



Schlussbericht vom 14.03.2022

Innovative Eigenverbrauchsoptimierung für Mehrfamilien-Arealüberbauung

Phase II: Zweite Messperiode mit Vergleich verschiedener Regelalgorithmen



Quelle: Setz Architektur AG, 2020



Datum: 14.03.2022

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

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

Subventionsempfänger:

Smart Energy Engineering GmbH
Fliederstrasse 10, 5417 Untersiggenthal
www.smart-energy-engineering.ch

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Institut für Automation
Klosterzelgstrasse 2, 5210 Windisch
www.fhnw.ch

Setz Architektur AG
Obermatt 33, 5102 Rapperswil
www.setz-architektur.ch

RTB Regionale Technische Betriebe
Hardring 12
5103 Wildegg
www.rtb-wildegg.ch

Autoren:

Prof. Dr. David Zogg, Smart Energy Engineering, david.zogg@smart-energy-engineering.ch
Prof. Dr. Thomas Besselmann, FHNW, thomas.besselmann@fhnw.ch
David Zimmerli, Setz Architektur AG, david.zimmerli@setz-architektur.ch
Laszlo Körtvelyesi, RTB, l.koertvelyesi@rtb-wildegg.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501500-01

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



Zusammenfassung

In Möriken-Wildegg wurde eine innovative Areal-Überbauung mit 4 Mehrfamilienhäusern als Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) realisiert. Im lokalen Netz wird der Betrieb der 4 Wärmepumpen, ca. 70 Haushaltgeräte und mehreren Elektromobil-Ladestationen automatisch auf die Produktion der PV-Anlagen abgestimmt. Damit wird der lokale Eigenverbrauchsanteil erhöht und die Netzbelastung reduziert. Im Rahmen der Phase I wurde eine neuartige Software entwickelt, mit welcher die Verbraucher im gesamten Areal gesteuert werden können. Diese Software beinhaltet eine Verbrauchsoptimierung nach dem Prinzip des «Real Time Pricing». In Phase I wurde klar, dass das grösste Steigerungspotential aller Verbraucher in den Wärmepumpen liegt.

Deshalb wurden in der vorliegenden Messperiode II verschiedene Regelstrategien für die Wärmepumpen verglichen. Dazu konnten drei praktisch baugleiche, bewohnte Gebäude unter gleichen Witterungsbedingungen verglichen werden. In einem Gebäude wurde nur die Warmwasserproduktion optimiert, indem diese einfach auf den Tag geschoben wurde. Das Heizen wurde nicht optimiert. Im zweiten Gebäude wurde das Heizen optimiert, indem die Temperatur im Pufferspeicher bei solarem Überschuss gezielt erhöht wurde, so wie es heute für die Eigenverbrauchsoptimierung standardmässig gemacht wird. Im dritten Gebäude wurde der neuartige Ansatz eines vollständigen Thermomanagements getestet, mit welchem die thermische Masse des Gebäudes aktiv als Speicher genutzt wird. Dazu wurden auch die Vorlauftemperaturen und die Raumsollwerte gezielt beeinflusst. Zudem wurden die tatsächlichen Raumtemperaturen permanent überwacht und in der Regelung berücksichtigt.

Die Resultate waren verblüffend: Mit dem vollständigen Thermomanagement konnte der solarelektrische Deckungsgrad für das Heizen mit der Wärmepumpe über das gesamte Jahr gesehen um den Faktor 2 erhöht werden gegenüber dem Fall ohne Optimierung (von 17.7% auf 35.7%). In der Übergangszeit lag der Faktor sogar bei 2.4 (von 30.2% auf 72.2%). Im Vergleich dazu wurde mit der einfachen Temperaturüberhöhung des Speichers nur ein jährlicher Faktor von 1.2 erreicht (von 17.7% auf 21.5%). Zudem konnte gezeigt werden, dass mit dem Thermomanagement die Effizienz der Wärmepumpe hoch bleibt (Jahresarbeitszahl bei knapp 5). Im Vergleich dazu nahm die Effizienz des Systems bei einer Temperaturüberhöhung des Speichers ab.

Im Hinblick auf die befürchtete «Winterstromlücke» wurde der Winterfall speziell betrachtet. Hier hatte das Thermomanagement ebenfalls einen klaren Vorteil. Der energetische Netzbezug konnte um 10 Prozentpunkte reduziert werden. Zudem kann auch der leistungsmässige Netzbezug reduziert werden, indem das Gebäude als Speicher gezielt genutzt wird. Die Idee kann also nicht nur für die heute weit verbreitete «Eigenverbrauchsoptimierung» genutzt werden, sondern auch für die Stabilisierung des Stromnetzes in der Zukunft. Die Wärmepumpen können bei Tieflastphasen hochgefahren werden und bei Hochlastphasen heruntergefahren werden, während die Energie in den Gebäuden gepuffert wird.

