 Heiz- und TWW- Betrieb mit Simulation des Heizungsrücklaufes aus dem Gebäudemodell
- 2 TWW- Zapfungen EN 16147:2017 Profil L während 7 Tagen
- 3 Mit Schwarm-Steuersignal

Tabelle 26: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen

Bezeichnung	Wert	Einheit	Bemerkung
Quellentemperatur	3	°C	konstant
Temperaturspreizung Quellenkreis	3	K	3.5 K Sollwert am Regler
Heizkennlinie Steilheit	0.46	-	
TWW-Temperatur Soll / reduziert	55 / 48	°C	Dynamisch angepasst
TWW-Hysterese	4	K	
TWW-Lademodus	konstant		
TWW-Zeitprogramm	10h00-12h15, 19h30-21h00		

Vergleiche der TWW und Heiztemperaturen Messungen 007 und 011

Abbildung 74 zeigt den Vergleich zwischen den Messungen 007 und 011 bei den TWW- Temperaturen und den Zapfungen. Bei der Messung 011 mit Schwarmsignal-Ansteuerung erkennt man die tägliche Anhebung der TWW-Solltemperaturen meist auf 58°C, was dem Legionellenschutz-Einstellwert entspricht.



5.2.5 Grafische Vergleiche der Messungen 007 und 011

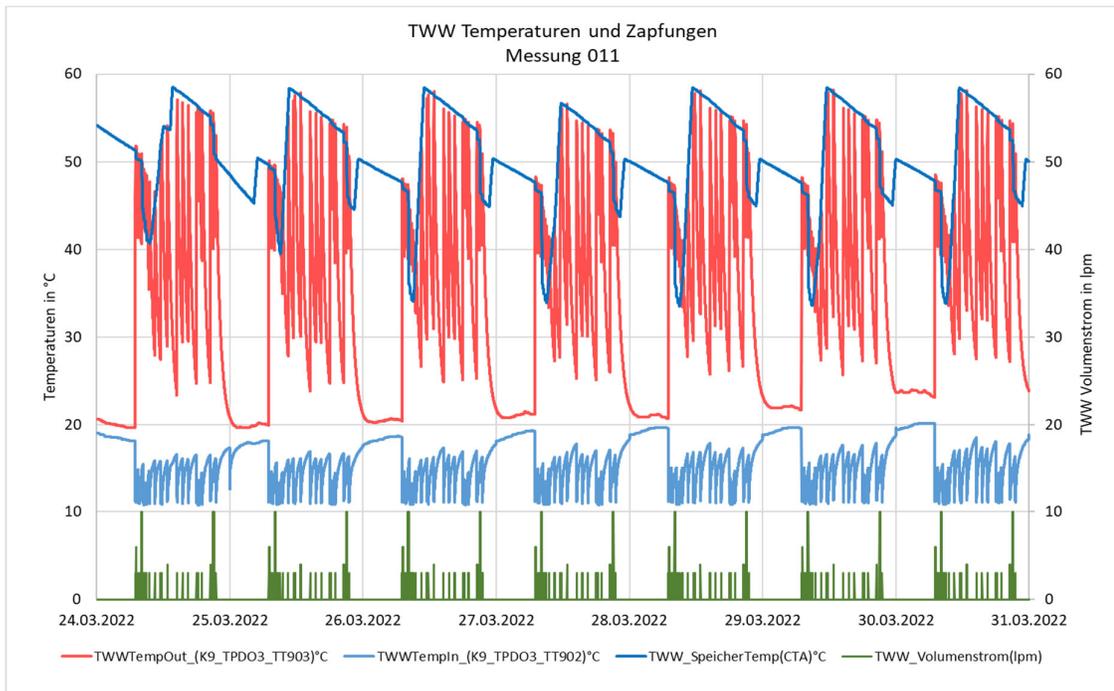
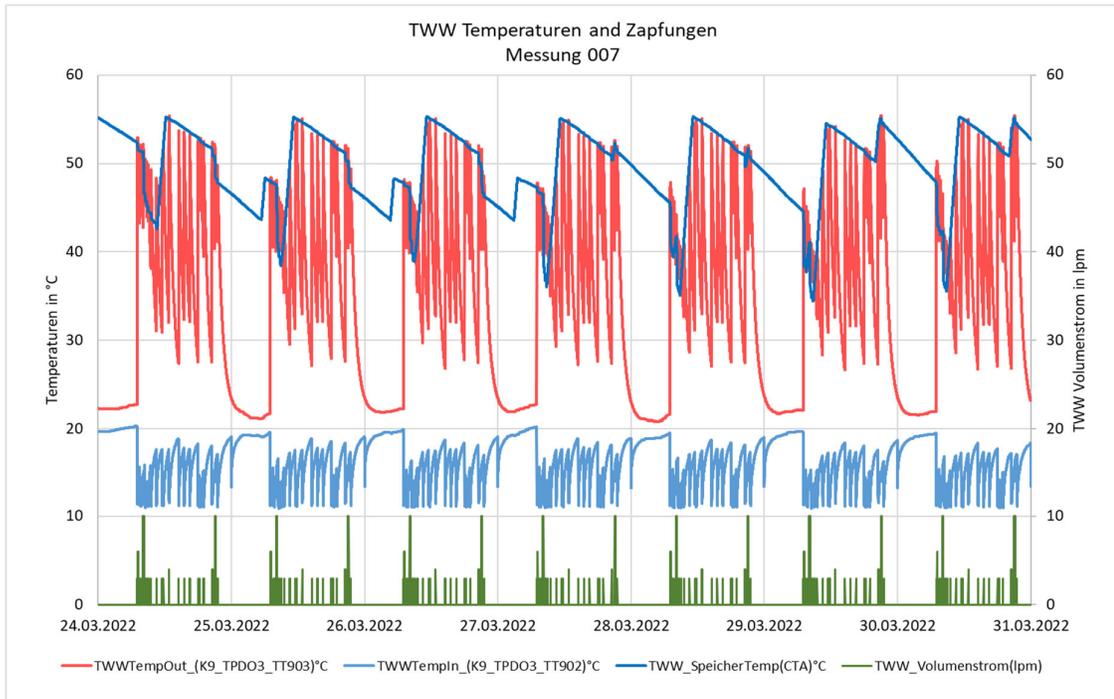


Abbildung 74: TWW Temperaturen und Zapfungen Messung 007 und 011



Vergleiche der Quellen- und Senktemperaturen Messungen 007 und 011

In Abbildung 75 werden die WP-Quellen- und Senktemperaturen für die beiden Messungen 007 und 011 gezeigt. Bei der Gebäudeheizung ist die Vorlauftemperatur-Sollwertvorgabe für die Beurteilung der Reaktion des WP-Reglers interessant. Bei der Messung 007 ist die Vorlauftemperatur anfänglich ca. 30°C bis Mitte der Messwoche. Danach wird der Sollwert aufgrund der ansteigenden Aussentemperatur reduziert. Die Einschaltungen der Heizfunktion ist anfänglich durchgehend, dann ab Wochenmitte nur in der Nacht.

Bei Messung 011 erkennt man ein anderes Muster. Bei dem tagsüber positivem Schwarmsignal wird der Vorlaufsollwert meist stetig angehoben. Der Nachtheizbetrieb wird in den letzten drei Tagen in der Regel vermieden.

Die Zahl der Einschaltungen ist bei Messung 011 beinahe doppelt so gross wie bei Messung 007. Hier ist zu prüfen, ob der Betrieb einen negativen Einfluss auf die WP-Lebensdauer hat.

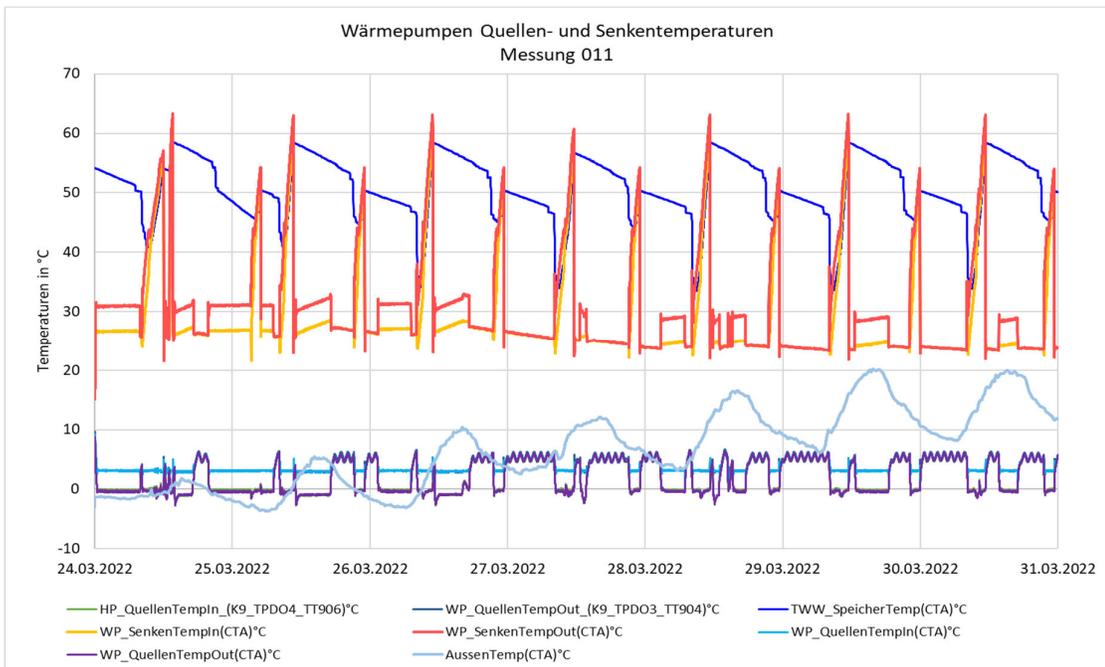
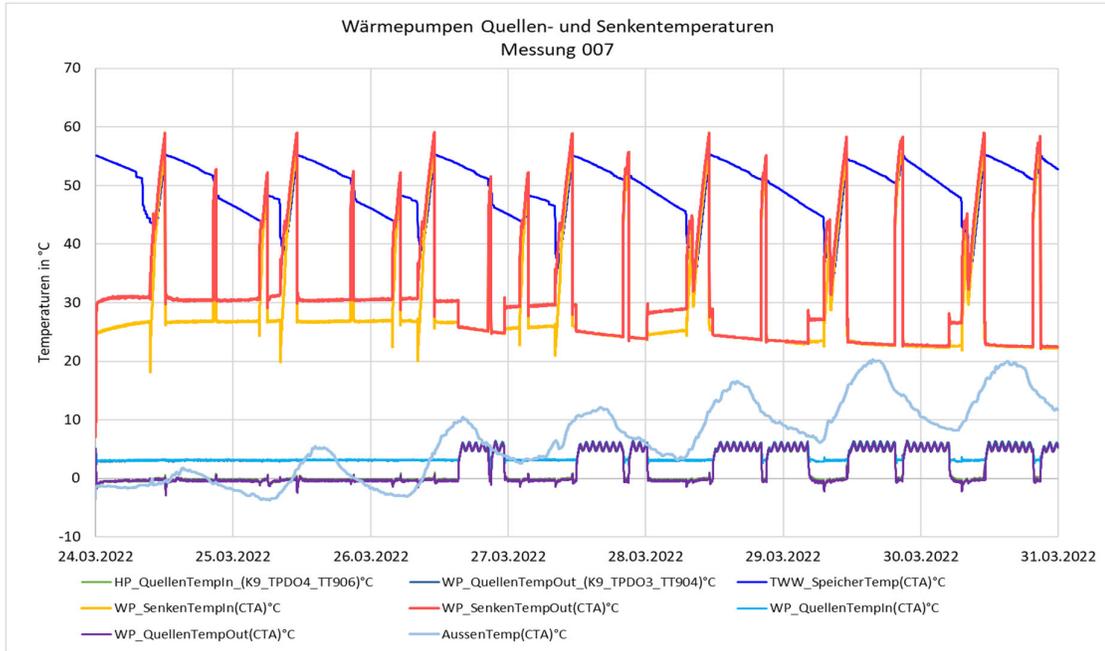


Abbildung 75: Temperaturen WP-Quelle und -Senke Messung 007 und 011

Abbildung 76 veranschaulicht die Verläufe der Wassertemperaturen auf verschiedenen Höhen des Speichers während der Testwoche. Bei der Messung 007 ist die Schichtung des Speichers markanter als beim Test 011.

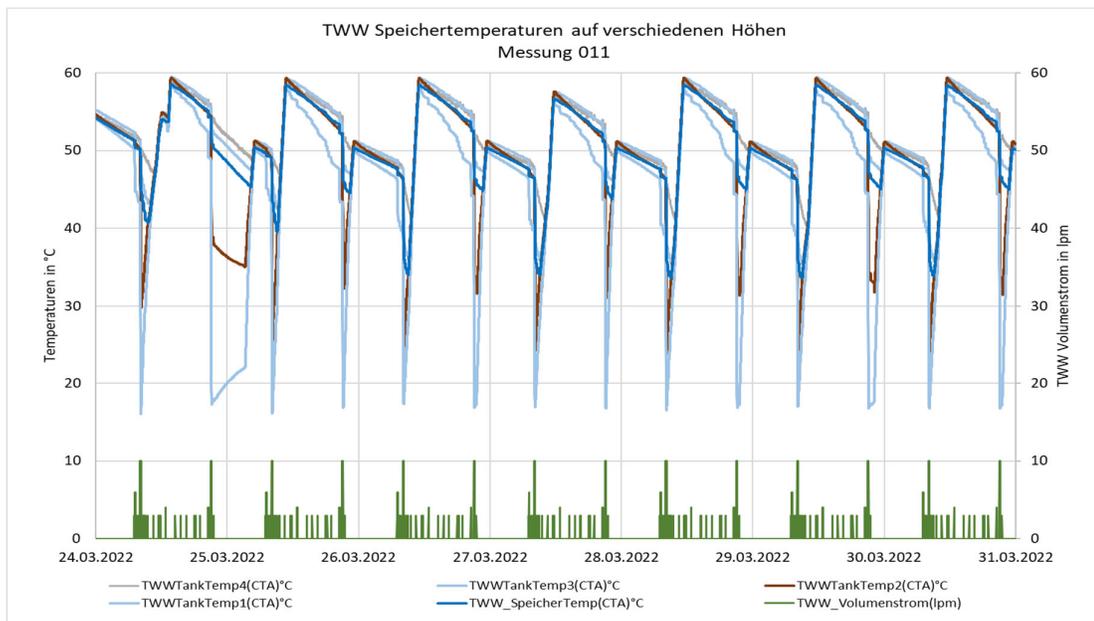
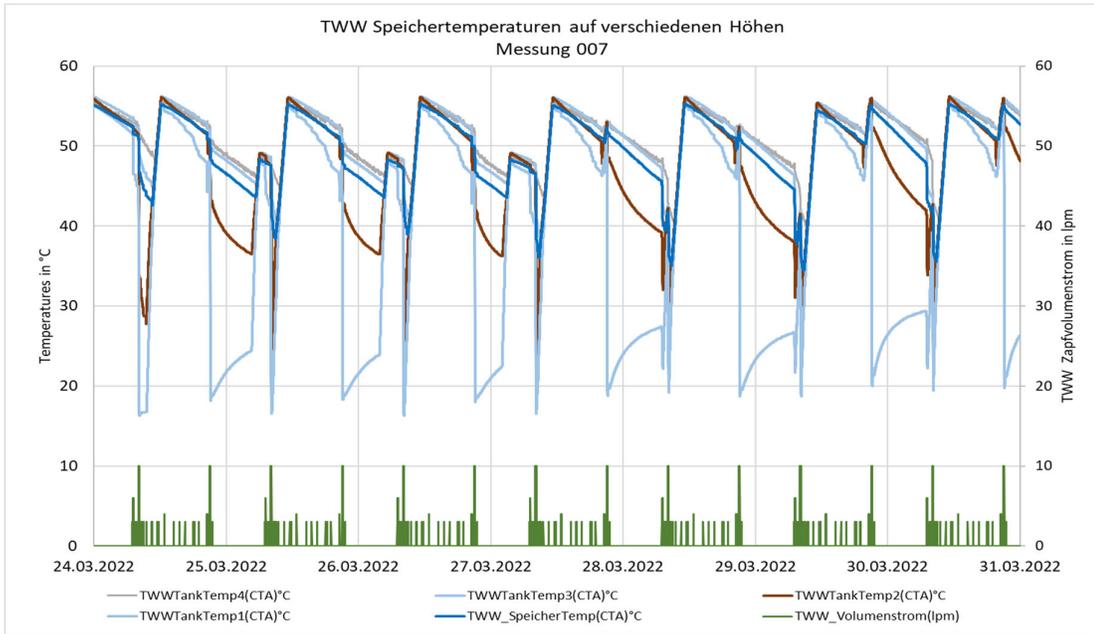


Abbildung 76: Speichertemperaturen in verschiedenen Höhen Messung 007 und 011

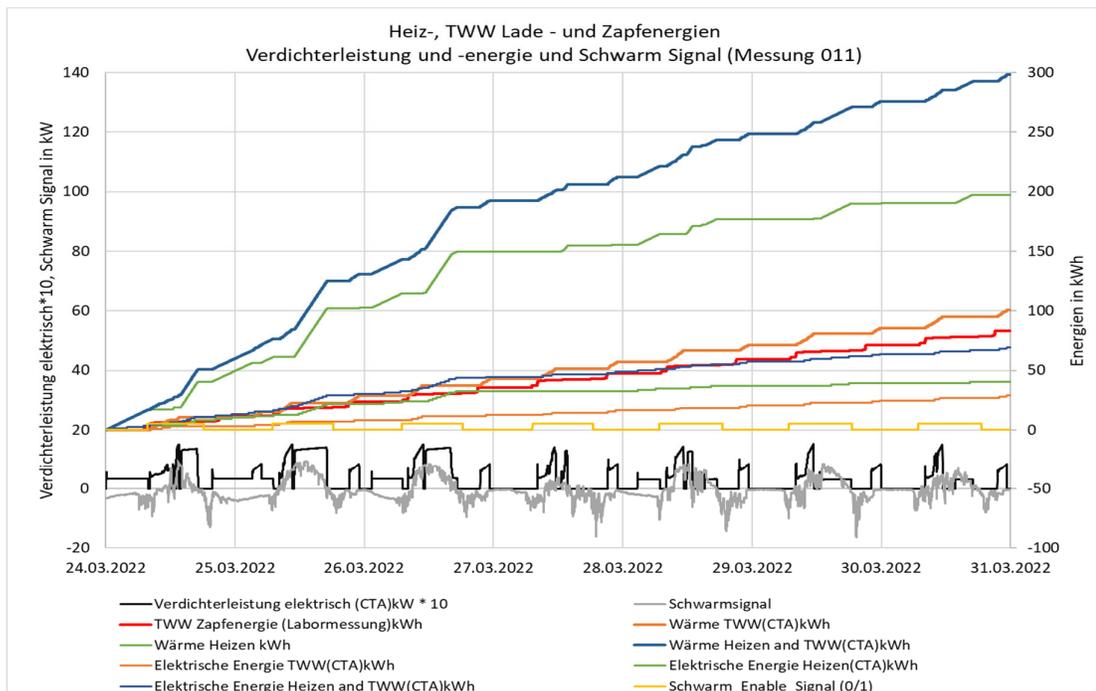
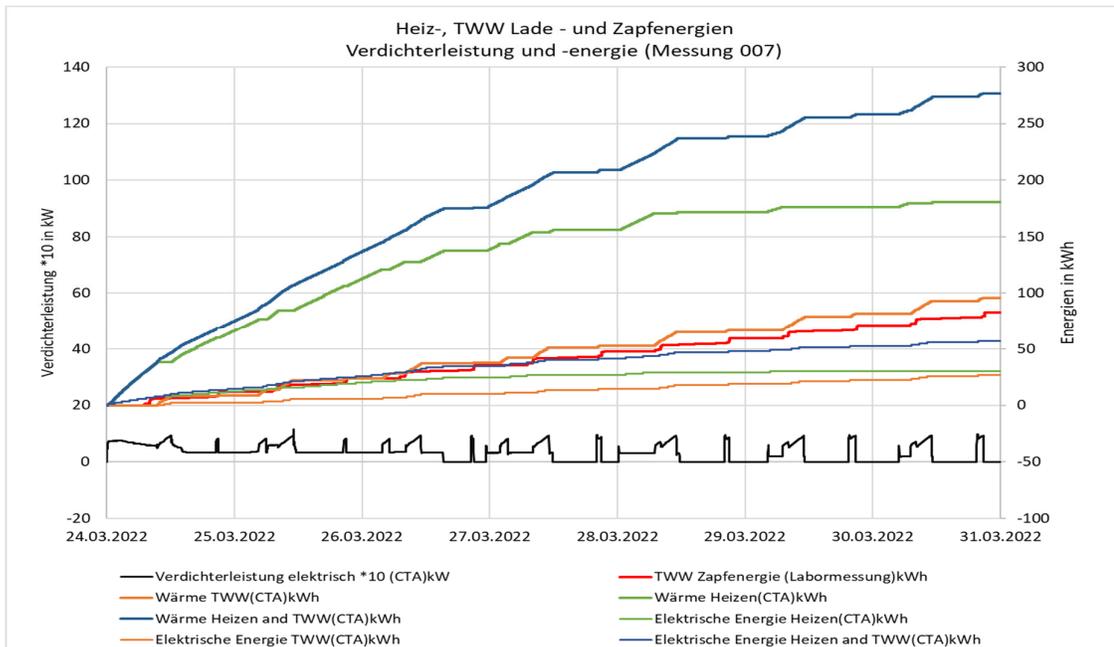


Abbildung 77: Heiz-, Speicherlade-, TWW-Zapf-Energien Verdichter-Leistung und -energie Messung 007 und 011

Abbildung 77 visualisiert den Vergleich der Energien für Heizen und die TWW-Bereitung der beiden Messungen 007 und 011. Messung 007 ist rein bedarfsgesteuert. Bei der Messung 011 ist das Schwarmsignal (graue Kurve im unteren Bereich des Diagramms) und mit der Funktion des Schwarm Enable-Signals (gelbe Kurve) sichtbar. Das Schwarmsignal fordert eine erhöhte Stromnutzung tagsüber während den ersten drei Tagen, was im steileren Anstieg der Heizwärmern ersichtlich ist.



Tabelle 27: Auswertung WP Energien und Effizienzen Messung 011 im Vergleich zur Messung 007

Grösse	Einheit	Messung 007 Bedarf			Messung 011 Schwarm			Veränderungen Messung 007 -> 011		
		Total	Netzstrom	Eigenverbrauch PV	Total	Netzstrom	Eigenverbrauch PV	Total	Netzstrom	Eigenverbrauch PV
Wärme Heizen	kWh	181			197			+9%		
Wärme TWW	kWh	96			101			+5%		
Wärme Heizen+ TWW	kWh	277			298			+8%		
Elektr. Energie Heizen	kWh	32	25	7	41	21	20	+28%	-15%	+190%
Elektr. Energie TWW	kWh	27	16	11	29	14	15	+6%	-12%	+30%
Elektr. Energie Heizen+ TWW	kWh	59	41	18	70	35	35	+18%	-14%	+90%
COP Heizen	-	5.66			4.82			-15%		
COP TWW	-	3.54			3.52			-1%		
COP Heizen+ TWW	-	4.69			4.29			-9%		

Tabelle 27 zeigt die Endenergie für Heizen, Warmwasserbereitung, Elektrizität und die durchschnittlichen COP-Werte nach 7 Testtagen für Messung 007 und 011. Die «Wärme Heizen» ist die Wärme, welche von der WP an das Heizsystem geliefert wird. Die «Wärme TWW» ist die von der WP an den TWW-Speicher gelieferte Wärme. Die gelieferte Energie ab dem TWW - Speicher ist jeweils 83 kWh bei den Messungen 007 und 011.

Messung 011 zeigte 9% höhere Energiewerte für Heizen (197 kWh) und 5% höhere für die TWW-Bereitung (101 kWh) und niedrigere Werte für die mittleren COP für den Heizbetrieb, die TWW-Bereitung. Der Elektrizitätsaufwand ist um 18% gesamthaft gestiegen. Dies ist zum einen auf die gewählten Schwarm-Signalparametrierung, zum anderen auf die spezifizierte Testwoche mit ausreichend PV-Ertrag zurückzuführen. In der Testwoche hat sich der Netzbezug mit der Schwarm-Signalnutzung um 14% verringert und der PV-Eigenstromverbrauch um 90% positiverweise erhöht.

Der forcierte Betrieb und die Anhebung der Solltemperaturen für Heizen und TWW-Bereitung führten in der Testwoche zu vermehrtem Betrieb in Bereichen geringerer Effizienz der WP infolge der etwas grösseren gefahrenen Temperaturhüben. Bei einer Testwoche mit geringerem PV-Ertrag würden die Temperatur-Sollwerte herabgesetzt und damit der Elektrizitätsverbrauch gesenkt. Die AP3 Simulationen haben diese unterschiedlichen Wochen berücksichtigen können.



Vergleich der Messungen hinsichtlich Behaglichkeit

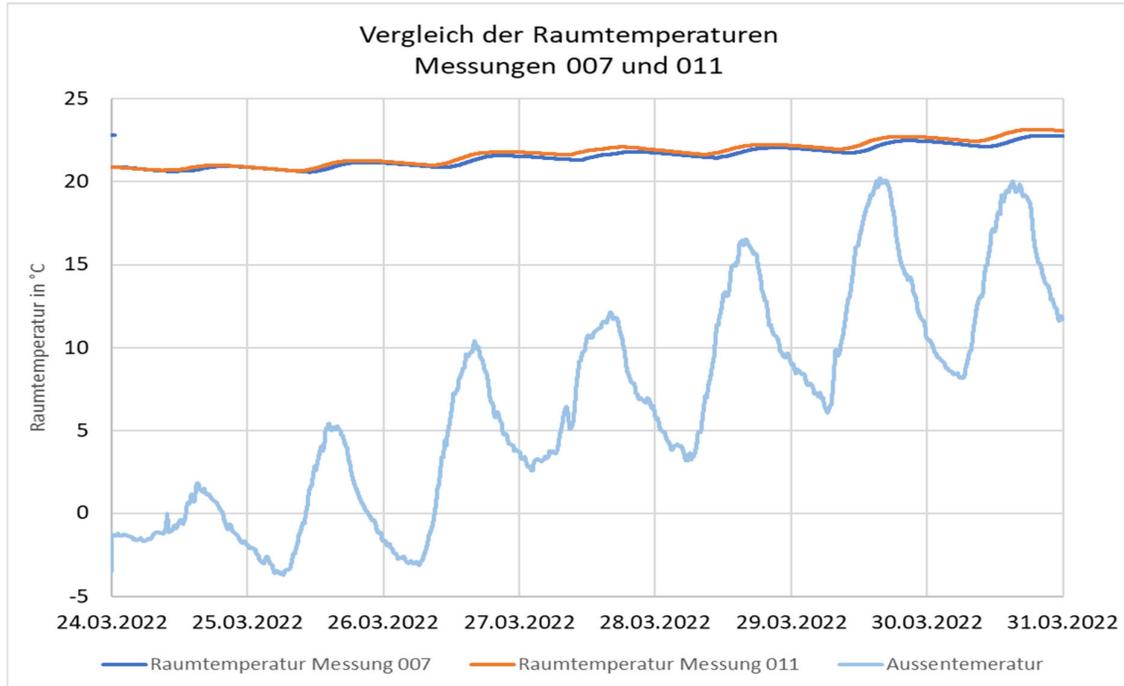


Abbildung 78: Vergleich der Raumtemperaturen Messung 007 und 011

Abbildung 78 zeigt den Vergleich der Raumtemperaturen bei den Messungen 007 und 011. Die Raumtemperatur bei Nutzung des Schwarmsignals mit der Parametrierung Messung 011 führt zu einer leichten Anhebung der Raumtemperatur im Verlauf der Messwoche (orange Kurve).

5.3 Zusammenfassung experimentelle Untersuchungen

Der Hauptvorteil von HIL-Messungen ist die Möglichkeit, Vergleichsmessungen bei Produkten mit wiederholbaren Randbedingungen durchführen zu können. Die Sollwerte für die Randbedingungen werden mit einer Simulation ermittelt. Sogenannte Emulatoren setzen die Rechenwerte für die reale Randbedingungen der Geräte um.

Die ausgesuchte Testwoche vom 24.-30.03. des SIA-Wetterdatensatzes hatte ausreichend PV-Ertrag, sodass mit dem gewählten Schwarmsignal-Konzept und der Parametrierung ein forcierter Betrieb vermehrt in Bereichen geringerer Effizienz der WP stattfand. Der Netzbezug wurde gesenkt, der Eigenverbrauch wie gewünscht erhöht. Bei einer Testwoche mit geringerem PV-Ertrag würden die Temperatur-Sollwerte herabgesetzt und damit der Elektrizitätsverbrauch gesenkt.

Bei den Jahressimulationen konnten die nötigen Feinheiten abgebildet werden, welche beim Echtgerät in der Messung sichtbar wurden. Die Validierung der Simulation konnte so sichergestellt werden.

Die Kommunikation mit dem WP-Regler und der Simulation konnte umgesetzt werden.



6 Einordnung der Simulationsresultate der bedarfsgeregelten Systeme

#1) In Kapitel 3.2 wurde ein Vergleich von zentraler und dezentraler Wärmeversorgung im MFH, basierend auf einer Mischung aus dynamischen Gebäudesimulationen und Tabellenkalkulation zur Berechnung der Heizsysteme, präsentiert.

#2) Im Kapitel 3.3 ist die Methode zur Simulation der dezentralen Heizsysteme im objektorientierten Ansatz mit Python beschrieben. Dasselbe Simulationsmodell wurde für die Untersuchung der Regelstrategie im Kapitel 4 verwendet, um Resultate mit verschiedenen Randbedingungen und Regelungsstrategien zu generieren.

#3) Im Kapitel 0 wurden schliesslich noch reale Messdaten eines einzelnen Heizsystems unter dynamischen Bedingungen gezeigt. Diese Messungen wurden durchgeführt indem für die Emulation von PV-Strom und Haushaltslast Wetterdaten vom 24. März bis 31. März des in Abschnitt 3.1 beschriebenen Wetterdatensatz hinterlegt wurden. Die Bestimmung der Last dieser Messung ist in Anhang G Abgleich der Laborsimulation beschrieben.

Allen Resultaten gemeinsam ist die Definition der Randbedingungen (Nutzerprofile, Gebäudekennwerte etc.). In Tabelle 28 sind ausgewählte Resultate und Kennzahlen der drei Varianten enthalten.

Die Verluste der TWW-Speicher wurden für Variante #1 nach den bekannten Materialwerten abgeschätzt, unter Annahme der resultierenden Speichertemperatur bei einer Solltemperatur von 50 °C/55 °C (Ein/Aus). Diese Werte stimmen sehr gut mit denjenigen aus der Messung überein.

Auch die TWW-Arbeitszahl aus der Messung und den Schwarmsimulationen mit identischem Zapfprofil stimmen gut überein. Davon abweichend wurde in den Tabellenkalkulationen zur Abschätzung des Potentials und zum Vergleich zwischen zentraler/dezentraler Wärmeversorgung eine höhere Arbeitszahl angenommen. Grund dafür ist die Annahme einer stufenweisen Beladung in der Tabellenkalkulation der Speicher, welche nicht der Realität bei Verwendung eines internen Wärmetauschers entspricht⁵.

Der Wärmebedarf der Raumheizung wurde in Variante #1 mittels detaillierter Gebäudesimulationen berechnet. Die Wärmeflüsse aus diesen Simulationen wurden in vereinfachter Form auf die objektorientierten Python-Simulationen übertragen. Der resultierende Wärmebedarf ist in dieser Variante ca. 8 % höher als in den TRNSYS-Simulationen. Die Charakteristik des Wärmebedarfes (Unterschiede der Wohnungen verschiedener Orientierung mit individuellen Nutzerprofilen) sowie das Verhältnis aus Wärmebedarf für Raumwärme und TWW bleibt weitestgehend erhalten. Auch für die Messungen im Labor wurden die Gebäudekennwerte übertragen. In diesem Fall auf ein Simulationsmodell in MatLab-Simulink. In der gemessenen Periode ist der Wärmebedarf des simulierten und emulierten Gebäudes wiederum um 12 % höher als in den Python-Simulationen – und damit eher in der Grössenordnung der detaillierten TRNSYS-Simulationen.

Die Raumheizungs-Arbeitszahl aus der Messung stimmt sehr gut mit derjenigen der Python-Simulationen überein, die Arbeitszahl aus dem Vergleich zentraler / dezentraler Heizsysteme fällt dagegen um 0.5 %-Punkte tiefer aus.

⁵ Die Resultate der Abschätzung sind dennoch gültig, da dieselben Annahmen auch für das zentrale Heizsystem getroffen wurden.



Tabelle 28: Resultate und Kennzahlen aus dem Vergleich zentrale/dezentrale Heizsysteme mit Gebäudesimulationen und Tabellenkalkulation, Schwarmsimulationen in objektorientierter Programmierung in Python und Messungen über eine Woche im Labor.

	2OG_West	2OG_Ost	1OG_West	1OG_Ost	EG_West	EG_Ost	Gesamt
TWW							
Verlust TWW-Speicher [kWh/Tag]							
Gebäudesim. + Tabellenkalkulation	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	8.1
Schwarmsimulation	1.1	1.4	1.1	1.2	1.2	1.1	7.1
Messung		1.4					
Arbeitszahl TWW [-]							
Gebäudesim. + Tabellenkalkulation	3.8	3.9	3.8	3.7	3.6	4.0	3.8
Schwarmsimulation	3.0	2.9	3.0	2.9	2.7	3.1	3.0
Messung		2.9					
Raumheizung							
Wärmebedarf [kWh]							
Gebäudesim. + Tabellenkalkulation	9079	8413	6084	7360	9717	8897	49551
Schwarmsimulation	9740	9163	5966	7360	10941	10401	53571
Schwarmsimulation		183 ⁽¹⁾					
Messung		160 ⁽¹⁾					
Arbeitszahl RH [-]							
Gebäudesim. + Tabellenkalkulation	5.3	5.4	5.3	5.3	5.3	5.4	5.3
Schwarmsimulation	6.0	5.9	5.9	6.0	6.2	6.1	6.1
Messung		5.9					

⁽¹⁾ Periode 24. bis 31. März des TMY Wetterdatensatzes (siehe Abschnitt 3.1.1).



7 Schlussfolgerungen

Marktanalyse

Die Marktanalyse hat gezeigt, dass im Gebäudebestand der Schweiz Potenzial für die Nutzung des HpCosy Systems vorhanden ist. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Dokuments waren rund 0.31 Mio. Gebäude mit 3-9 Wohnungen errichtet.

Für den Simulationsvergleich zwischen zentralen und dezentralen Heiz- und TWW-Bereitungssystem wurde ein MFH mit 3 Stockwerken, 6 Wohnungen und Wohnungsflächen im Bereich von 120 m² vorgeschlagen. In den Wohnungen sollen 2-4 Personen mit unterschiedlichen Nutzerverhalten leben.

Die Analyse des geographischen Potentials hat gezeigt, dass der Einsatz von EWS vielerorts in der Schweiz möglich ist. Beschränkungen entstehen hauptsächlich durch Wasserschutzzonen in Fluss- und Seenähe. Als Quellen kommen nebst EWS auch Grundwasser, Fliessgewässer, Anergienetze.

Es gibt einige Geräte am Markt, welche ausreichend grosse TWW-Speicher aufweisen, einen hinreichenden Leistungsbereich modulierbar abdecken, von aussen ansteuerbar sind, und sich für die Anwendung eignen.

Die Einbaumassnahmen bei Neubauten und Gebäudesanierungen/Umbauten sind bekannt. Im Falle der Sanierung/Umrüstung müssen die Leitungssysteme im Gebäude angepasst werden, und Platz für den TWW-Speicher, bzw. die Wärmepumpe geschaffen werden.

Bei der Nutzerakzeptanz spielen die Kostenfolgen der gewählten Lösung, der Platzbedarf, der Umbaufwand, die Schallemissionen und die Wartungssituation eine Rolle.

Die Wirtschaftlichkeit sollte mittels einer Vollkostenrechnung für eine angenommene Laufzeit von z.B. 20 Jahren abgeschätzt werden. Bei den Investitionskosten stehen im Bsp. des simulierten Gebäudes eine grössere WP sechs kleineren WP-Systemen gegenüber. Es ist anzunehmen, dass die sechs individuellen WP-Systeme teurer sind als eine zentrale Maschine. Der teureren Anschaffung stehen die betrieblichen Einsparungen gegenüber.