Mit diesen Messungen konnte gezeigt werden, dass die Speicherung von Energie in Gebäuden ohne wesentliche Zusatzinvestitionen möglich wird. Es sind keine überdimensionierten Pufferspeicher oder gar teure Batteriespeicher notwendig, sondern es reicht eine intelligente Gebäudeautomation. Da die Wärmepumpentechnologie in der Schweiz weit verbreitet ist, wird das gesamtschweizerische Potential als enorm hoch eingestuft. Zur Speicherung eignen sich alle Gebäude, welche gut gedämmt sind und eine genügend hohe thermische Trägheit haben, und speziell solche mit Fussbodenheizsystemen (da dort der grösste Anteil an Energie gespeichert wird).



Résumé

À Mörriken-Wildegg, un complexe innovant de 4 immeubles collectifs formant un regroupement pour la consommation propre (RCP) a été réalisé. Le fonctionnement des 4 pompes à chaleur, d'environ 70 appareils électroménagers et de plusieurs stations de recharge de véhicules électriques est automatiquement coordonné avec la production des installations photovoltaïques. Cela permet d'augmenter la part d'autoconsommation locale et de réduire l'impact du complexe sur le réseau électrique externe. Dans le cadre de la phase I, un nouveau logiciel permettant de contrôler les consommateurs sur l'ensemble du site a été développé. Ce logiciel comprend une optimisation de la consommation selon le principe du "Real Time Pricing". Durant la phase I, il est apparu clairement que le potentiel d'augmentation le plus important de tous les consommateurs se trouvait dans les pompes à chaleur.

C'est pourquoi, dans la deuxième période de mesure présentée dans ce rapport, différentes stratégies de régulation des pompes à chaleur ont été comparées. Trois bâtiments habités de construction pratiquement identique et soumis aux mêmes conditions météorologiques ont pu être comparés : Dans un premier bâtiment, le chauffage n'a pas été optimisé et seule la production d'eau chaude a été optimisée en la reportant simplement sur la journée. Dans le deuxième bâtiment, le chauffage a été optimisé en augmentant la température dans le réservoir tampon en cas d'excédent solaire, comme cela se fait aujourd'hui de manière standard pour l'optimisation de la consommation propre. Dans un troisième bâtiment, une nouvelle approche de gestion thermique utilisant la masse thermique du bâtiment comme réservoir de chaleur a été testée. Dans ce cas, les températures de départ et les valeurs de consigne des pièces ont été influencées de manière ciblée. De plus, les températures ambiantes réelles ont été mesurées en continu et prises en compte dans la régulation.

Les résultats sont étonnants : avec la gestion thermique complète, le taux de couverture solaire pour le chauffage avec la pompe à chaleur est multiplié par deux sur l'ensemble de l'année par rapport au cas sans optimisation (de 17,7% à 35,7%). Pendant les périodes de transitions printanière et automnale, le facteur de multiplication est même de 2,4 (de 30,2% à 72,2%). En comparaison, la simple surélévation de la température du réservoir tampon permet d'atteindre un facteur de multiplication annuel de seulement 1,2 (de 17,7% à 21,5%). De plus, il a été démontré qu'avec la gestion thermique, l'efficacité de la pompe à chaleur reste élevée (coefficient de performance annuel proche de 5). En comparaison, l'efficacité du système a diminué en cas d'augmentation excessive de la température du réservoir tampon.

Dans le contexte de la crainte d'une pénurie d'électricité en hiver, le cas hivernal a été spécialement étudié. Ici aussi, la gestion thermique présentait un net avantage : Le soutirage électrique du complexe au réseau a pu être réduit de 10%. En outre, les pointes de puissance sur le réseau peuvent également être réduites en utilisant de manière ciblée le bâtiment comme réservoir. L'idée peut donc être utilisée non seulement pour "l'optimisation de la consommation propre", très répandue aujourd'hui, mais aussi pour stabiliser le réseau électrique à l'avenir. Les pompes à chaleur peuvent être mises en marche lors des phases de basse charge et arrêtées lors des phases de haute charge, tandis que l'énergie est stockée en tampon dans les bâtiments.

Ces mesures ont permis de démontrer que le stockage de l'énergie dans les bâtiments devient possible sans investissements supplémentaires importants. Il n'est pas nécessaire de disposer de réservoirs tampons surdimensionnés ou même de batteries de stockage coûteuses, il suffit d'une domotique intelligente. La technologie des pompes à chaleur étant très répandue en Suisse, le potentiel à l'échelle nationale est considéré comme important. Tous les bâtiments bien isolés et présentant une inertie thermique suffisamment élevée se prêtent au stockage. Vu que la plus grande partie de l'énergie est stockée dans le sol, les bâtiments équipés de systèmes de chauffage au sol s'y prêtent particulièrement bien.



Summary

In Möriken-Wildeg, an innovative site with 4 apartment buildings was realised as a self-consumption network. The operation of the 4 heat pumps, approx. 70 household appliances and several electric vehicle charging stations is automatically coordinated with the production of the PV systems. This increases the local self-consumption share and reduces the load on the grid. As part of phase I, a new type of software was developed with which the consumers in the entire area can be controlled. This software includes consumption optimisation according to the principle of "real time pricing". In phase I it became clear that the greatest potential for increase of all consumers lies in the heat pumps.

Therefore, different control strategies for the heat pumps were compared in the present measurement period II. For this purpose, three practically identical, occupied buildings submitted to the same weather conditions were compared. In the first building, the heating was not optimized while the hot water production was optimised by simply postponing it until daytime. In the second building, heating was optimised by deliberately increasing the temperature in the buffer tank when there was a solar surplus, as is standard practice today for optimising self-consumption. In the third building, a novel approach of a complete thermal management which uses the thermal mass of the building as storage was tested. For this purpose, the supply temperatures and the room setpoints were also specifically influenced. In addition, the actual room temperatures were permanently monitored and taken into account in the control system.

The results were amazing: With the complete thermal management, the solar coverage for heating with the heat pump could be increased by a factor of 2 over the whole year compared to the case without optimisation (from 17.7% to 35.7%). In the transition period of spring and autumn, the increase factor was even 2.4 (from 30.2% to 72.2%). In comparison, with the simple temperature increase of the buffer tank, only an annual increase factor of 1.2 was achieved (from 17.7% to 21.5%). Furthermore, it could be shown that the efficiency of the heat pump remains high with thermal management (annual performance factor at just under 5). In comparison, the efficiency of the system decreased when the temperature of the buffer tank was increased.

With regard to the feared "winter electricity gap", the winter case was specifically analysed. Here, thermal management also demonstrated a clear advantage. The energy consumption from the grid could be reduced by 10%. In addition, the peak power drawn from the grid can also be reduced by using the building as a storage facility in a targeted manner. The idea can therefore not only be used for "self-consumption optimisation", which is widespread today, but also for stabilising the electricity grid in the future. The heat pumps can be ramped up during low-load phases and ramped down during high-load phases while storing the energy in the building mass.

These measurements could demonstrate that the storage of energy in buildings becomes possible without significant additional investments. No oversized buffer tank or even expensive battery storage is necessary, but intelligent building automation is sufficient. Since heat pump technology is widespread in Switzerland, the potential for Switzerland as a whole is considered to be enormous. All buildings that are well insulated and have a sufficiently high thermal inertia are suitable for storage, especially those with underfloor heating systems as floors store the largest amount of energy.



Take-home messages

- Mit aktiver Speicherung von Energie in der Gebäudemasse kann der solarelektrische Deckungsgrad von Wärmepumpen durch die eigene PV-Anlage verdoppelt werden.
- Dank intelligenter Regelungstechnik mit Raumtemperaturüberwachung bleibt der Komfort jederzeit angenehm und die Effizienz bleibt hoch.
- Das Gebäude ist ein «Gratis-Energiespeicher», welcher keine zusätzlichen Investitionskosten verursacht.
- Das System hat nicht nur Potential zur Eigenverbrauchsoptimierung, sondern auch zur zukünftigen Stabilisierung des Stromnetzes, speziell in den Wintermonaten.
- Jeder zukunftsfähige Energiemanager sollte das gesamte Gebäude als Speicher optimieren können, nicht nur die Puffer- und Brauchwarmwasserspeicher.
- Zur thermischen Speicherung eignen sich alle Gebäude, welche gut gedämmt sind. Am besten eignen sich solche mit Fussbodenheizungen und einer gewissen thermischen Masse.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Take-home messages	6
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung	10
1.1. Ergebnisse aus der ersten Messperiode	10
1.2. Fokus der zweiten Messperiode	11
1.3. Praktisch identische Gebäude	11
1.4. Szenarien.....	12
2 Anlagenbeschrieb	14
2.1 Gebäudedaten	21
3 Vorgehen und Methode.....	23
3.1 Arealnetz mit verteilter Intelligenz	23
3.2 Einbindung Wärmepumpe und Gebäude ins Energiemanagementsystem (EMS).....	24
3.3 Preisbasierter Optimierungsalgorithmus	25
3.4 Hydraulik-Schema der Wärmepumpen-Installation (allgemein).....	26
3.5 Vollständiges Thermomanagement.....	27
3.6 Variable Beeinflussung der Heizkurve (Komfortwert).....	28
3.7 Adaption des Regelbereichs an verschiedene Situationen.....	29
3.8 Regler-Einstellungen für die zweite Messperiode 2021	31
4 Ergebnisse und Diskussion	34
4.1 Beispieltage	34
4.2 Auswertung einzelner Monate.....	38
4.3 Beurteilung des Komforts	40
4.4 Jahresauswertungen	42
4.4.1 Steigerungsfaktoren	42
4.4.2 Solaranteile Wärmepumpen	45
4.4.3 Netzbezug Wärmepumpen	47
4.4.4 Arbeitszahl Wärmepumpen	49
4.4.5 Auswertung gesamtes Areal (Ergänzung).....	51
4.5 Messkontrolle.....	56
5 Schlussfolgerungen und Fazit	63