Vergleich zentraler und dezentraler Heizsysteme

Im Vergleichssystem benötigen die dezentralen Wärmepumpen für Heizung und Warmwasser um 30 % weniger elektrische Energie zum Decken des Wärmebedarfes als das zentrale Heizsystem. Dieser Effizienzgewinn hat drei Ursachen:

- Erstens benötigt die dezentrale Warmwassererzeugung mit Wärmepumpe keine Warmwasserzirkulation. Im Gegensatz zur zentralen Lösung sind die Leitungen kurz und das Warmwasser in der Dusche und bei den Waschtischen steht schnell zur Verfügung, die Leitungen müssen nicht erst durch eine Zirkulation von heissem Wasser warmgehalten werden. Dies spart viel Energie, welche zudem auf hohem Temperaturniveau bereit gestellt werden muss bei zentralen Systemen, und bringt zudem Vorteile in Bezug auf die Hygiene.
- Zweitens kann die Temperatur in den Warmwasserspeichern tiefer eingestellt werden als bei einem zentralen System, was zu weniger Wärmeverlusten und nochmals besseren Arbeitszahlen für die Wärmepumpe führt. Insbesondere deshalb, weil kein Heizstab notwendig ist.
- Zusätzlich kann die Raumwärmeverteilung, insbesondere die Vorlauftemperatur des zirkulierenden Wassers in der Fussbodenheizung, individuell auf die Wohnung und deren Bewohner:innen passend geregelt und eingestellt werden, was bei einem zentralen System nicht möglich ist. Dort muss die Wärme immer passend auf die Wohnung und die Bewohner:innen mit den höchsten Ansprüchen geliefert werden, was im Schnitt zu deutlich höheren Vorlauftemperaturen und damit niedrigerer Effizienz der Wärmepumpe führt.



Schwarmregelung

Der Vergleich von zentralen und dezentralen Systemen in einem MFH zeigte bereits einen deutlichen Vorteil der dezentralen Systeme mit einer bedarfsgerechten Regelstrategie. In einem nächsten Schritt wurde untersucht, welche Vorteile eine Aggregation der 6 WP-Systeme zu einem Schwarm in Bezug auf den Eigenverbrauch des lokal erzeugten PV-Stroms hat. Das einzelne WP-System hat eine eigene Steuerung, die auch auf ein Führungssignal, das so genannte "Schwarm-Signal" hört, um Strom zu verbrauchen oder nicht.

Eine Zentraleinheit erfasst den Sollwert, nämlich die Differenz zwischen der lokalen PV-Stromerzeugung und dem Verbrauch aller Teilnehmer für Haushaltsgeräte und den Betrieb der Wärmepumpen. Das Ziel der Schwarmsteuerung ist es, diese Differenz zu minimieren. Die Differenz S wird als unidirektionales Signal an die einzelnen HpCosy-Einheiten übertragen. Die Übertragung ist an die Produktion der lokalen PVA gekoppelt. Erst ab einem Schwellenwert von 200 W produziertem PV-Strom wird die Schwarm-Signalverarbeitung freigegeben. Ansonsten ist die HP-Steuerung rein bedarfsgesteuert.

Die Resultate zeigen, dass die Reduktion des Netzbezuges geringer als die Reduktion der Netzeinspeisung. Dies ist auf die Verringerung des Wirkungsgrads bei erzwungenem Betrieb bei höheren Vorlauftemperaturen (vor allem im TWW-Betrieb) zurückzuführen. Das Verhältnis von eingespartem Netzverbrauch zu verlorener Einspeisung liegt zwischen 2,2 (bei 60 m² PV-Fläche / 11,3 MWh PV-Ertrag) und 1,9 (bei 180 m² PV-Fläche / 23,8 MWh PV-Ertrag).

In einer weiteren Simulationsvariante wurde vorausgesetzt, dass der Ladezustand des Speichers bekannt ist. Ein Mindestladezustand von 30 % wurde definiert, um den Komfort jederzeit zu erfüllen. Diese Änderung führt dazu, dass die Nachladung des Speichers nicht mehr automatisch durch grössere TWW-Bezüge getriggert wird. So entsteht die Möglichkeit, bei einer positiven Energiebilanz (positives Schwarmsignal) die Beladung der Speicher vorzeitig auszulösen. Dadurch entstehen insgesamt tiefere Vorlauftemperaturen der WP, insbesondere durch den Verzicht auf ein Überladen der Speicher. Im Fall der 60 m² PV-Anlage wird ein Verhältnis von eingespartem Netzverbrauch zu verlorener Einspeisung von 0.8 erreicht. Der Netzbezug wird also stärker reduziert als die Einspeisung – eine Folge der verbesserten Arbeitszahl der WP. Im Fall der 180 m² PV-Anlage beträgt das Verhältnis noch immer 1.1. Der eingesparte Netzbezug liegt zwischen 1745 kWh und 2277 kWh, also zwischen 7 % und 11 % der rein bedarfsorientiert geregelten Systeme mit jeweils identischer PV-Anlage.

Experimentelle Untersuchungen

Mit der «Hardware-in-the-Loop» Technologie des WP-Systemprüfstands der FHNW konnte das Verhalten, die Leistungsfähigkeit, die Regelung und Ansteuerbarkeit des S/W-Wärmepumpen Systems «CTA OH I 4esr TWW» mit reproduzierbaren Randbedingungen untersucht werden.

Die mehrstufigen Untersuchungen ermöglichten auch die Schaffung fundierter Grundlagen für die Validierung der Jahressimulationen.

Die Nachmessung der stationären Heizleistungen zeigte vergleichbare Werte wie die EHPA-Prüfmessungen nach EN 14511. Das Lade- und Entladeverhalten inklusive der Verluste des TWW-Speichers konnten mittels realen WP-Ladungen und emulierten TWW-Zapfungen analog der EN 16147 gemessen werden.

Die Speicher-Schichtungseffizienz wurde mittels Temperaturmessungen, Energie- und Entropiebilanzen am Speicher bestimmt. Es hat sich gezeigt, dass die Werte im Bereich anderer vom SPF gemessenen TWW-Speicher der Grössenordnung und der Technologie liegen.

Die gewählte Testwoche vom 24.03.-30.3. des SIA-Wetterdatensatzes war charakteristisch für eine Übergangswche mit abnehmendem Heizbedarf und täglich ausreichender solarer Einstrahlung und damit PV-Ertrag.



Als Referenz diente der Betrieb des WP-Systems mit reiner Bedarfsregelung und standardmässigen Einstellungen für Sollwerte und Hysteresen des Reglers für Heizen und TWW-Bereitung. Die aufgezählten Leistungs-, Energie und Temperaturwerte dienten als Vergleichswerte für die nachfolgenden Messungen.

Die definierte und umgesetzte Schwarmsignal-Ansteuerung wurde mit Hilfe der Echtzeit-Simulation des Labors realisiert und seitens des WP-Reglers interpretiert. Bei einem positiven Schwarmsignal wurde eine Überhöhung der TWW-Speichertemperatur bzw. eine Erhöhung der Heizungsvorlauf-Temperatur verlangt. Bei einem schwächeren oder negativen Schwarmsignal wurden die Sollwerte zurückgenommen und so auf das Stromangebot reagiert.

Betriebskosten

Bei der Beurteilung der Betriebskosten muss zunächst der Vergleich der dezentralen Systeme mit einem zentralen Heizsystem berücksichtigt werden und im nächsten Schritt die Anpassung der Regelstrategie der dezentralen Systeme mit einem Schwarmsignal.

Die Berechnungen des Strombedarfs zur Deckung des Wärmebedarfes des ausgewählten Gebäudes mit sechs Wohneinheiten ergaben einen Verbrauch von total 19.1 MWh mit einem zentralen Heizsystem und 13.9 MWh mit dezentralen Heizsystemen. Entsprechend können die Betriebskosten im gesamten Gebäude pro Jahr um ca. 1000 CHF bzw. 28% gesenkt werden.

Durch die Schwarmregelung mit Berücksichtigung des energetischen Zustandes der einzelnen Speicher wurde eine Reduktion des Netzbezuges um weitere 2554 kWh (bei 180 m² PV-Fläche) gegenüber der rein bedarfsorientierten Regelung erreicht. Diese Vermeidung von Netzbezug wurde erkaufte über die Umwandlung von PV-Strom in Wärme und damit über entgangene Einspeisung. Die entgangene Einspeisung betrug 2277 kWh. Für die Betriebskosten bedeutet dies, dass die Differenz aus dem Bezugstarif und dem Einspeisetarif (im Normalfall liegt das Verhältnis etwa bei 2:1) eine weitere Reduktion der Betriebskosten von 210 CHF/a bewirkt.



8 Ausblick

8.1 Dezentrale Systeme im Schwarm

Aus Sicht des EWJR wird das im Projekt vorgestellte Konzept aktuell nicht in einem grösseren Rahmen geplant. In einem lokalen Rahmen (MFH mit ZEV oder Eigenverbrauchsgemeinschaft (EVG)) kann mit einem solchen Konzept der Eigenverbrauch der PVA-Erzeugung sicherlich gesteigert werden. Dies bewegt sich aber eher im «Smart-Home» Bereich und nicht bei einem Verteilnetzbetreiber (Smart-Grid). Wie im Bericht geschrieben, würde das Netz durch den höheren Eigenverbrauch auch entlastet werden.

Wird der Blick in die Zukunft gerichtet und einen grösseren Rahmen betrachtet, kann eine grosse Anzahl an WP einen Schwarm bilden, der auch netzdienlich eingesetzt werden könnte. Dies würde aber bedingen, dass alle WP-Hersteller eine einheitliche, normierte Schnittstelle hätten, die eine feinere Regulierung als 0/1 erlaubt und im Einklang mit den Bedürfnisanforderungen der Nutzer steht.

8.2 Sonstiges

Aus energetischer Sicht lohnt die Umstellung auf dezentrale Systeme im Vergleich zu einer zentralen WP-Einheit. Hauptursache dafür ist der Verzicht auf die WW-Zirkulation. Zusätzlich zu diesem Vorteil ergeben sich Möglichkeiten zur Steigerung der Flexibilität. Um diese mit den relativ kleinen Speichervolumina in den einzelnen Wohnungen ohne Effizienzeinbussen nutzen zu können, ist ein entsprechend gutes Speichermanagement essentiell. In den Simulationsvarianten des Schwarmes mit forciertem TWW-Betrieb durch Erhöhung des Sollwertes betrug das Verhältnis aus Eingespartem Netzbezug zu den Einbussen der Netzeinspeisung 1:1.9. In den Simulationsvarianten unter der Annahme, dass der Zustand des Speichers über eine zusätzliche Messstelle bekannt ist, konnte die TWW-Bereitung durch Eigenstrom nahezu ohne Effizienzeinbussen durchgeführt werden.

Dies zeigt, dass im Bereich Speichermanagement noch ein grosses Potential zur Verbesserung der heute üblichen Systeme liegt.



9 Bericht Aktivitäten IEA HPT Annexe

9.1 Mitwirkung bei der Formulierung des Annex 55

Am 17./18. Januar 2019 fand ein Task Definition Workshop zum IEA HPT/ECES Joint Annex / MI-IC7 "ComfortClimateBox" unter Mitwirkung von Ralf Dott und Robert Haberl statt. Vertreten am Treffen und konkretes Interesse an einer Teilnahme am IEA bekundet haben Personen aus den folgenden Ländern: NL (BDH, RVO), SE (RI.SE), AT (AIT), UK, DE (FhG-ISE), CA (NRCan), CH (IEBau-FHNW / SPF) Wobei die Situation weitgehend einheitlich so ist, dass Projektfinanzierungen vorgespurt, aber noch nirgends sichergestellt sind. Trotzdem bleibt, auch wegen MI-IC7, der Zeitplan mit Abschluss im Q3-2021.

Vor allem aus dem MI-IC7 (Mission Innovation – IC7) resultierte ein Zeitdruck, der zusammen mit der späten Bewilligung und Vertragserstellung für das Projekt HpCosy führte dazu, dass die Laufzeit des Projektes HpCosy und des Annex 55 nicht übereinstimmten, was eine aktive Teilnahme nicht mehr ermöglichte.

9.2 Weitere Annexe und Annex Proposals (Stand März 2023)

Website: www.heatpumpingtechnologies.org

9.2.1 Comfort and Climate Box solutions for warm and humid climates

Contact: Kashif Nawazk, nawazk@ornl.gov

Hier fanden zwei Workshops mit Teilnahme von Mitgliedern des HpCosy Teams statt. Ziel war die Definition des Annexes. Unser Beitrag war im Bereich der Kühlanwendung im städtischen Umfeld mit dem Hintergrund der Wärmeinseln. Ziel beim HpCosy wäre optimierte und netzdienliche PV Stromnutzung mit Regeneration der EWS und die massvolle Erhöhung des Komforts.

Dieses Proposal ist noch in Bearbeitung.

9.2.2 Annex 62: Heat pumps for multi-family residential buildings in cities

Contact: Marek Miara, marek.miara@ise.fraunhofer.de

Beschrieb:

"This Annex will focus on heat pump's solutions for multi-family houses in high-density cities. In respect to the demand of the participating countries new buildings and retrofit will be considered, as well as buildings with higher specific heating demand."⁶

Der Annex wurde im März 2023 gestartet.

⁶ <https://heatpumpingtechnologies.org/annex62/>



10 Publikationen

10.1 28. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte-technik», Burgdorf, 22.06.2022

Kurzbericht und Vortrag vom Projektstand Juni 2022, Christoph Messmer

Überblick, Stand, erste Ergebnisse und Ausblick

HpCosy - Heat Pump Comfort System (Messmer C. et al 2022)

10.2 Eurosun Kassel, 26.-29.09.2022

Journalbeitrag mit Vortrag, Robert Haberl

Thema: Simulationsvergleich zentrale und dezentrale WP-Lösungen für MFH

Comparison of a Centralized with Decentralized Heat Pump Systems in a Multi-Family Building (Haberl R. et al 2022)

10.3 Energie-Apéro Beider Basel, 17.11.2022

Vortrag zum Thema Grosswärmepumpen und Lösungen für Sanierungen, Christoph Messmer

Thema Forschung: HpCosy für MFH, Vorteile dezentraler WP-Etagenlösungen

(Messmer 2022)

10.4 14th IEA Heat Pump Conference, 15.-18. Mai 2023

Proceedings Beitrag mit Vortrag, Christoph Messmer

HpCosy - Heat Pump Comfort System (Messmer C. et al, HpCosy - Heat Pump Comfort System 2023)

10.5 29. Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kälte-technik», Burgdorf, 14.06.2023

Vorstellung abgeschlossenes Projekt, Christoph Messmer

Überblick, Methoden, Ergebnisse und Ausblick

HpCosy - Heat Pump Comfort System (Messmer C. et al, Heat Pump Comfort System 2023)



11 Verzeichnisse

11.1 Abbildungen

Abbildung 1 Fokusthemen Marktanalyse	19
Abbildung 2 Gebäude nach Anzahl Wohnungen im Gebäude (Bundesamt für Statistik BFS 2020)....	22
Abbildung 3: Anzahl MFH und Geschosse	22
Abbildung 4: Durchschnittliche Wohnfläche.....	23
Abbildung 5: Anzahl Wohnungen und Personen	23
Abbildung 6: Geothermische Nutzungsmöglichkeiten in der Schweiz (Link, Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz 2019, S. 11)	26
Abbildung 7: Wasserschutzgebiete Zürich (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021).....	28
Abbildung 8: Wärmenutzungsatlas Zürich (Bundesamt für Landestopographie swisstopo 2021)	29
Abbildung 9: GIS System ZH mit EWS und Wasserfassungen für Wärmenutzung	30
Abbildung 10: Gängige Wärmepumpensysteme in MFH.....	32
Abbildung 11: Produktvergleich Heizleistungsbereich der verschiedenen Wärmepumpen (Auswahl)	36
Abbildung 12: Speicher-Nettoinhalt und Mischwassermenge (Auswahl).....	36
Abbildung 13: Schalleistungspegel der Wärmepumpen (Auswahl)	37
Abbildung 14: Schalleistungspegel in Funktion der max. Heizleistungen (Auswahl).....	37
Abbildung 15: SCOP (35°C und mittleres Klima (Auswahl).....	38
Abbildung 16: SCOP 35°C mittleres Klima in Funktion der max. Heizleistung (Auswahl).....	38
Abbildung 17: COP für Warmwasserbereitung	39
Abbildung 18: Aussentemperatur im Jahresverlauf in Zürich.	44
Abbildung 19: Globalstrahlung in Zürich.	44
Abbildung 20: Simuliertes Mehrfamilienhaus "Sanierung MuKE" (Mojic, et al. 2019).	45
Abbildung 21: Wärmebedarf der Wohnungen für Raumheizung und Warmwasser, bei idealer Heizung und Raum-Solltemperatur von 21 °C.	48
Abbildung 22: Hydraulikschema des zentralen Wärmepumpensystems: Wärmeerzeugung.	50
Abbildung 23: Hydraulikschema des zentralen Wärmepumpensystems: Heizkreisverteilung.	50
Abbildung 24: COP der Sole-Wärmepumpe im zentralen Heizsystem in Abhängigkeit der Kondensatoraustrittstemperatur und der Verdichterdrehzahl.	52
Abbildung 25: Hydraulisches Schema des zentralen Heizsystems mit Aufteilung der Rohrleitungen in Gruppen und räumlicher Zuteilung zu Zonen im Gebäude.	53
Abbildung 26: Hydraulisches Schema einer dezentralen Wärmepumpeneinheiten.	54
Abbildung 27: COP der Sole-Wärmepumpen der dezentralen Heizsysteme in Abhängigkeit der Kondensatoraustrittstemperatur und der Verdichterdrehzahl.	55
Abbildung 28: Tagesmittelwerte der Vor- und Rücklauftemperaturen der Raumheizung während der Heizsaison.	56
Abbildung 29: Vorlauftemperatur, Leistung und Arbeitszahl der Raumwärmeversorgung im Tagesmittel.	58
Abbildung 30: Wärmebilanz des Gebäudes und des Warmwassersystems mit zentralem Heizsystem.	59
Abbildung 31: Jährlicher Strombedarf des zentralen Heizsystems.....	60
Abbildung 32: Jahresarbeitszahlen des zentralen Heizsystems inklusive Warmwassersystem.	60
Abbildung 33: Wärmebilanz des Gebäudes mit dezentralen Heizsystemen, inklusive Warmwasser. .	61
Abbildung 34: Jährlicher Strombedarf der dezentralen Heizsysteme für Raumheizung und Warmwasser.....	62
Abbildung 35: Jahresarbeitszahlen der dezentralen Heizsysteme.	62