5.1	Wichtigste Resultate und Kennzahlen auf einen Blick	63
5.1	Effizienz im Winter und Vergleich mit Batteriespeicher	63
5.2	Vorteil Monitoring	64
5.3	Effizienz versus Suffizienz	64
5.4	Vergleich mit den übergeordneten Projektzielen	65
6	Nationale und internationale Zusammenarbeit	66
7	Kommunikation	67
8	Publikationen aus dem Projekt	68
9	Literaturverzeichnis	69



Abkürzungsverzeichnis

BWW	Brauchwarmwasser
BUS, Bus	Digitales Bussystem zur Datenübertragung
COP	Coefficient of Performance (Wärmepumpe)
EG	Erdgeschoss
EVM, EvM	Eigenverbrauchsmanager (optimiert den Eigenverbrauch)
JAZ	Jahresarbeitszahl (Wärmepumpe)
HT	Hochtarif (Strom)
KNX	Gebäude-Bussystem
kW	Kilowatt (momentane Leistung)
kWh	Kilowatt-Stunden (Energie)
LAN	Local Area Network (Daten-Netzwerk)
MB	Messperiode Beginn
ME	Messperiode Ende
MID	Measuring Instruments Directive (Richtlinie 2004/22/EG)
MKZ	Minergie-Kennzahl (Gebäude)
MODBUS	Protokoll zur Kommunikation mit Geräten (Wärmepumpen, Ladestationen, etc.)
NT	Niedertarif (Strom)
OG	Obergeschoss
PC	Personal Computer (Industrie-PC = robuste Ausführung)
PV	Photovoltaik
PVT	Photovoltaik-Tarif (auch Solartarif genannt)
RTB	Regionale Technische Betriebe (Energieversorger Möriken-Wildegg)
SP	Speicher (Puffer)
WA	Wärmeabgabesystem
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZEV	Zusammenschluss zum Eigenverbrauch



1 Einleitung

Beim Areal in Möriken-Wildegg handelt es sich um einen Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) mit vier Gebäuden und diversen PV-Anlagen, in welchem erstmals eine automatisierte Strombörse nach dem Prinzip von «Real-Time-Pricing» umgesetzt wurde. Dabei wird der lokale Strompreis in Echtzeit berechnet aus dem jeweiligen Anteil von Solar- und Netzstrom. Der variable Strompreis wird dem Benutzer angezeigt als Anreizsystem zur Nutzung des Eigenstroms. Er dient auch zur automatischen Optimierung der Verbraucher, wie Wärmepumpen, Elektromobil-Ladestationen und Haushaltgeräte.

Das Areal wurde im Verlaufe des Jahres 2019 erfolgreich in Betrieb genommen und es wurde eine erste Messperiode durchgeführt. Dabei wurde der Fokus auf die Strombörse mit dem Anreizsystem gelegt. Es wurden sowohl die ökologischen wie auch die ökonomischen Kennzahlen überprüft (Abschnitt 1.1). Die Resultate wurden ausführlich dokumentiert im Schlussbericht [1] der Phase I. In der zweiten Messperiode wurden verschiedene regelungstechnische Methoden zur Optimierung der Wärmepumpen untersucht (Abschnitt 1.2). Die Resultate werden im vorliegenden Bericht dokumentiert.

1.1. Ergebnisse aus der ersten Messperiode

Die erste Messperiode wurde durchgeführt vom 1. September 2019 bis 31. August 2020. Folgend werden die wichtigsten Resultate dargestellt (siehe Schlussbericht Phase I, Kapitel 5).