Abbildung 36: Raumsolltemperaturen der sechs Wohneinheiten auf Grund der Monte-Carlo Simulationen und die Erreichten Einsparungen.	63
Abbildung 37: COP und Arbeitszahlen der WW-Ladung in Abhängigkeit der mittleren Vorlauftemperatur während der Beladung.	65
Abbildung 38: El. Energiebilanz PV und Haushaltsstrom mit verschiedenen grossen PV-Feldern, ohne Heizsystem.	68
Abbildung 39: Ausschnitt aus den Simulationen mit bedarfsorientierter Regelung. Gezeigt werden Kennwerte für die TWW-Speicher sowie die WPs für zwei Wohnungen. In rot und blau sind die Temperaturen der beiden Zonen im Speicher dargestellt (T_{oben} und T_{unten}). Die orange Linie zeigt den Anteil der gespeicherten Energie im oberen Teil des Speichers (fr_{oben}). Die graue und schwarze Linie zeigt die Kompressordrehzahl in den Zuständen TWW und Raumheizung (n_{TWW} und n_{RH}).	70
Abbildung 40: Jahreswerte des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpen der einzelnen Wohnungen bei bedarfsgeregelter Steuerung. $WelWP_{TWW}$ = Energiebedarf TWW; $WelWP_{RH}$ = Energiebedarf Raumheizung.	71
Abbildung 41: El. Energiebilanz des Gesamtsystems bei bedarfsorientierter Regelstrategie und verschieden grossen PV-Flächen.	72
Abbildung 42: Ausschnitt aus den Simulationen mit Schwarmregelung und entsprechender Schwarmregelung. Gezeigt werden Kennwerte für die TWW-Speicher sowie die WPs für zwei Wohnungen. In rot und blau sind die Temperaturen der beiden Zonen im Speicher dargestellt (T_{oben} und T_{unten}). Die orange Linie zeigt den Anteil der gespeicherten Energie im oberen Teil des Speichers (fr_{oben}). Die graue und schwarze Linie zeigt die Kompressordrehzahl in den Zuständen TWW und Raumheizung (n_{TWW} und n_{RH}).	75
Abbildung 43: Energiebilanz des Gesamtsystems mit Schwarmregelung und verschieden grossen PV-Flächen.	76
Abbildung 44: Netzbezug und -einspeisung bei bedarfsorientierter Regelung und Schwarmregelung im Vergleich.	77
Abbildung 45: Netzbezug und Einspeisung im Fall eines Gebäudes mit 180 m ² PV mit verschiedenen Regelstrategien.	78
Abbildung 46: Verhältnis aus Eingespartem Netzbezug und Einbussen bei der Netzeinspeisung.	78
Abbildung 47: Energiebilanz des Gesamtsystems mit Schwarmregelung mit angepasster TWW-Bewirtschaftung und verschieden grossen PV-Flächen.	80
Abbildung 48: Netzbezug und -einspeisung bei bedarfsorientierter Regelung und Schwarmregelung mit angepasster TWW-Bewirtschaftung im Vergleich.	81
Abbildung 49: Verschiebung der WP Betriebszeiten aufgrund der Schwarmregelung in der Übergangszeit.	82
Abbildung 50: Raumtemperatur der bedarfsgesteuerten Simulationsvariante (keine Anpassung der Raumsolltemperatur).	83
Abbildung 51: Raumtemperatur der Wohnungen im Erdgeschoss bei bedarfsgeregelter Wärmepumpe, sowie mit Schwarmregelung und verschiedenen PV-Feldern während der Monate mit Heizwärmebedarf.	84
Abbildung 52: Abweichung der durchschnittlichen Raumtemperaturen im Gebäude mit 120 m ² PV-Fläche und Schwarmregelung gegenüber demselben Gebäude mit bedarfsgesteuerter Regelung.	85
Abbildung 53: Energie-Temperatur Diagramm mit der durch die Wärmepumpen gelieferten Wärmemenge und der Kondensator-Eintrittstemperatur.	86
Abbildung 54: Ausschnitt aus dem Energie-Temperatur Diagrammes mit Kondensator-Eintrittstemperaturen > 50 °C für drei ausgewählte Wohnungen.	87
Abbildung 55: Zeit, in der die Einspeisung über bestimmten Schwellwerten liegt, für verschiedene PV-Anlagen.	89



Abbildung 56: Einspeisung im simulierten Gebäude mit verschiedenen PV-Flächen.	89
Abbildung 57: Skizze der Speichertemperaturen zum Zeitpunkt, an dem die Nachladung des Speichers bei verschiedenen Solltemperaturen oder Sensorpositionen startet.	91
Abbildung 58: Hydraulisches Prinzipschema des Messaufbaus.....	93
Abbildung 59: Gebäude-Heizungsabgabe-Emulator.....	94
Abbildung 60: Prinzipschema Simulations- und Emulationstechnik für die HIL-Messungen.....	95
Abbildung 61: Hausverteiler mit Energy-Metern, SPS-Steuerung, Messwandlern und Haushaltsstrom-Emulatoren	96
Abbildung 62: Darstellung des Messablaufes mit Vorsimulation und anschliessender HIL-Messung .	97
Abbildung 63: Labview-Visualisierung der Wärmepumpe am Leitstand.....	97
Abbildung 64: Wärmepumpe CTA OH I 4esr TWW mit Warmwasserspeicher	98
Abbildung 65: Leistungsdiagramm OH I 4esr TWW mit Optiplus Regler 3 nach EN 14511 B0/W35 (3K/5K)	99
Abbildung 66: Leistungsdiagramm OH I 4esr TWW mit Optiplus Regler 3 in Funktion der Quellentemperatur.....	99
Abbildung 67: Temperaturmessstellen auf vier verschiedenen Höhen im TWW-Speicher	100
Abbildung 68: TWW-Speichertemperaturen im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb (Messung 001)	102
Abbildung 69: Temperaturen WP Quelle und Senke im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb)	103
Abbildung 70: Speicherlade-, TWW-Zapf-Energien im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb.....	103
Abbildung 71: Temperaturen TWW-Speicher im 7-Tage-Test (4 Tage TWW Zapfen / 3 Tage Bereitschaftsbetrieb)	104
Abbildung 72: Tanktemperaturen, Lade- und TWW-Zapfvolumenströme während eines Tages.....	104
Abbildung 73: TWW Temperaturen und Zapfungen Messung 007 und 011	108
Abbildung 74: Temperaturen WP-Quelle und -Senke Messung 007 und 011.....	110
Abbildung 75: Speichertemperaturen in verschiedenen Höhen Messung 007 und 011.....	111
Abbildung 76: Heiz-, Speicherlade-, TWW-Zapf-Energien Verdichter-Leistung und -energie Messung 007 und 011.....	112
Abbildung 77: Vergleich der Raumtemperaturen Messung 007 und 011	114
Abbildung 77 Verteilung der Gebäude und deren Bewohner/innen nach Anzahl Wohnungen im Gebäude (Bundesamt für Statistik BFS 2020).....	132
Abbildung 78 Wohnungen nach Gebäudekategorie (Bundesamt für Statistik BFS 2020).....	132
Abbildung 79: Studien zum geothermischen Potenzial in der Schweiz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021).....	135
Abbildung 80: Gewässerschutzgebiete der Schweiz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021)	136
Abbildung 81: Bewilligung von Erdwärmesonden Bern 2019 (Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern 2019).....	138
Abbildung 82: Bewilligung von Erdwärmesonden Waadt (Office fédéral de topographie 2021)	139
Abbildung 83: Produktvergleich Heizleistungsbereich der verschiedenen Wärmepumpen.....	140
Abbildung 84: Speicher-Nettoinhalt und Mischwassermenge.....	140
Abbildung 85: Internen Lasten durch die Anwesenheit von Personen als Stundenwert im Verlauf des Jahres.....	141
Abbildung 86: Internen Lasten durch Licht und Geräte als Stundenwert im Verlauf des Jahres.	142
Abbildung 87: Wärmestromdichte einer Fussbodenheizung Typ A ohne Belag, mit Kunststoffrohr 14/18 mm, Rohrüberdeckung 45 mm, Unterlagsboden $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$, berechnet nach [EN ISO 11855] (Schmid, et al. 2020)	145



Abbildung 88: Korrekturfaktor für Bodenbelag und Unterlagsboden-Übermass, berechnet nach [EN ISO 11855] (Schmid, et al. 2020).....	145
Abbildung 90: Heizleistungen, elektrische Leistungsaufnahme und Verdichterdrehzahl gemäss EN 14511 (Messung 002)	146
Abbildung 90: Quellen- und Senkentemperaturen beim stationären Heizen gemäss EN 14511 (Messung 002).....	147
Abbildung 91: COP und Verdichterdrehzahl-Sollwert beim stationären Heizen gemäss EN 14511 (Messung 002).....	147
Abbildung 92: Auskühlkurven der Wohnung 2OG West in der TRNSYS- und Simulink/Carnot-Simulation.....	149

11.2 Tabellen

Tabelle 1. Allgemeine Übersicht «Gebäude» 2019 (Bundesamt für Statistik BFS 2020).....	21
Tabelle 2 Anzahl Gebäude gebaut vor 1990 nach Wohnungs- und Geschoszahl (Bundesamt für Statistik BFS 2020).....	24
Tabelle 3: Mehrfamilienhäuser und Wohngebäude mit Nebennutzung nach Energieträger von Heizung und Warmwasser Stand 2015.....	25
Tabelle 4 Vergleichsraster für Wärmepumpen.....	35
Tabelle 5: Allgemeine Merkmale des Gebäudes.	45
Tabelle 6: Beheizte Wohnfläche der einzelnen Wohnungen.	46
Tabelle 7: Beschreibung der Haushaltstypen.	46
Tabelle 8: Zuordnung der Haushaltstypen zu den einzelnen Wohnungen im Gebäude.	47
Tabelle 9: Jährliche interne Wärmegewinne aufgrund von Belegung, Geräten und Beleuchtung innerhalb der Wohnungen in kWh.	47
Tabelle 10: Bedarf an Brauchwarmwasser in den einzelnen Wohneinheiten, als "an den Zapfstellen bezogene" Nutzenergie.	48
Tabelle 11: Nominale Massenströme der Pumpen im System.	51
Tabelle 12: Parameter der Wärmepumpe OHI 17e der CTA AG.....	52
Tabelle 13: Parameter der Wärmepumpe Optiheat I 4esr TWW der CTA AG.	55
Tabelle 14: Temperaturen in den thermischen Zonen des Gebäudes.....	56
Tabelle 15: Parameter der thermischen Speicher.....	57
Tabelle 16: Randbedingungen zur Berechnung der Wärmepumpe.....	57
Tabelle 17: Berechnung der Arbeitszahl der Brauchwarmwasserbereitung bei einer Kompressordrehzahl von 50 rps.	59
Tabelle 18: Resultate der Monte-Carlo Simulationen.	64
Tabelle 19: Elektrische Energiebilanz auf Jahresbasis.....	69
Tabelle 20: Resultate der Jahressimulation mit dezentralen Heizsystemen im Schwarm.....	76
Tabelle 21: Resultate der Jahressimulation mit dezentralen Heizsystemen im Schwarm mit Anpassung der TWW-Strategie.....	79
Tabelle 22: Nenndaten der Wärmepumpe.....	98
Tabelle 23: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen.....	101
Tabelle 24: Entropiebilanz eines 24-h Zyklus aus der Messung mit Speicherladung und TWW-Zapfungen.	105
Tabelle 25: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen.....	106
Tabelle 26: CTA WP-Reglereinstellungen und Messhöhen der Speichertemperaturen.....	107
Tabelle 27: Auswertung WP Energien und Effizienzen Messung 011 im Vergleich zur Messung 007	113



Tabelle 28: Resultate und Kennzahlen aus dem Vergleich zentrale/dezentrale Heizsysteme mit Gebäudesimulationen und Tabellenkalkulation, Schwarmsimulationen in objektorientierter Programmierung in Python und Messungen über eine Woche im Labor.	116
Tabelle 29: Gebäude nach Gebäudekategorie nach Kanton 2019 (T09.02.01.01).....	131
Tabelle 30: Durchschnittliche Wohnfläche der bewohnten Wohnungen nach Anzahl der Haushaltsmitglieder 2019 BFS 2020.....	133
Tabelle 31: Bewohnte Wohnungen nach der Anzahl Bewohner und nach Kanton 2019 (Bundesamt für Statistik (BFS) 2020)	134
Tabelle 32: Leitungslängen, -durchmesser, - Isolationsstärken sowie die Zuordnung zu Zonen im Gebäude.....	143
Tabelle 33: Messgeräte Wärmepumpe und Heizungsabgabe-Emulator und Warmwasserzapfung.	150
Tabelle 34: Messgeräte Hausnetz.....	150

11.3 Literatur

- kein Datum. <https://www.dasgebaeudeprogramm.ch/de/> (Zugriff am 5. Oktober 2021).
- AGIS Service Center. *AGIS Viewer*. 1. Juli 2021.
<https://www.ag.ch/app/agisviewer4/v1/agisviewer.html> (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern. *Map.Apps*. 9. Juli 2019.
https://www.map.apps.be.ch/pub/synserver?project=a42pub_erdsond&userprofile=geo&client=core&language=de (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- Baselbieter Energiepaket. «Beitragssätze BL.» *Baselbieter Energiepaket*. Baselbieter Energiepaket. 2020. <https://www.energiepaket-bl.ch/foerdergeld/beitragssaetze> (Zugriff am 29. Oktober 2021).
- . *Fördermassnahmen: Sole/Wasser, Wasser/Wasser-Wärmepumpe (Ersatz einer Öl-, Gas- oder Elektroheizung)*. Baselbieter Energiepaket. 2020. <https://www.energiepaket-bl.ch/foerdermassnahmen/heizung-warmwasser/waermepumpe/sole-wasser-wasser-wasser-waermepumpe-ersatz-einer-oel-gas-oder-elektroheizung#sh-erdsonden> (Zugriff am 29. Oktober 2021).
- Bau- und Umweltschutzdirektion; Amt für Umweltschutz und Energie. *Erdwärmenutzungskonzept BL - Wegleitung zur Nutzung der Erdwärme im Kanton Basel-Landschaft*. Amt für Umweltschutz und Energie. Liestal, 28. August 2019.
- Brinkhoff, Thomas. *Schweiz: Aargau*. Citypopulation. 8. September 2021.
<https://www.citypopulation.de/de/switzerland/aargau/> (Zugriff am 21. Oktober 2021).
- Bundeamt für Umwelt BAFU. «Wärmenutzung aus Boden und Untergrund.» *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung*. Bern: BAFU, 2009. 51 S.
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo . *Geologieportal*. 2021.
https://map.geo.admin.ch/?topic=geol&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&layers=ch.swisstopo.geologie-geocover,ch.swisstopo.geologie-geothermische_potenzialstudien_regional,ch.swisstopo.geologie-geologischer_atlas,ch.swisstopo.geologie-generalkar (Zugriff am 3. September 2021).
- . *Geologieportal*. 2021. unter:
<https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-grau&layers=WMS%7C%7Cgewaesserschutzkarte%7C%7Chttps:%2F%2Fwfs.geodienste.ch>



- %2Fplanerischer_gewaesserschutz_v1_1_1%2Fdeu%3F%7C%7Cgewaesserschutzkarte%7C%7C1.3.0&E=2680611.0 (Zugriff am 3. Septmeber 2021).
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo. *GIS-ZH*. 2021.
<https://maps.zh.ch/?topic=AWELWWgwsZH&offlayers=bezirkslabels&scale=310000&x=692000&y=252000%20> (Zugriff am 24. Oktober 2021).
- Bundesamt für Landestopographie swisstopo. *GIS-ZH*. 2021.
<https://maps.zh.ch/?offlayers=bezirkslabels&scale=320000&srid=2056&topic=AweIGSWaermewwwZH&x=2692500&y=1252500> (Zugriff am 25. Oktober 2021).
- Bundesamt für Statistik BFS. «Bewohnte Wohnungen nach der Anzahl Bewohner und nach Kanton.» *Bundesamt für Statistik*. 10. Oktober 2020.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.14407313.html> (Zugriff am 3. September 2021).
- «Gebäude nach Anzahl Wohnungen im Gebäude.» *Bundesamt für Statistik*. 8. Oktober 2020.
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/tabellen.assetdetail.14407634.html> (Zugriff am 3. September 2021).
- «Gebäude nach Kanton, Gebäudekategorie, Anzahl Geschosse, Anzahl Wohnungen und Bauperiode.» *STAT-TAB – interaktive Tabellen*. 31. Dezember 2021.
https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0902010000_101/px-x-0902010000_101/px-x-0902010000_101.px (Zugriff am 29. September 2021).
- *Gebäude nach Kanton, Gebäudekategorie, Anzahl Geschosse, Anzahl Wohnungen und Bauperiode*. Sektion Bevölkerung. 31. Dezember 2020.
https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0902010000_101/-/px-x-0902010000_101.px/ (Zugriff am 19. Oktober 2021).
- «Gebäude nach Kanton, Gebäudekategorie, Anzahl Geschosse, Anzahl Wohnungen und Bauperiode.» *STAT-TAB – interaktive Tabellen*. BFS. 31. Dezember 2020.
https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0902010000_101/px-x-0902010000_101/px-x-0902010000_101.px (Zugriff am 9. Oktober 2021).
- *Gebäude nach Kanton, Gebäudekategorie, Heizungsart, Warmwasserversorgung, Energieträger und Bauperiode*. Sektion Bevölkerung. 31. Dezember 2015.
https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0902010000_102/-/px-x-0902010000_102.px/?rxid=68d3ed1a-dab1-446f-bc87-7853f2de116c (Zugriff am 19. Oktober 2021).
- «STAT-TAB – interaktive Tabellen.» *Gebäude nach Kanton, Gebäudekategorie, Heizungsart, Warmwasserversorgung, Energieträger und Bauperiode*. 31. Dezember 2021.
https://www.pxweb.bfs.admin.ch/pxweb/de/px-x-0902010000_102/-/px-x-0902010000_102.px/?rxid=68d3ed1a-dab1-446f-bc87-7853f2de116c (Zugriff am 3. September 2021).
- Bundesamt für Statistik BFS; Eidgenössisches Departement des Inneren EDI. «Bau- und Wohnbaustatistik 2018/2019. Gebäude- und Wohnungsstatistik 2019. Leerwohnungszählung vom 1. Juni 2020.» *Bau und Wohnungswesen 2019*. Nêuchatel: Bundesamt für Statistik (BFS), 30. April 2021.
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL. «Wegleitung Grundwasserschutz.» Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 2004. 141 S.
- Bundesrecht. «Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer.» *Gewässerschutzgesetz*. Nr. Kapitel 1, Abschnit 1. 24. Januar 1991.
- «Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer.» *Gewässerschutzgesetz*. Nr. Abschnitt 6, Kapitel 3. 24. Januar 1991.