Ökologie ↑ Eigenverbrauchsgr. 40% ↑ Autarkiegrad 45% ↓ Netzbezug 1200 kWh/P.	Effizienz ↑ JAZ WP > 4 ↓ Minergie MKZ < 25
Bewohner → Einsparungen 7..8%	Betreiber ↑ Rendite 5% (3%)
→ Komfort	

Einfluss Eigenverbrauchsmanager: ↑ ↓ Verbesserung (Pfeilrichtung: Beeinflussung Kennzahl)
→ neutral



In Messkontrolle untersucht

Abbildung 1: Wichtigste Resultate aus der ersten Messperiode [1]

Es wurden die vier Bereiche Ökologie, Effizienz und Ökonomie auf Bewohner- wie auch auf Betreiberseite betrachtet. Es konnte gezeigt werden, dass in allen Bereichen merkliche Einsparungen vorgenommen werden konnten. Die erreichten Jahreskennzahlen sind in Abbildung 1 zusammengefasst. Diese sind zu einem grossen Teil auf die lokale Produktion der PV-Anlagen, die Effizienz der Gebäude und eingesetzten Wärmepumpen sowie den Zusammenschluss zum Eigenverbrauch (ZEV) zurückzuführen. Das Anreizsystem der Strombörse mit der Regelungstechnik konnte die Kennzahlen weiter optimieren. Die Tendenzen sind in der Abbildung als Pfeile angegeben. In drei der vier Bereichen waren klare Optimierungen möglich. Allerdings war in dem Bereich des monetären Anreizsystems für die Bewohner keine Optimierung möglich, was auf die ungünstige tarifliche Situation zurückzuführen war (tiefer Nachtstromtarif).



In der ersten Messperiode konnte zudem nicht quantifiziert werden, wie hoch die Optimierungen waren, da keine Vergleichsmöglichkeiten mit einem Standard-System bestanden. Deshalb wurde die zweite Messperiode gestartet, in welcher die Optimierung der Wärmepumpen als grösste Verbraucher näher untersucht wurde.

1.2. Fokus der zweiten Messperiode

In der zweiten Messperiode lag der Fokus auf dem quantitativen Einfluss der regelungstechnischen Optimierung. Dabei wurden die ökologischen Kennzahlen wie Eigenverbrauchsgrad und Autarkiegrad, aber auch die Effizienz des Systems untersucht. Da die Wärmepumpen den grössten Anteil an der Optimierung ausmachten, wurden diese näher untersucht.

Im Areal bestand die ideale Situation, dass drei der vier Häuser praktisch identisch waren (siehe Abschnitt 1.3). Es war also eine einmalige Chance, verschiedene regelungstechnische Optimierungen der Wärmepumpen unter realen Bedingungen auszutesten. Dazu wurden parallel unterschiedliche Szenarien gefahren.

Im Speziellen waren folgende Fragestellungen interessant:

- Was bringt die thermische Speicherung in der Gebäudemasse?
- Reicht eine Temperaturüberhöhung der technischen Speicher?
- Wie gross ist die Steigerung des solaren Deckungsgrades gegenüber einem System ohne Optimierung?

Im Zusammenhang mit der Kombination **Photovoltaik-Wärmepumpe** sollten folgende wichtigen Fragestellungen geklärt werden:

- Was bringt die «intelligente» Optimierung der Wärmepumpen wirklich?
- Was ist der Vorteil gegenüber einer «konventionellen» Optimierung (z.B. SG-Ready)?
- Wie gross ist das Potential im Sommer, im Winter und in den Übergangszeiten?
- Was ist der Einfluss verschiedener Optimierungskriterien auf die Effizienz?
- Wie weit kann ohne Komforteinbusse optimiert werden?

Obige Erkenntnisse sind aus Sicht der Autoren von hohem Interesse für die zukünftige Energiestrategie der Schweiz, denn sowohl Wärmepumpen wie auch Photovoltaikanlagen sollen weiter verbreitet werden. Indes ist es von grosser Bedeutung, wie gut diese beiden Komponenten zusammenarbeiten, und zwar nicht nur im Sommer oder der Übergangszeit, sondern auch im Winter bei tiefer PV-Produktion.

1.3. Praktisch identische Gebäude

Drei der vier Gebäude sind praktisch baugleich (Abbildung 2). Die Gebäude befinden sich am selben Standort und sind damit der gleichen Witterung und Sonneneinstrahlung ausgesetzt. Auch der «Bewohner-Mix» und die Anzahl der Bewohner ist vergleichbar. Zudem ist die Gebäudetechnik identisch, inklusive der Wärmepumpen-Anlagen. Damit sind ideale Voraussetzungen gegeben für eine Untersuchung verschiedener Optimierungsalgorithmen unter sonst praktisch gleichen Bedingungen.



Abbildung 2: Drei baugleiche Gebäude



Die Gebäude sind in Minergie-P-Eco-Bauweise ausgeführt nach dem Prinzip nach «Swisswoodhouse». Sie sind in Holzrahmen- und Hybridbauweise konstruiert. Gebäude 1 wurde als reine Holzrahmenbauweise mit betoniertem Treppenhauskern erstellt. Die Gebäude 2 und 3 sind in Hybridbauweise ausgeführt. Innenwände und Decken in Mauerwerk und Beton, Aussenwände als Holzrahmenbau. Die Attikageschosse sind in Holzrahmenbauweise wie in Gebäude 1 ausgeführt. Alle Gebäude haben den gleichen Anhydrithunterlagsboden mit 55mm Stärke und Fussbodenheizsysteme.

Die Wärmepumpen, Speicher und sonstigen Installationen sind identisch. Nähere Angaben dazu werden im Abschnitt 0 Gebäudedaten gemacht. Die Bewohner sind ein Mix aus Eigentümern und Mietern aus allen Altersschichten. Auch hier gibt es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Gebäuden. Die Ausrichtung der Gebäude 2 und 3 ist identisch, Gebäude 1 ist um 90° gedreht (siehe Abbildung 4). Dies hat jedoch keinen wesentlichen Einfluss auf die Sonneneinstrahlung, wie die Messdaten zeigen. Zudem wurde nach der halben Messperiode eine «Regler-Rochade» durchgeführt, um allenfalls noch vorhandene systematische Fehler zu eliminieren (siehe nächster Abschnitt).

1.4. Szenarien

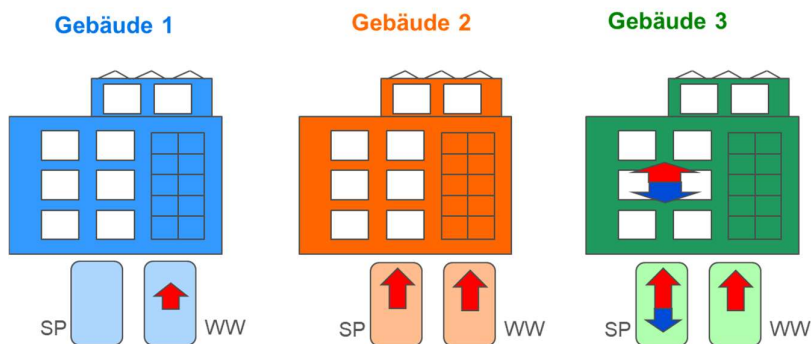


Abbildung 3: Drei verschiedene Regel-Strategien

Für die Kombination zwischen Photovoltaik (PV) und Wärmepumpen (WP) wurden 3 unterschiedliche Optimierungsalgorithmen gewählt:

- Gebäude 1: Keine Optimierung, nur Brauchwarmwasser-Produktion (WW) am Tag nach festem Zeitprogramm
- Gebäude 2: Einfache Optimierung mit Überhöhung des Pufferspeichers (SP) und Brauchwarmwasser-Produktion (WW) am Tag
- Gebäude 3: Vollständige Optimierung mit aktiver Nutzung des Gebäudes als thermischer Speicher

Um sicher zu gehen, dass allenfalls noch vorhandene leichte Unterschiede in den Gebäuden bzw. Wärmepumpeneinstellungen keinen systematischen Fehler in den Daten produzieren, wurden die Regelalgorithmen nach der «Sommerpause» zwischen den Gebäuden ausgetauscht («Rochade»).

Damit konnten folgende Szenarien gemäss Projektvorgaben verglichen werden:

Szenario A: «Intelligente» automatische Optimierung (vollständiges Thermomanagement)

Dieses Szenario verfolgt die «intelligente» Optimierung mit dem Eigenverbrauchsmanager inkl. Thermomanagement und Speicherung von Energie in der Gebäudemasse. Damit wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Was bringt die thermische Speicherung im Gebäude?
- Wie hoch ist der Einfluss auf den Eigenverbrauch und die Effizienz?



- Wie ist der Einfluss der variablen Vorlauf- und Raumtemperaturen auf den Komfort?

Dank messtechnischer Überwachung des gesamten Gebäudes (alle Raum-, Speicher-, Vorlauftemperaturen etc. werden gemessen) war eine spezifische Untersuchung gut möglich.