- CEN, European Committee for Standardization. «EN 16147: 2017.» *Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Prüfungen, Leistungsbemessung und Anforderungen an die Kennzeichnung von Geräten zum Erwärmen von Brauchwarmwasser*. 2017.
- Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt. «Energierichtplan.» *Amt für Umwelt und Energie*. März 2020. <https://www.aue.bs.ch/energie/gebaeude-energie/energierichtplan.html> (Zugriff am 9. November 2021).
- Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt. «Kantonaler Richtplan Teilrichtplan Energie.» 2020.
- Dr. Wagner, Roland, und Thomas Weisskopf. *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich*. Projektbericht, Stadt Zürich Amt für Hochbauten, Mai 2014.
- EnergieSchweiz. *Photovoltaik Eigenverbrauch, Optimierung mit Wärmeerzeugung*. Merkblatt, Bern: Bundesamt für Energie BFE, 2022.
- GEOTES AG. *Neue SIA-Norm 384/6 Erdwärmesonden: Das müssen Bauherrschaften und Planer wissen*. Stämpfli AG. 03. Juni 2021. <https://www.geotest.ch/de/detail/neue-sia-norm-384-6-erdwaermesonden> (Zugriff am 24. Oktober 2021).
- GIS AG. *GEOPORTAL*. 12. Oktober 2021. <https://www.geoportal.ch/ktsg/map/29?y=2737409.70&x=1229248.76&scale=500000&rotation=0> (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- GIS-Fachstelle BL. *GeoView BL*. 2021. <https://geoview.bl.ch/> (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- . *GeoView BL*. 2021. <https://geoview.bl.ch/> (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- Haberl R. et al, Bohara K., Haller M., Zehnder M. «Comparison of a Centralized with Decentralized Heat Pump Systems in a Multi-Family Building.» Kassel: EuroSun ISES and IEA SHC Conference on Solar Energy for Buildings and Industry, 2022.
- Haberl R. et al., Türk O., Bohren A. und Haller M.Y. *DHWStrat – Methode zur Bestimmung der Schichtungseffizienz von Warmwasserspeichern, Schlussbericht*. Bern: Bundesamt für Energie BFE, 2021.
- Haller MY, Haberl R, Persson T, Bales C, Kovacs P, Chèze D, et al. «Dynamic whole system testing of combined renewable heating systems – The current state of the art.» *Energy and Buildings*, 2013: 66:667–77.
- Hoval AG. *Wie lange hält eine Heizung?* Hoval AG. kein Datum. https://www.hoval.ch/de_CH/Wie-lange-h%C3%A4lt-eine-Heizung%3F-/lebensdauer-heizung (Zugriff am 20. Oktober 2021).
- I., Mojic, M. Luzzatto, M. Haller, M. Lehmann, M. Benz, und S. van Velsen. *ImmoGap - Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern, Schlussbericht*. Bern: Bundesamt für Energie BFE, 2018.
- Link, Katharina. *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz*. Ausgabe. Bundesamt für Energie BFE. Bern, 30. Juli 2019.
- . «Statistik Schweiz.» *Geothermie-Schweiz.ch*. Geo-Future GmbH. 30. August 2021. <https://geothermie-schweiz.ch/geothermie/statistik/> (Zugriff am 19. Oktober 2021).
- Messmer C. et al, Haberl R., Bohara K., Zehnder M., Eismann R., Gerber V., Schindler M., Haller M. «Heat Pump Comfort System.» 28. *Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik»*. Burgdorf: Bundesamt für Energie BFE, 2022. 67-72.
- . «Heat Pump Comfort System.» 29. *Tagung des BFE-Forschungsprogramms «Wärmepumpen und Kältetechnik»*. Burgdorf: Bundesamt für Energie BFE, 2023.
- . «HpCosy - Heat Pump Comfort System.» *14th IEA Heat Pump Conference*. 2023.
- Messmer, C. «Übersicht über die Möglichkeiten von Grosswärmepumpen.» *Wärmepumpen XXL – Lösungen für grosse Sanierungsobjekte und Prozessenergie*. Muttenz: Energieapéro beider Basel, 2022.



- Mojic, Igor, Sascha Cramer, Marco Cafilisch, Dani Carbonell, und Michel Haller. *Reference Framework for Building and System Simulations: Multifamily Reference Building*. SPF Institut für Solartechnik, HSR Hochschule für Technik Rapperswil, 2019.
- Office fédéral de topographie. *Géodonnées Etat de Vaud*. 2021. <https://www.geo.vd.ch/> (Zugriff am 3. September 2021).
- Pflugradt, Noah. *Load Profile Generator*. 2018. <https://www.loadprofilegenerator.de/> (Zugriff am 12. 2 2018).
- Schmid, Christoph H., Thomas Baumgartner, Christof Bucher, Jürg Nipkow, und Jobst Willers Vogt. *Heizung / Lüftung / Elektrizität*. Zürich: vdf Hochschulverlag AG ETH Zürich, 2020.
- SIA. *SIA 380/1: Thermische Energie im Hochbau, Heizwärmebedarf*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2009.
- SIA. «SIA 385/1:2020. Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden - Grundlagen und Anforderungen.» 2020.
- SIA. *SIA Merkblatt 2028: Klimadaten für Bauphysik, Energie- und Gebäudetechnik*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2010.
- Statista. *Bevölkerung der Schweiz nach Kantonen*. Statista. 31. Dezember 2020. [https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75536/umfrage/schweiz-bevoelkerung-nach-kanton-zeitreihe/#professional%20\(letzter%20Zugriff:%202020.10.2021\)](https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75536/umfrage/schweiz-bevoelkerung-nach-kanton-zeitreihe/#professional%20(letzter%20Zugriff:%202020.10.2021)) (Zugriff am 4. Oktober 2021).
- Statista. *Durchschnittlicher Strompreis für Haushalte in der Schweiz bis 2023*. Hamburg, 12. 02 2023.
- . *Größte Städte in der Schweiz 2020*. Statista. 31. Dezember 2020. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/216783/umfrage/groesste-staedte-in-der-schweiz/> (Zugriff am 5. Oktober 2021).
- Steinke, Gregor, Andreas Genkinger, und Thomas Afjei. *Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext*. Stadt Basel und Hochbauamt Zürich, 2018.
- Steinweg, Jan, Francis Kliem, Nailya Maitanova, und Gunter Rockendorf. «Einrohrzirkulation in Speicheranschlussrohren - Einflussgrößen und Gegenmassnahmen.» 23. *Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein, Germany: OTTI Regensburg, 2013.
- suissetec, Schweizerisch-Liechtensteinischer Gebäudetechnikverband. *Suisstec Merkblatt 11 / 2021: «Kühlung mit der Fussbodenheizung.»*. 11 2021.
- Vetsch, Bernhard, Andreas Gschwend, und Andreas Bertsch. *Warmwasserbereitstellung mittels Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern*. 4. Januar 2012.



Anhang A Potenzialuntersuchung

Statistische Daten zum Gebäudebestand

Tabelle 29: Gebäude nach Gebäudekategorie nach Kanton 2019 (T09.02.01.01)

	Gebäude mit Wohnnutzung						Gebäude mit teilweiser Wohnnutzung
	Total	Wohngebäude				Wohngebäude mit Nebennutzung	
		Total	Reine Wohngebäude				
			Total	Einfamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser		
Schweiz	1 756 927	1 674 790	1 476 501	1 000 700	475 801	198 289	82 137
Zürich	226 377	216 673	190 261	118 474	71 787	26 412	9 704
Bern	236 543	222 091	185 054	113 528	71 526	37 037	14 452
Luzern	69 726	66 432	56 607	32 323	24 284	9 825	3 294
Uri	9 974	9 368	8 245	4 886	3 359	1 123	606
Schwyz	32 242	30 569	27 157	16 009	11 148	3 412	1 673
Obwalden	9 258	8 694	7 651	4 061	3 590	1 043	564
Nidwalden	7 850	7 407	6 402	2 719	3 683	1 005	443
Glarus	13 957	13 279	12 044	10 042	2 002	1 235	678
Zug	16 436	15 583	13 572	6 685	6 887	2 011	853
Freiburg	72 160	68 992	60 679	43 893	16 786	8 313	3 168
Solothurn	69 576	66 920	60 504	46 492	14 012	6 416	2 656
Basel-Stadt	23 615	22 806	17 599	9 266	8 333	5 207	809
Basel-Landschaft	66 776	65 287	60 077	46 365	13 712	5 210	1 489
Schaffhausen	19 123	18 232	15 963	11 726	4 237	2 269	891
Appenzell A.Rh.	16 231	15 200	12 315	9 236	3 079	2 885	1 031
Appenzell I.Rh.	5 246	5 098	3 902	2 887	1 015	1 196	148
St.Gallen	113 425	106 934	94 393	67 910	26 483	12 541	6 491
Graubünden	70 503	65 195	58 711	34 974	23 737	6 484	5 308
Aargau	152 412	147 047	133 201	101 565	31 636	13 846	5 365
Thurgau	65 601	62 270	53 646	40 559	13 087	8 624	3 331
Tessin	112 085	109 605	104 433	75 703	28 730	5 172	2 480
Waadt	135 375	128 931	111 435	75 082	36 353	17 496	6 444
Wallis	113 932	108 530	102 724	70 602	32 122	5 806	5 402
Neuenburg	31 047	29 120	24 423	14 506	9 917	4 697	1 927
Genf	44 516	42 915	36 538	25 849	10 689	6 377	1 601
Jura	22 941	21 612	18 965	15 358	3 607	2 647	1 329

Stand am 31. Dezember 2019

Quelle: BFS – GWS

© BFS 2020

Auskunft: Bundesamt für Statistik (BFS), Sektion POP, info.gws@bfs.admin.ch, Tel. 058 467 25 25

Die kantonale Verteilung der Gebäude nach Gebäudekategorien gemäss **Statistische Daten zum Gebäudebestand**

Tabelle 29 spielt bei der Beurteilung des HpCosy Systems eine untergeordnete Rolle. Es zeigt aber, wo wie viele Objekte zu finden sind. Zürich und Bern haben mit rund 0.97 Mio. bzw. 0.11 Mio. mit Abstand am meisten MFH und Wohngebäude mit Nebennutzung im Schweizer Vergleich.

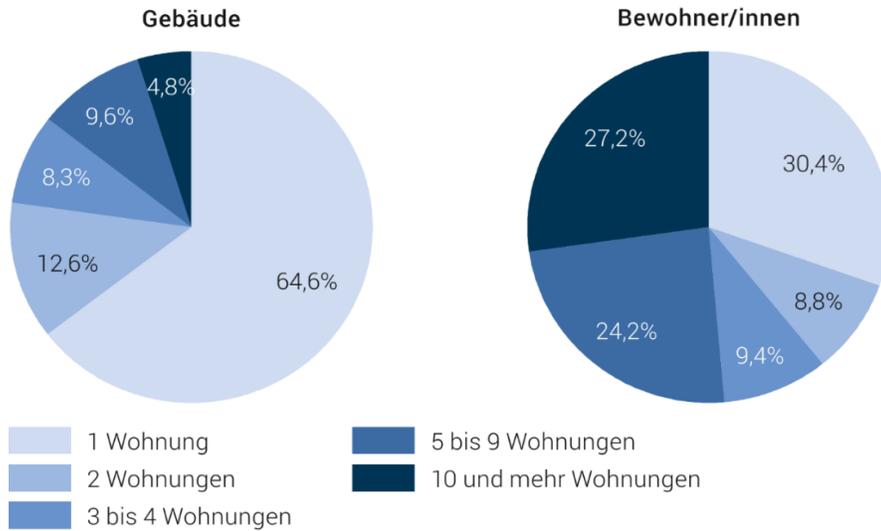


Abbildung 79 Verteilung der Gebäude und deren Bewohner/innen nach Anzahl Wohnungen im Gebäude (Bundesamt für Statistik BFS 2020)

Abbildung 79 zeigt links die prozentualen Verteilungen der Gebäude nach Anzahl Wohnungen. Rechts wird die prozentuale Verteilung der Anzahl Bewohner//innen in diesen Gebäudekategorien dargestellt.

In Abbildung 80 zeigt die prozentualen Anteile der Wohnungen nach Gebäudekategorien kantonal nach Wohnungen in EFH sortiert.

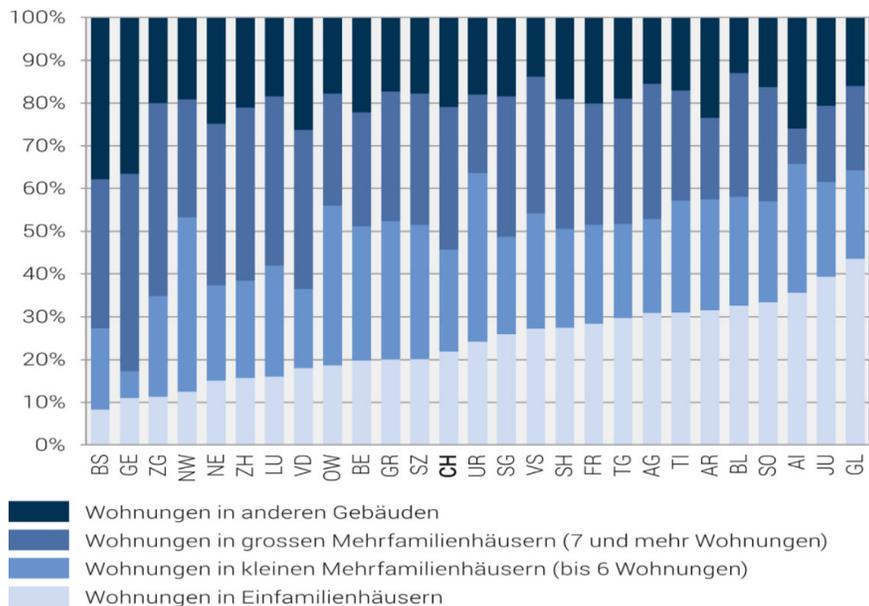


Abbildung 80 Wohnungen nach Gebäudekategorie (Bundesamt für Statistik BFS 2020)



Tabelle 30: Durchschnittliche Wohnfläche der bewohnten Wohnungen nach Anzahl der Haushaltsmitglieder 2019 BFS 2020

	Durchschnittliche Wohnfläche (in m ²)						Anteil Personen, die keiner Wohnung zugeordnet sind (in %)
	Total	Privathaushalte nach Nationalität				Ausländischer Haushalt	
		Schweizerischer Haushalt		Schweizerisch-ausländischer Haushalt	1 Person		
		1 Person	2 oder mehr	2 oder mehr	1 Person	2 oder mehr	
Schweiz	102.3	83.7	122.6	104.7	65.5	94.2	0.6
Zürich	98.3	80.0	119.3	101.1	63.4	91.7	0.6
Bern	99.1	80.9	115.8	99.4	63.3	88.4	0.6
Luzern	106.2	84.0	124.9	107.1	66.5	94.7	0.4
Uri	108.1	88.7	122.1	108.6	66.4	91.3	0.3
Schwyz	114.0	90.8	131.6	119.3	75.3	108.1	0.5
Obwalden	112.3	89.9	128.0	116.8	68.7	100.5	0.3
Nidwalden	111.6	88.6	126.6	116.2	74.3	105.3	0.1
Glarus	110.4	93.5	130.7	115.9	68.2	96.1	0.2
Zug	108.7	86.1	125.7	112.9	71.2	112.6	1.1
Freiburg	107.5	84.2	127.6	111.0	60.7	94.1	0.2
Solothurn	110.4	90.9	130.5	113.6	68.0	96.5	0.5
Basel-Stadt	81.0	69.9	101.7	87.5	58.8	83.6	1.9
Basel-Landschaft	106.4	88.6	123.0	108.5	69.6	98.6	0.4
Schaffhausen	110.0	91.2	131.8	115.7	73.3	101.5	0.7
Appenzell A.Rh.	116.0	94.1	134.9	118.7	72.8	101.7	0.2
Appenzell I.Rh.	121.7	93.9	140.9	124.9	64.0	94.9	0.2
St.Gallen	108.1	88.1	129.8	110.6	67.1	95.7	0.3
Graubünden	100.3	83.0	120.7	104.9	60.5	86.4	0.5
Aargau	114.2	93.6	134.5	117.1	71.9	101.3	0.4
Thurgau	117.6	95.5	139.7	122.4	74.8	105.3	0.3
Tessin	102.2	90.0	119.7	105.7	75.6	99.1	0.4
Vaud	96.1	77.2	119.5	103.5	59.4	92.8	0.3
Wallis	102.3	86.2	121.1	106.9	63.9	92.9	0.6
Neuenburg	96.1	80.3	115.9	101.8	66.3	88.8	0.2
Genève	87.0	73.0	104.4	92.4	63.6	87.0	2.8
Jura	106.7	87.8	123.2	108.3	69.7	94.4	0.3

Stand am 31. Dezember 2019

Tabelle 30 zeigt die durchschnittliche Wohnfläche der bewohnten Wohnungen nach Anzahl der Haushaltsmitglieder. Die grafische Repräsentation ist in der Abbildung 4 zu sehen.