Szenario B: «Konventionelle» automatische Optimierung (nur Speichermanagement)

Unter «konventionell» werden zur Zeit des Projektstarts (2020) marktübliche Lösungen verstanden. Dazu gehört die einfache Temperaturüberhöhung der technischen Speicher ohne Thermomanagement des Gebäudes. Auf die Verwendung von Boiler-Elektroeinsätzen wurde bewusst verzichtet, um die Effizienz des Systems nicht unnötig zu verschlechtern. Damit wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Reicht eine Überhöhung der technischen Speicher (SP, WW)?
- Wie hoch sollte diese sein in Abhängigkeit der vorhandenen Speichergrossen?
- Wie hoch ist der Einfluss auf den Eigenverbrauch und die Effizienz?

Szenario C: «Keine» automatische Optimierung

Bei diesem Szenario fand keine automatische Optimierung statt. Das System diente nur noch zur Messung. Es wurden jedoch einfache manuelle Optimierungen an den Einstellungen der Wärmepumpe vorgenommen, dazu gehörte das Schieben der Brauchwarmwasser-Produktion auf den Tag über ein Zeitprogramm.

Damit wurden folgende Fragestellungen untersucht:

- Wie hoch ist der «natürliche» Eigenverbrauch ohne automatische Optimierung?
- Wieviel kann durch feste Einstellung der Warmwasserladungsprogramme auf den Tag herausgeholt werden?

Auf eine Nachtabsenkung der Gebäude wurde bewusst verzichtet, weil dies bei heutigen gut gedämmten Gebäuden nicht mehr üblich ist und den Netzbezug in den frühen Morgenstunden unnötig erhöhen würde (für das Wiederaufwärmen des Systems).

Obige Szenarien lehnen sich auch an die durchgeführten Simulationen im BFE-Projekt OPTEG "Optimierung des Eigenverbrauchs in Gebäuden" [2]. Die Ideen von damals können erstmals in der Praxis an realen Gebäuden direkt verglichen werden (MFH statt EFH).

Vor der Durchführung der zweiten Messperiode wurden die drei Systeme vorgängig einreguliert. Dazu wurden die Heizkurven der Wärmepumpen optimal eingestellt und der hydraulische Abgleich nochmals optimiert. Es wurde auch eine Abstimmung zwischen den Gebäuden vorgenommen, so dass die Raumtemperaturen vergleichbar waren. Zudem wurden monatliche Zwischenauswertungen der Messdaten durchgeführt, um das Projekt zu begleiten und bei allfälligen Abweichungen einzugreifen. Es waren jedoch keine wesentlichen Eingriffe notwendig, ausser einer Erhöhung der Raumtemperaturen aufgrund der Wünsche der Bewohner im Dezember, welche für alle drei Gebäude gleichermassen vorgenommen wurde.

Die Bewohner wurden über die weitere Messperiode informiert. Die übergeordnete Optimierung der Wärmepumpen hatte für den einzelnen Bewohner jedoch keinen Einfluss, da der Komfort nicht wesentlich tangiert wurde (die Grundeinstellungen der Wärmepumpen wurden dadurch nicht beeinflusst). Auch der Einfluss auf die Stromkosten der einzelnen Bewohner war vernachlässigbar, wie die «Messkontrolle» in der ersten Messperiode bereits gezeigt hat (Nacht- und Tagtarif praktisch identisch). Den Bewohnern wurde absichtlich nicht kommuniziert, welche Optimierung in welchem Gebäude lief, um keine «Vorurteile» zu bilden.



2 Anlagenbeschreibung

Die Minergie-P-Eco-Überbauung in Möriken-Wildegg AG ist in Abbildung 4 zu sehen. Sie besteht aus 4 Häusern mit insgesamt 35 Wohnungen. Die Gebäude wurden in Holz- und Hybridbauweise nach dem Konzept «Swisswoodhouse» der Renggli AG Sursee realisiert.

Abbildung 5 zeigt den Innenhof mit Blick auf zwei Gebäude und den Gemeinschaftsraum. Die Wohnungen vom Erdgeschoss bis zum zweiten Obergeschoss haben eine natürliche Verschattung im Sommer durch die «Loggias». Die Dächer sämtlicher Gebäude und des Pavillons sind vollständig mit Photovoltaik-Panels bedeckt in Ost-West-Ausrichtung. Die Attika-Wohnungen haben grosse Dachterrassen, deren Brüstungen ebenfalls mit Photovoltaik-Panels bedeckt sind.

Auch die Fassaden wurden z.T. mit PV-Modulen ausgerüstet. Abbildung 6 zeigt die Module am Gebäude 4 mit südlicher und westlicher Ausrichtung. Damit wird auch die Winter- und Abendsonne optimal genutzt (wenn kein Nebel herrscht).