Tabelle 31: Bewohnte Wohnungen nach der Anzahl Bewohner und nach Kanton 2019 (Bundesamt für Statistik (BFS) 2020)

	Bewohnte Wohnungen							Anteil Personen, die keiner Wohnung zugeordnet sind (in %)
	Total	mit in der Wohnung						
		1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen	5 Personen	6+ Personen	
Schweiz	3 833 594	1 365 104	1 261 808	505 815	480 648	159 092	61 127	0.6
Zürich	694 379	250 158	229 954	91 491	86 242	26 412	10 122	0.6
Bern	478 605	175 087	168 017	56 411	53 966	18 183	6 941	0.6
Luzern	179 583	60 105	61 488	22 611	23 705	8 549	3 125	0.4
Uri	15 561	4 886	5 557	1 898	2 109	828	283	0.3
Schwyz	69 005	22 205	24 293	9 083	9 070	3 198	1 156	0.5
Obwalden	16 062	5 083	5 603	2 003	2 284	785	304	0.3
Nidwalden	19 007	6 126	7 078	2 379	2 416	770	238	0.1
Glarus	18 214	6 505	6 121	2 271	2 304	755	258	0.2
Zug	54 998	17 600	18 775	7 617	7 814	2 473	719	1.1
Freiburg	134 472	41 993	42 777	20 033	20 294	6 899	2 476	0.2
Solothurn	123 423	42 520	43 737	15 550	14 767	4 958	1 891	0.5
Basel-Stadt	98 980	46 274	28 793	11 270	8 800	2 779	1 064	1.9
Basel-Landschaft	128 895	42 703	46 423	16 851	16 461	4 882	1 575	0.4
Schaffhausen	37 839	14 170	12 891	4 514	4 294	1 425	545	0.7
Appenzell A.Rh.	24 126	8 234	8 265	2 928	2 961	1 213	525	0.2
Appenzell I.Rh.	6 535	2 016	2 168	800	862	511	178	0.2
St.Gallen	224 400	78 056	74 879	27 905	28 322	10 855	4 383	0.3
Graubünden	94 958	36 626	31 495	11 497	10 859	3 442	1 039	0.5
Aargau	297 883	95 519	105 233	39 331	39 806	12 997	4 997	0.4
Thurgau	122 048	40 133	42 709	15 609	15 937	5 436	2 224	0.3
Tessin	165 593	65 797	49 793	23 863	19 233	5 397	1 510	0.4
Waadt	359 665	131 235	108 189	52 447	47 585	14 904	5 305	0.3
Wallis	155 976	56 577	49 596	21 162	19 759	6 570	2 312	0.6
Neuenburg	82 448	32 860	24 889	10 858	9 945	2 952	944	0.2
Genf	198 444	70 927	52 739	31 231	26 706	10 331	6 510	2.8
Jura	32 495	11 709	10 346	4 202	4 147	1 588	503	0.3

Stand am 31. Dezember 2019

¹⁾ Bewohnte Wohnungen: Wohnungen, denen eindeutig mindestens eine Person zugeordnet werden konnten.

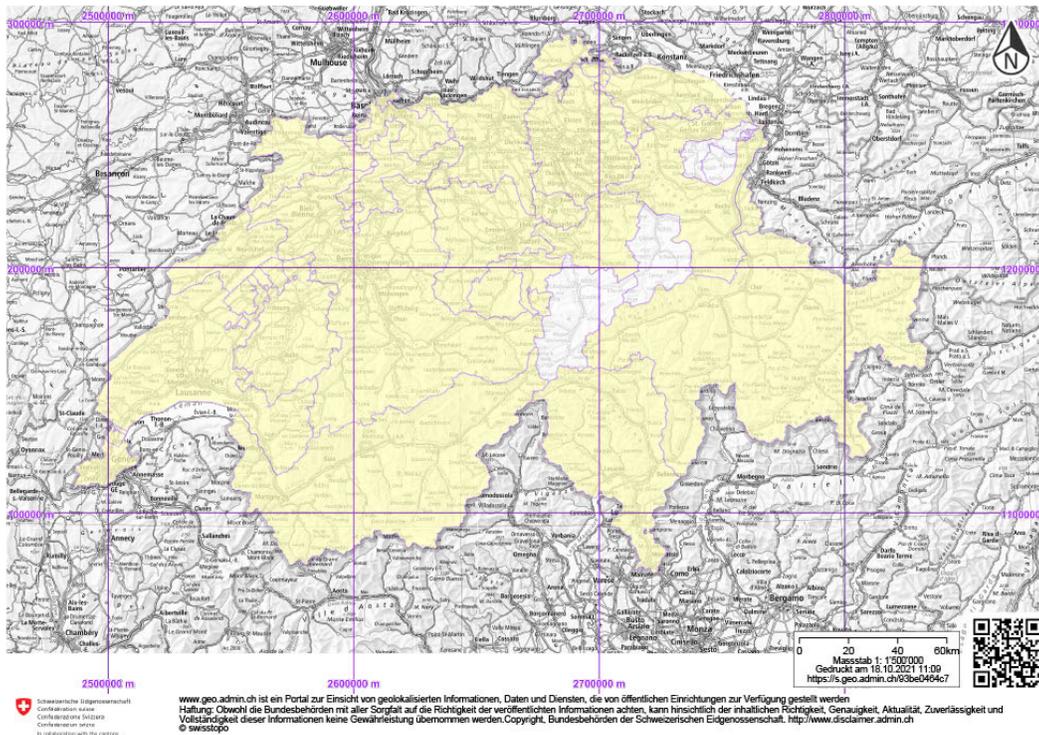
Es werden sämtliche Personen in Privathaushalten berücksichtigt, die in einer Gemeinde gemeldet sind, unabhängig vom Meldeverhältnis.

Tabelle 31 zeigt die durchschnittliche Wohnfläche der bewohnten Wohnungen nach Anzahl der Haushaltsmitglieder. Die grafische Repräsentation ist in der Abbildung 5 zu sehen.



Karten zum EWS Potenzial

Abbildung 81 zeigt das Vorhandensein von Potenzialstudien im Kantonsgebiet für Geothermie in der Schweiz. Die gelbmarkierten Flächen zeigen die Gebiete, in denen Studien verfügbar sind. Bei den weiss markierten Flächen sind keine kantonalen Studien verfügbar.



Legende: Gelb: Studien im Kantonsgebiet verfügbar, weiss: keine Studien im Kantonsgebiet verfügbar

Abbildung 81: Studien zum geothermischen Potenzial in der Schweiz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021)

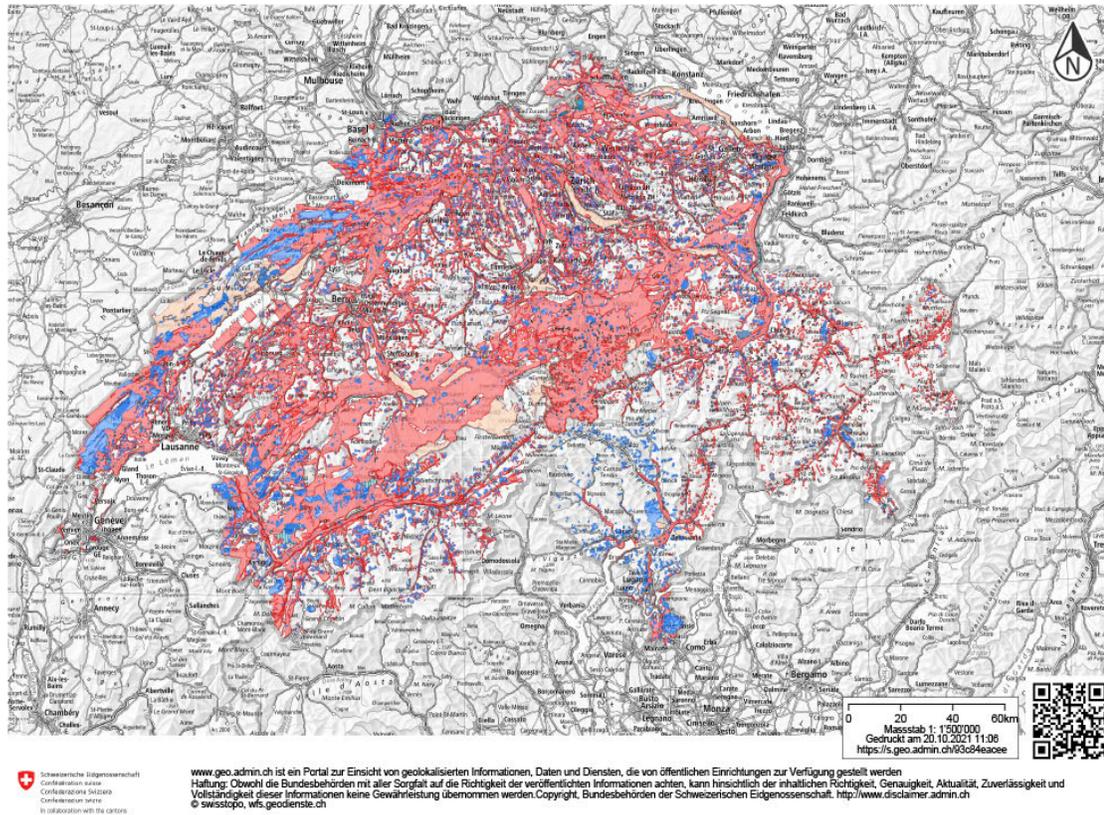


Abbildung 82: Gewässerschutzgebiete der Schweiz (Bundesamt für Landestopografie swisstopo 2021)

Abbildung 82 im Anhang zeigt die Gewässerschutzzonen der Schweiz. Die farblichen Markierungen zeigen die bestehenden und künftigen Schutzzonen S1-S3 in Türkisfarben, die Grundwasserschutzzonen, Zuströmbereiche in Blautönen, die Gewässerschutz-bereiche in rötlichen Tönen.

Einer der grössten Anteile ist farblich nicht markiert. Diese Gebiete entsprechen der Klassifizierung üB (übriges Gebiet) und werden innerhalb dieser Analyse als Gebiete mit Potenzial betrachtet. Es gilt zu beachten, dass einige Teile unbewohnbares Terrain einschliessen. Ein weiterer grosser Teil der Schweiz ist als Schutzzone Au markiert. Die Gebiete in diesem Bereich werden – im Rahmen dieser Analyse – ebenfalls als Gebiete mit Potenzial betrachtet. Die Bereiche gekennzeichnet mit A₀ betreffen Gebiete mit Oberflächenwasser, welches geschützt werden soll (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL 2004, S. 33)

In Kapitel 3.2.1f des Papiers der BAFU wird beschrieben, unter welchen Begebenheiten der Einsatz von Erdwärmesonden erlaubt ist (2009, S. 13f). Die Unzulässigkeit von Erdwärmesonden ist in Kapitel 3.2.3 und die Standardauflagen für Erdwärmesonden in Kapitel 3.3 geregelt (BAFU 2009, S. 14f). Diese Angaben sind relevant für die lokale Nutzung von Erdwärmesonden. In den folgenden Abschnitten werden einige der einwohnerstärksten Kantone der Schweiz, in Bezug auf die Zulässigkeit von Erdwärmesonden, analysiert. Zudem werden Kantone berücksichtigt, welche in den Abschnitten 0 bis 2.1.3 als attraktiv bewertet wurden, und diejenigen mit den einwohnerstärksten Städten der Schweiz.

In der Referenztabelle ist abzulesen, dass Erdwärmesonden im Gebiet klassifiziert als üB (übriges Gebiet) ohne Bewilligung nach Art. 32 der Gewässerschutzverordnung (GSchV) (ebd.), unter Einhaltung sämtlicher weiterer Vorschriften, uneingeschränkt eingesetzt werden dürfen.



Im Gebiet klassifiziert als A_U kann der Einsatz der Erdwärmesonde fallweise durch eine zuständige Behörde zugelassen oder verboten werden (ebd.). Ausserdem ist in diesem Gebiet eine Bewilligung nach Art. 32 GSchV notwendig (ebd.).

Im Schutzwassergebiet Z_U (Zuströmbereich) greifen die für dieses Gebiet kantonal verfügbaren Schutzmassnahmen.

- Erdwärmesonden
- Erdregister und Wärmekörbe *)
- Energiepfähle und ähnliche thermoaktive Elemente *)
- Entnahmebrunnen und Versickerungsbauwerke für die Nutzung von Grundwasser zu Heiz- und Kühlzwecken
- Koaxialbrunnen

In den Schutzzonen S3, S2, S1 sind die Nutzungsarten nicht erlaubt, mit Ausnahmen im S3.

*) In Gewässerschutzzonen S3 mit Ausnahmegewilligungen möglich

EWS Nutzung im Kanton Bern

Der Kanton Bern ist mit rund einer Million Einwohner*innen der zweitgrösste Kanton nach Bevölkerungszahl der Schweiz, und beherbergt damit etwa 12% der in der Schweiz lebenden Menschen (Statista 2021).

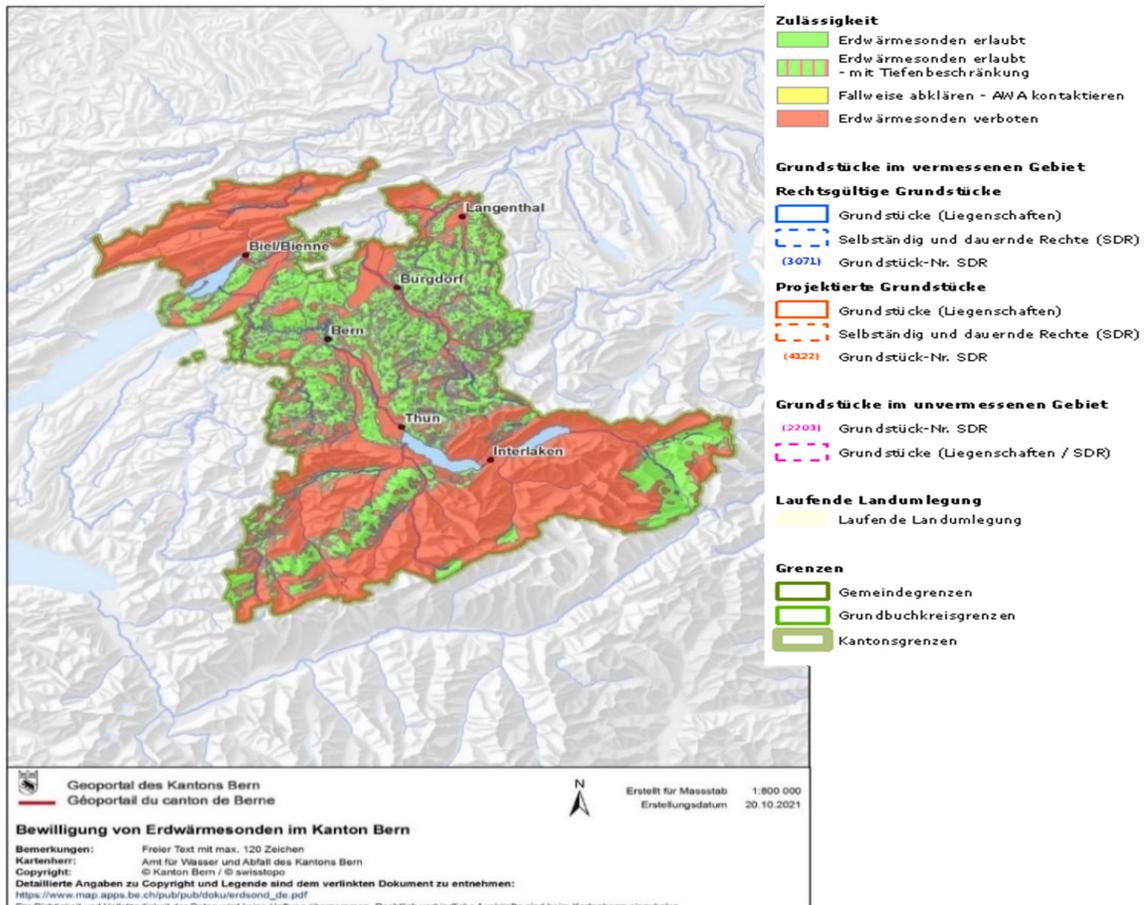


Abbildung 83: Bewilligung von Erdwärmesonden Bern 2019 (Amt für Wasser und Abfall des Kantons Bern 2019)

Abbildung 83 zeigt die Möglichkeit zur Nutzung von EWS innerhalb des Kanton Berns. Es ist zu erkennen, dass in vielen Teilen des Kantons Bern – insbesondere südöstlich von Interlaken und nordwestlich von Biel – der Einsatz von EWS verboten ist. Dabei gilt allerdings zu beachten, dass es sich bei der Mehrzahl der als verboten markierten Gebiete bei Biel um Weinberge und Gebirge (wie dem Mont Chasseral) handelt. Dort sind keine Siedlungen mit Potenzial-Gebäuden verortet. In dem Gebiet rund um Interlaken befindet sich ebenfalls hauptsächlich Gebirge, Wälder und Seen. Die Stadt Bern zählt rund 135'000 Einwohner und ist somit die fünft grösste Stadt in der Schweiz (Statista 2020). In dem Gebiet der Stadt Bern und Umgebung ist der Einsatz von EWS mehrheitlich erlaubt.



EWS- und Seewasser-Nutzung im Kanton Waadt (Vaud)

Der Kanton Waadt ist der drittgrösste Kanton in der Schweiz mit rund 815'000 Einwohner*innen (Statista 2020). Darin befindet sich die Stadt Lausanne, welche mit rund 140'000 Einwohner*innen die viertgrösste Stadt der Schweiz (ebd.).

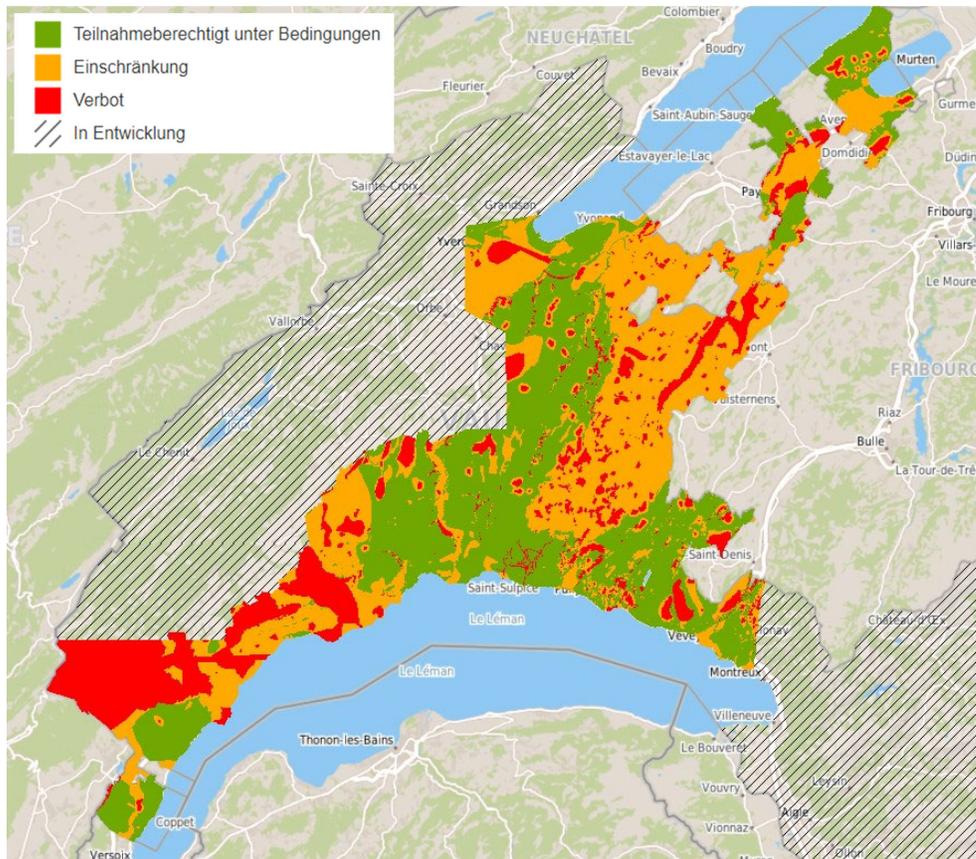


Abbildung 84: Bewilligung von Erdwärmesonden Waadt (Office fédéral de topographie 2021)

Abbildung 84 macht deutlich, dass im Kanton Waadt in vielen Gebieten die Nutzung von EWS eingeschränkt ist. Die Stadt Lausanne jedoch ist zu grossen Teilen in einem Gebiet, in welchem die Nutzung von EWS berechtigt wird. Obwohl einige Gebiete des Kantons keine Nutzung von EWS zulassen, so ist die Nutzung in den dichter besiedelten Stadt- und Agglomerationsregionen zugelassen. Die Einschränkungen betreffen verschiedene Bohrtiefen, abgestuft in 50, 100 und 200 Meter.

Wie auch in anderen Kantonen wird ebenfalls Seewasser als Quelle für grössere Wärmepumpenanlagen genutzt. Beispiel EPFL Campus in Ecublens.



Anhang B Am Markt erhältliche Geräte

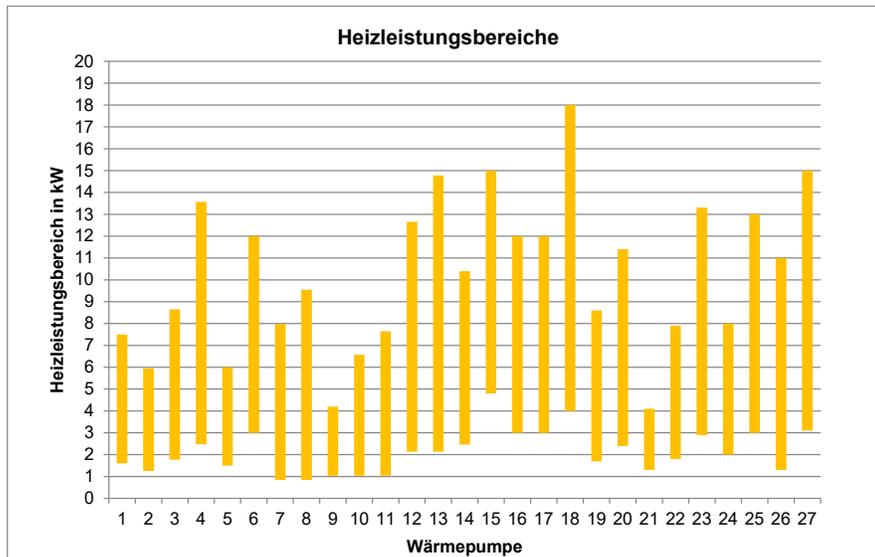


Abbildung 85: Produktvergleich Heizleistungsbereich der verschiedenen Wärmepumpen

In Abbildung 85 sind die Heizleistungsbereiche der untersuchten Wärmepumpen dargestellt. Es lässt sich gut erkennen, dass die Wärmepumpen z.T. tiefe Teillastbereiche wegen den drehzahlgeregelten Verdichtern anfahren können, was vor allem dann wichtig ist, wenn ohne Heizungspuffer gefahren werden soll.

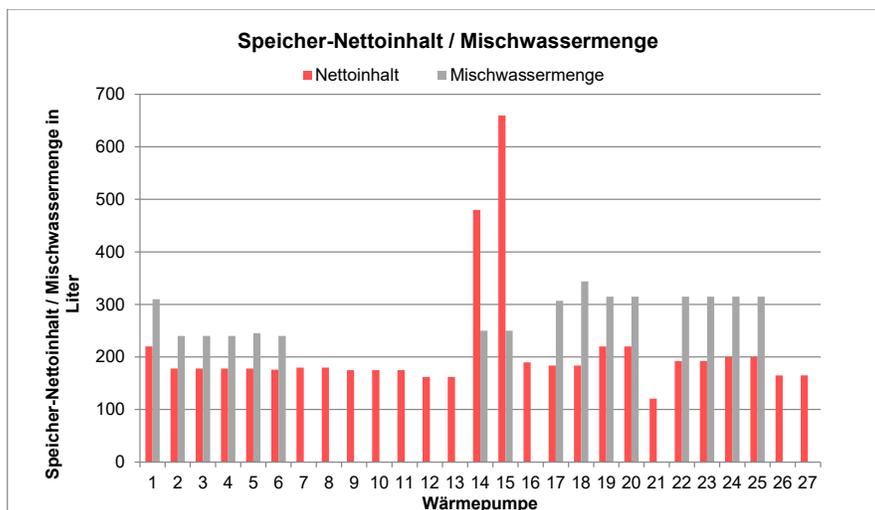


Abbildung 86: Speicher-Nettoinhalt und Mischwassermenge

Abbildung 86 zeigt die Speicher-Nettoinhalte und die Mischwassermengen, welche den Speichern entzogen werden können. Die meisten Geräte haben Speichervolumen im Bereich von 160 bis 210 Liter und Mischwassermengen von 230 bis 320 Liter. Die beiden Geräte mit 480 bzw. 660 Litern Inhalt haben einen Heizungspuffer integriert.



Anhang C Randbedingungen Gebäudesimulation

Interne Lasten durch Personen

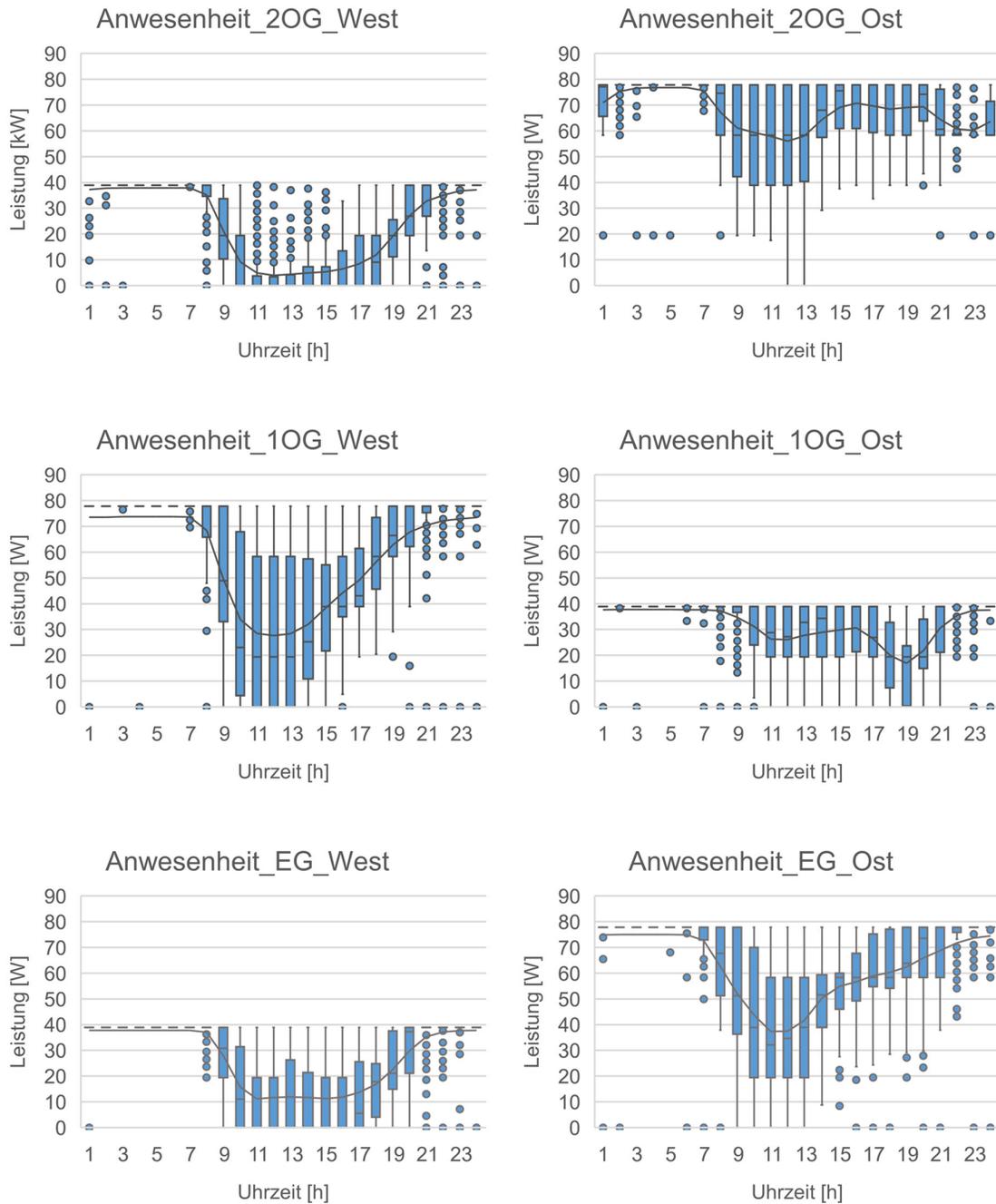


Abbildung 87: Internen Lasten durch die Anwesenheit von Personen als Stundenwert im Verlauf des Jahres.



Interne Lasten durch Beleuchtung und Geräte

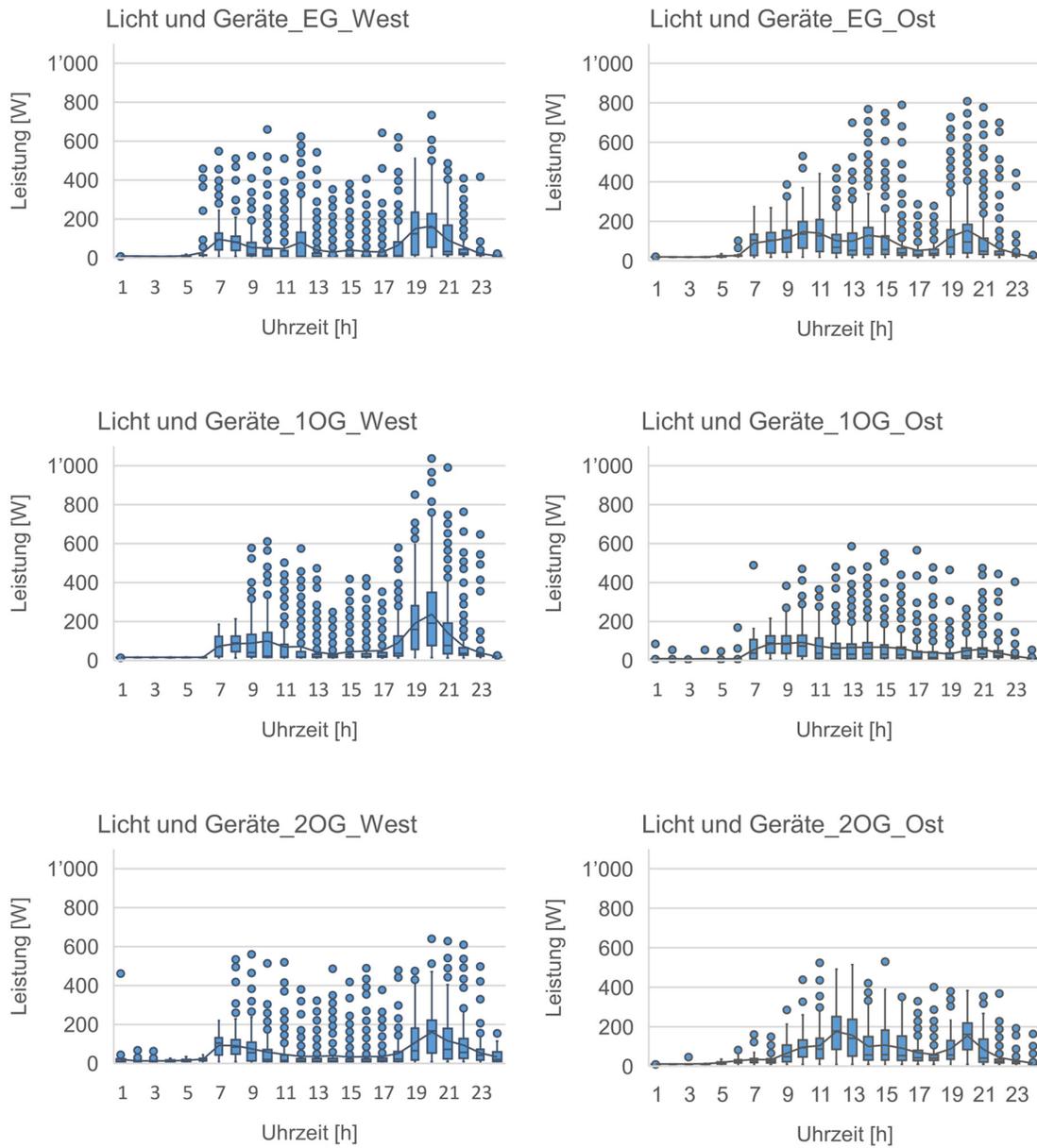


Abbildung 88: Internen Lasten durch Licht und Geräte als Stundenwert im Verlauf des Jahres.



Anhang D Leitungslängen im zentralen Heizsystem

Tabelle 32: Leitungslängen, -durchmesser, - Isolationsstärken sowie die Zuordnung zu Zonen im Gebäude.

Kreis (Vor- und Rücklauf)	Leitungslänge	Leitungsdurchmesser ^(a)	Isolationsstärke	Zuordnung
	[m]	[m]	[m]	[-]
WP Kondensator	1.42	0.05	0.85	UG
Umschaltventil externer HX	8	0.044	0.077	UG
Externer HX zu BWW	2	0.044	0.077	UG
TWW1 Zirkulation (nur Vorlauf)	32	0.044	0.077	Staircase
TWW1 Zirkulation Vorlauf zur Pumpe und Rücklauf zum Speicher	32	0.011	0.058	Staircase
TWW1 Verteilung	1	0.044	0.077	Staircase
TWW1 Verbindung zu TWW2	2.5	0.044	0.077	UG
Umschaltventil zum Pufferspeicher	8	0.055	0.085	UG
Anschluss Raumheizungs-Verteilbalken	3	0.055	0.085	UG
RH Strang bis EG_Ost	12	0.055	0.085	Staircase
RH Strang bis EG_West	12	0.055	0.085	Staircase
RH Strang bis 1OG_Ost	18	0.055	0.085	Staircase
RH Strang bis 1OG_West	18	0.055	0.085	Staircase
RH Strang bis 2OG_Ost	24	0.055	0.085	Staircase
RH Strang bis 2OG_West	24	0.055	0.085	Staircase

^(a) Leitungsdurchmesser ohne Isolation



Anhang E Berechnungen des Wärmeabgabesystems

Berechnung der Wärmeabgabe eines Rohres:

$$Q = \frac{2\pi L(t_i - t_o)}{\left[\frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k} + \frac{\ln\left(\frac{r_s}{r_o}\right)}{k_s} \right]}$$

Formel 4

Mit

Q = Wärmeabgabe des Rohres [W]

k = Wärmeleitfähigkeit des Rohrleitungsmaterials [W/(mK)]

k_s = Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffes [W/(mK)]

L = Länge des Zylinders oder Rohres [m]

r_o = Aussenradius des Rohres [m]

r_i = Innenradius des Rohres [m]

r_s = Aussenradius der Dämmung [m]

t_o = Temperatur ausserhalb des Rohres [K]

t_i = Temperatur innerhalb des Rohres [K]

Berechnung der Vor- und Rücklauftemperatur der Fussbodenheizung in Abhängigkeit der Aussentemperatur:

$$t_V = t_i + \frac{t_{V_N} - t_{R_N}}{2} * \frac{t_i - t_a}{t_i - t_{a_N}} + \left(\frac{t_{V_N} + t_{R_N}}{2} - t_i \right) * \left(\frac{t_i - t_a}{t_i - t_{a_N}} \right)^{1/m}$$

Formel 5

$$t_R = t_i - \frac{t_{V_N} - t_{R_N}}{2} * \frac{t_i - t_a}{t_i - t_{a_N}} + \left(\frac{t_{V_N} + t_{R_N}}{2} - t_i \right) * \left(\frac{t_i - t_a}{t_i - t_{a_N}} \right)^{1/m}$$

Formel 6

Mit

t_V = Vorlauftemperatur [°C]

t_R = Rücklauftemperatur [°C]

t_i = Solltemperatur [°C]

t_{V_N} = Vorlauftemperatur bei Normaussentemperatur [°C]

t_{R_N} = Rücklauftemperatur bei Normaussentemperatur [°C]

t_a = Aussentemperatur [°C]

t_{a_N} = Normaussentemperatur [°C]



Berechnung der Wärmeabgabe der Fussbodenheizung unter Berücksichtigung des Bodenaufbaus:

Die benötigte Wärmestromdichte der Fussbodenheizung zur Deckung des Wärmebedarfs beträgt 28 W/m^2 . Als Verlegeabstand der Leitungen werden 15 cm angenommen. Mit diesen Angaben kann die mittlere Temperaturdifferenz Heizwasser-Luft für den belagfreien Fall aus Abbildung 89 gelesen werden. Mit Hilfe des Temperaturkorrekturfaktors f_B (Abbildung 90) kann dann die mittlere Heizwasserüber-temperatur mit Bodenbelag bestimmt werden.

$$\Delta T_{m,mit} = f_B \cdot \Delta T_{m,ohne} \quad \text{Formel 7}$$

$$T_{VL} = T_{Raum} + T_{m,mit \text{ Bodenbelag}} \quad \text{Formel 8}$$

Mit

$\Delta T_{m,mit}$ = mittlere Heizwasserüber-temperatur mit Bodenbelag [K]

$\Delta T_{m,ohne}$ = mittlere Heizwasserüber-temperatur ohne Bodenbelag [K]

f_B = Temperaturkorrekturfaktor [-] = 1.4

T_{VL} = Sollwert der Vorlauf-temperatur bei Referenzbedingungen [°C]

T_{Raum} = Raumsoll-temperatur [°C]

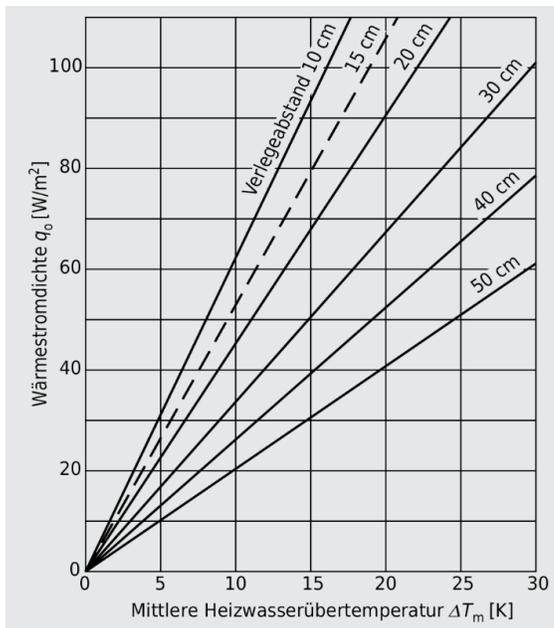


Abbildung 89: Wärmestromdichte einer Fussbodenheizung Typ A ohne Belag, mit Kunststoffrohr $14/18 \text{ mm}$, Rohrüber-deckung 45 mm , Unterlagsboden $\lambda = 1,2 \text{ W/mK}$, berechnet nach [EN ISO 11855] (Schmid, et al. 2020)

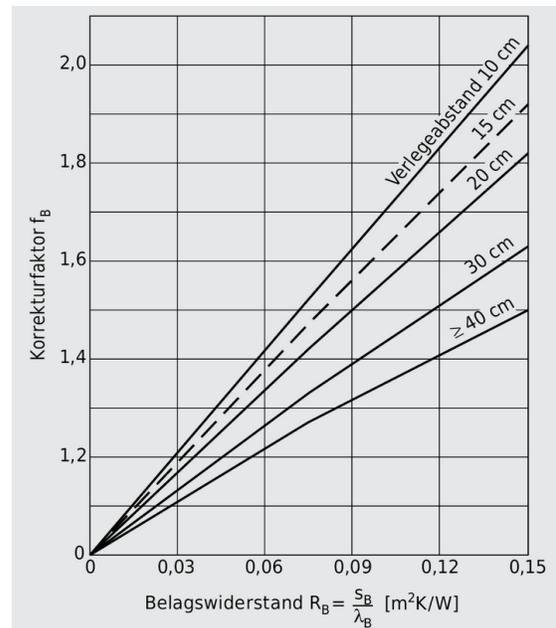


Abbildung 90: Korrekturfaktor für Bodenbelag und Unterlagsboden-Übermass, berechnet nach [EN ISO 11855] (Schmid, et al. 2020)



Anhang F Vergleichsmessung Heizen

Heizen stationär EN 14511:2018 (Messung 002)

Mit stationären Messungen gemäss EN 14511 bei B0/W35 und B0/W55 wurden die Leistungsdaten gemäss Datenblatt überprüft. Auf Abbildung 91 sind die Senkenleistungen, die elektrische Aufnahmeleistung und die Solldrehzahl des Verdichters ersichtlich, gemessen vom CTA Wärmepumpenregler und von der Laborinstrumentierung.

Der Vorlauf-Temperaturfühler wurde beim CTA Regler abgeglichen. Für den Abgleich konnte der Offset, aber nicht die Steigung korrigiert werden, sodass eine leichte Abweichung der gemessenen Temperaturen je nach Temperaturbereich zu einer etwas abweichenden Heizleistungsberechnung führt.

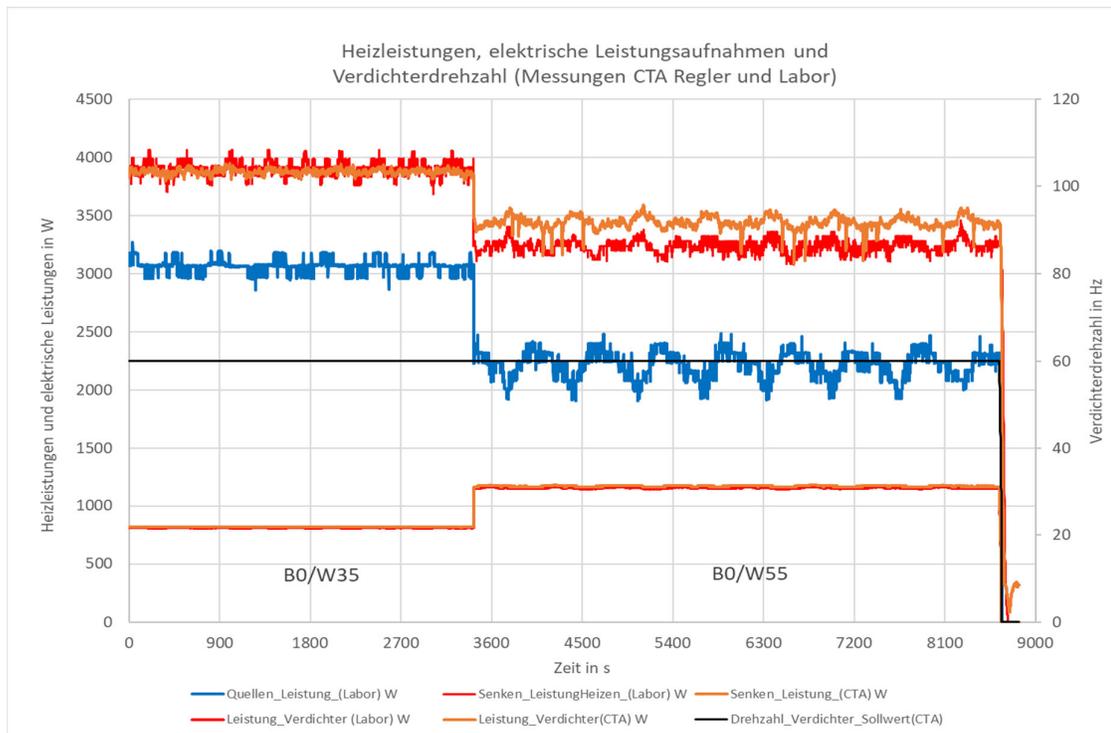


Abbildung 91: Heizleistungen, elektrische Leistungsaufnahme und Verdichterdrehzahl gemäss EN 14511 (Messung 002)

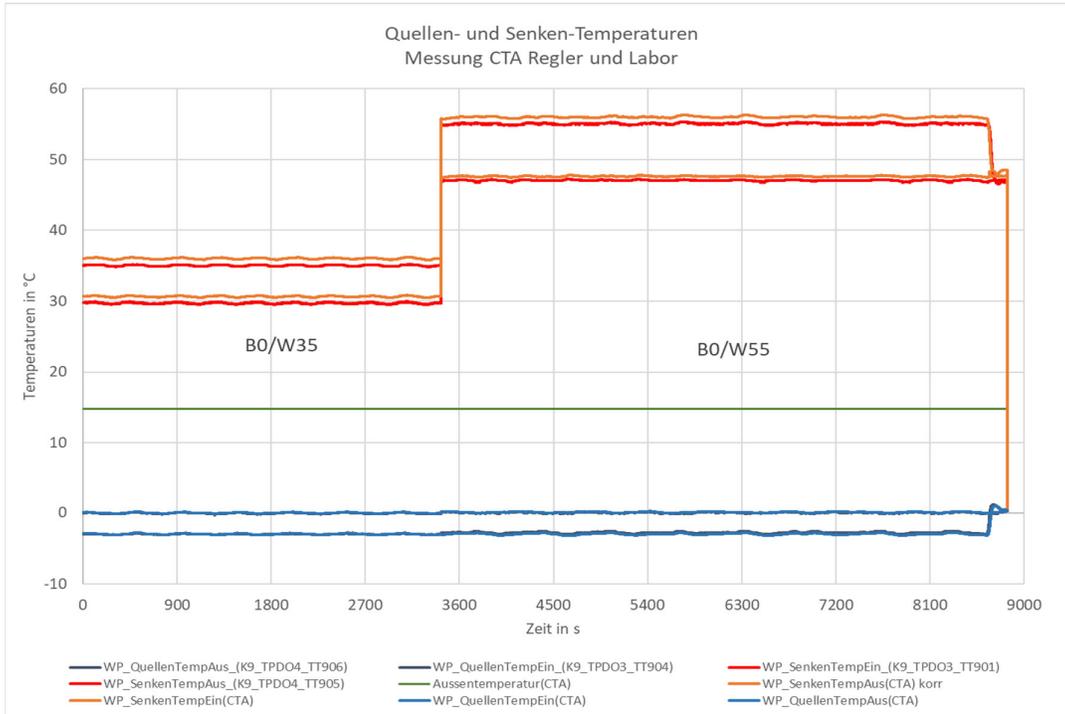


Abbildung 92: Quellen- und Senktemperaturen beim stationären Heizen gemäss EN 14511 (Messung 002)

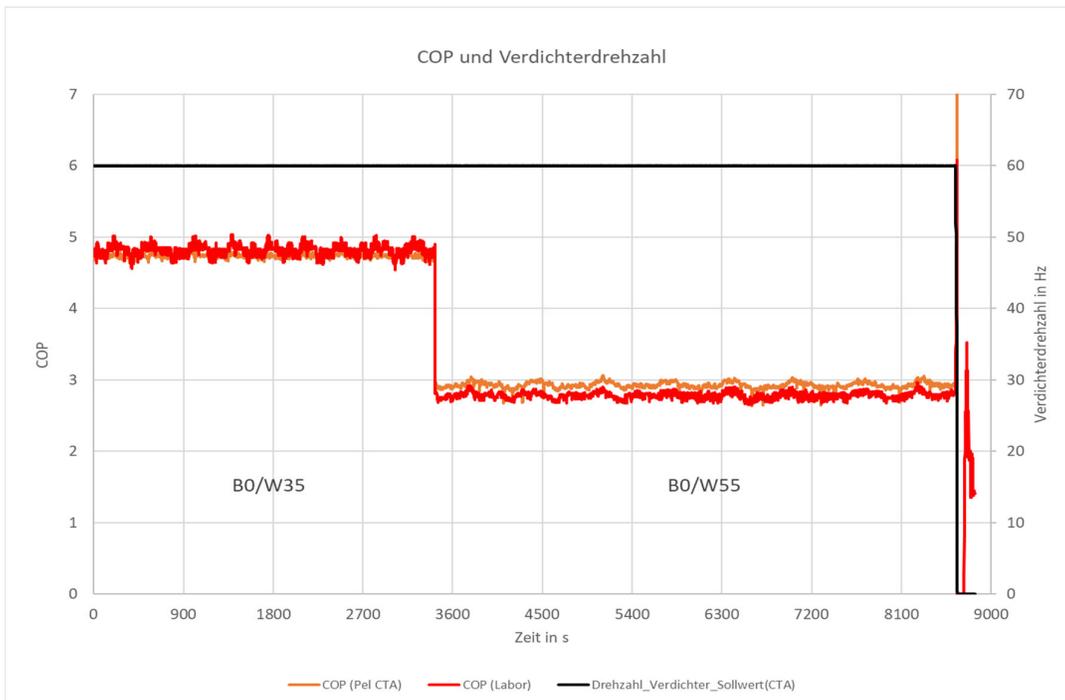


Abbildung 93: COP und Verdichterdrehzahl-Sollwert beim stationären Heizen gemäss EN 14511 (Messung 002)



Anhang G Abgleich der Laborsimulation

Bevor Beginn der Laborversuche wurde das Labor-Simulationsmodell der Wohnung im Matlab/Simulink/Carnot Programm mit den Daten der TRNSYS Simulation abgeglichen, um ein ähnliches Auskühlverhalten der Wohnung zu haben.

Im Prüflabor der FHNW wurden die Heizungsrücklauf- und Raumtemperaturen anhand einer Echtzeitsimulation der Wohnungseinheit bei der jeweiligen Messung ermittelt und der Automation für die Ansteuerung der Emulatoren übergeben.

Für die zu modellierende Fussbodenheizung werden folgende Parameter gesetzt:

Fussbodenheizung

Parameter	Beschreibung	Phys. Einheit	Wert
Qdot_nom	Nominale Heizleistung	W	3'500
Tdiff_nom	Nominale Temperaturdifferenz	K	15
Expo	Radiatorenexponent	-	1.1
Mcap	Masse*Wärmekapazität	J/K	40'000'000
Tini	Initialtemperatur	°C	20

Boden

Parameter	Beschreibung	Phys. Einheit	Wert
Utot	Wärmedurchgangskoeffizient vom Boden zum Grund Es wird ein kleiner Wert angenommen, da das untere Stockwerk ähnliche Temperaturen hat (fasst adiabatisch)	W/m ² /K	0.001

Gebäude

Parameter	Beschreibung	Phys. Einheit	Wert
Ahabit	Energiebezugsfläche	m ²	148.9
Hroom	Raumhöhe	m	3.22
slabwidth	Bodenplattenbreite	m	10
slablenght	Bodenplattenlänge	m	14.8
dwall	Durchschnittliche Wanddicke inkl. Dämmung	m	0.4
UAwall	Wärmedurchgang zu aussen von Wänden/Decke	W/K	0.281*94 + 0.185*148.9



Capa	Wärmekapazität des Gebäudes pro m ² (Wert wurde angepasst, um eine ähnliche Abkühlkurve wie die TRNSYS Simulation zu erhalten)	J/m ² /K	500'000*1.7
------	---	---------------------	-------------

Fenster

Parameter	Beschreibung	Phys. Einheit	Wert
Awindow	Energiebezugsfläche	m ²	[12 14 3.8 0]
AziWin	Ausrichtung der Fenster South = 0°, east -90°, west 90°	°	[0 90 -180 -90]
Uwindow	Wärmedurchgangskoeffizient Fenster	W/m ² /K	[1 1 1 1]*1.8

Die Auskühlkurven der Wohnung 2OG West gemäss Abbildung 94 wurden in der Simulink/Carnot Simulation mit Anpassung der Wärmekapazität des Gebäudes der TRNSYS Simulation angeglichen.

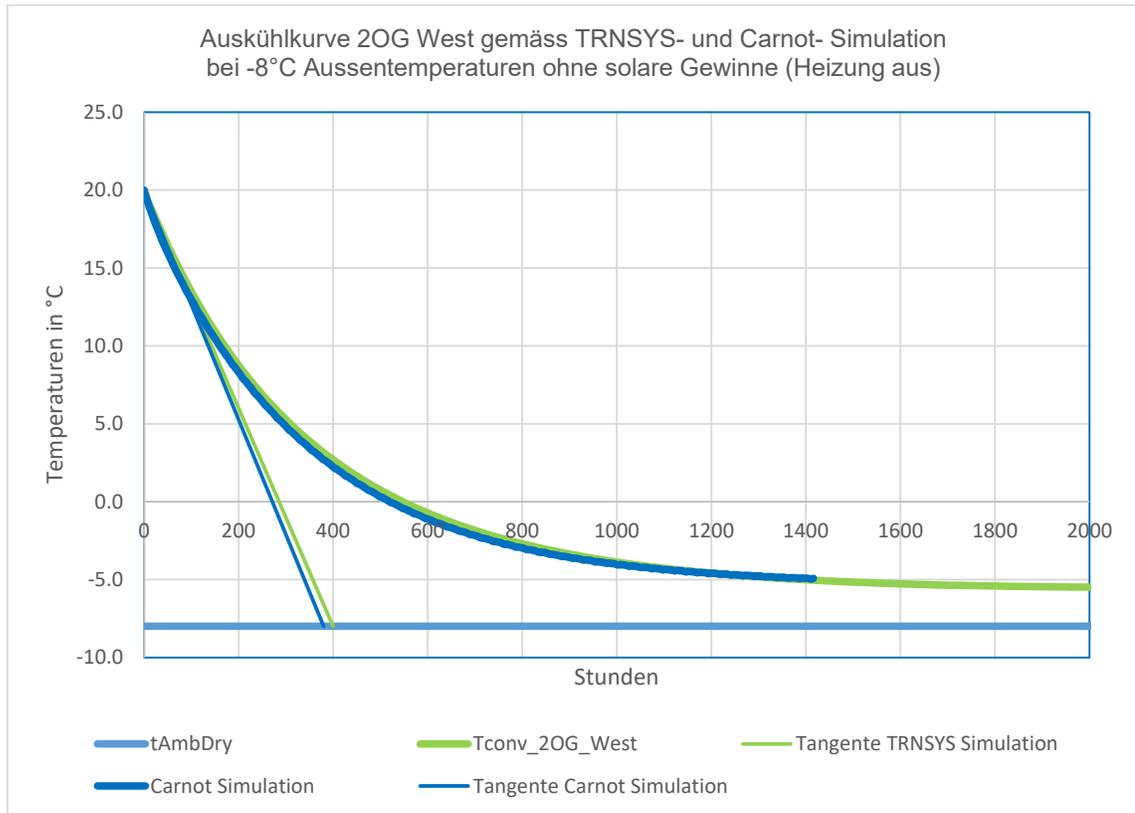


Abbildung 94: Auskühlkurven der Wohnung 2OG West in der TRNSYS- und Simulink/Carnot-Simulation



Anhang H Messgeräte

Tabelle 33: Messgeräte Wärmepumpe und Heizungsabgabe-Emulator und Warmwasserzapfung

Gerät/Funktion	Spezifikation	Messprinzip Fühler	Messgrösse	Ausgangs- Einheit	Messgenauigkeit
Volumenstrom-Messer	E+H Promag 50P	Magnetisch Induktiv	Durchfluss	l/Min als 4..20mA	+/-0.5% vom Messwert
Kaltwasserzähler Dauerdurchfluss Q3 2.5 m3/h Übergangsdurchfluss Q2 0.04 m3/h Kleinster Durchfluss Q1 0.025 m3/h	Aquametro TOPAS PMW-basic 15	Mehrstrahl-Flügelrad-zähler in Trockenläuferausführung	Durchfluss	Impuls/ Liter	Klasse 2 nach EN ISO 4064
Temperaturfühler / Messklemmen	PT100 WAGO 750-461	PT100 3L	Temperatur	°C	0.2% max vom Messbereichsendwert 0.1°C Auflösung digitaler Ausgang

Tabelle 34: Messgeräte Hausnetz

Gerät/Funktion	Spezifikation	Messprinzip	Messgrösse	Einheit	Messgenauigkeit
SPS-Steuerung	Beckhoff CX5120				
Leistungs-Messklemmen	Beckhoff KL3403	Spannung: Direktabgriff Strom: Stromwandler	Elektrische Leistung Strom Spannung	W A V	Messfehler: 0,5 % bezogen auf den Messbereichsendwert (U, I), 1 % berechnete Werte
Aufsteckstromwandler	WAGO 855-2701	Induktiv, Trafoprinzip	Strom	A	Genauigkeitsklasse 1
Referenz Leistungsmesser	Infratek 106A	Spannung: Direktabgriff Strom: Hallsensoren	Elektrische Leistung Strom Spannung	W A V	±(0.1 % Ableseung +0.01 % Bereich)