Die Wohnungen wurden speziell ausgerüstet zur Visualisierung und Interaktion mit dem Benutzer (Abbildung 7). Dazu gehört ein KNX-System zur Überwachung und Einstellung der Raumtemperatur. Die Raumtemperatur wird vom System gezielt beeinflusst, um mehr thermische Energie im Gebäude speichern zu können. Die Benutzer können jedoch die Solltemperatur mit zwei Tasten «+» und «-» nach oben oder unten schieben, um auf den individuellen Komfortbedarf abzustimmen. Die Möglichkeit der Raumtemperaturbeeinflussung wurde in dieser Projektphase in einzelnen Gebäuden gezielt aktiviert oder deaktiviert, um die Wirkung untersuchen zu können.

Zudem wird über LED dargestellt, ob Sonnenstrom genutzt wird. Grüne LED stehen für 100% Sonnenstrom, rote LED zeigen an, dass ein gewisser Anteil an Netzstrom benötigt wird. Die Bewohner können die Haushaltgeräte automatisch über Sonnenstrom laufen lassen. Zudem ist in jeder Wohnung eine Solarsteckdose installiert, welche nur mit Sonnenstrom betrieben wird. Diese Anreizsysteme wurden bereits im Schlussbericht der Phase I [1] ausführlich beschrieben. Sie haben jedoch keinen Einfluss auf die vorliegende zweite Messphase, weil hier nur die Optimierung der Wärmepumpen betrachtet wurde.



Abbildung 4: Areal-Überbauung in Möriken-Wildegg AG mit 4 Mehrfamilienhäusern (Quelle: Setz Architektur AG)



Abbildung 5: Blick in Innenhof (Quelle: Setz Architektur AG)



Abbildung 6: PV-Fassadenmodule (Quelle: Setz Architektur AG)



Abbildung 7: Ausrüstung der Wohnungen mit KNX: Temperaturüberwachung, Solarbetrieb für Geschirrspüler, Anzeige Stromtarif, Solarsteckdose (Quelle: Smart Energy Engineering)

Abbildung 8 zeigt die Visualisierungen auf, welche die bereits in Projektphase I entwickelte Software ermöglicht. Die Energiedaten können sowohl über ein Webportal auf dem PC betrachtet werden wie



auch auf dem Smartphone. Sowohl die Bewohner wie auch die Betreiber haben einen Echtzeit-Zugriff auf die Daten. Es können auch Einstellungen online verändert werden. Selbstverständlich wurden die Kriterien des Datenschutzes jederzeit eingehalten, indem nur die erlaubten Daten über entsprechende Authentifizierungen und Verschlüsselungen abgefragt werden konnten.

In jedem der vier Gebäude (und der Tiefgarage) war eine separate Steuerung eingebaut, der sogenannte «Eigenverbrauchsmanager» (Abbildung 10). Dieser steuert sämtliche Geräte inkl. der Wärmepumpen und verarbeitet alle Daten eines Gebäudes. Die Steuerungen der verschiedenen Gebäude kommunizieren untereinander und die Daten werden ausgetauscht.

Abbildung 11 rechts zeigt die Elektroinstallationen in einem Gebäude. Sämtliche Wohnungen und Wärmepumpen werden je mit einem separaten Stromzähler erfasst. Die Stromzähler sind geeicht und für Abrechnungszwecke zugelassen (MID-zertifiziert). Die Daten werden vom Eigenverbrauchsmanager in Echtzeit verarbeitet, sowohl für die Regelung des Systems wie auch für das Monitoring und die Abrechnung des Stroms im ZEV (Zusammenschluss zum Eigenverbrauch).

Die Wärmepumpen wurden zudem mit je zwei Wärmezählern ausgerüstet, welche den Wärmeverbrauch für das Heizen und das Brauchwarmwasser separat erfassen. Zudem konnte der Zustand der Wärmepumpe über eine MODBUS-Schnittstelle ausgelesen werden. So konnte auch der elektrische Verbrauch auf das Heizen und die Brauchwarmwassererwärmung aufgeteilt werden. Dies ermöglichte die getrennte Berechnung der Arbeitszahlen für Heizen und Brauchwarmwasser.



Abbildung 8: Visualisierung für Bewohner und Betreiber. Grosses Bild: Webportal auf PC mit Energiestatistik. Kleine Bilder unten: Portal auf Smartphone mit aktuellem Strompreis, Autarkiegrad/Eigenverbrauchsgrad, Leistungsverläufe, Statistik (Quelle: Smart Energy Engineering)

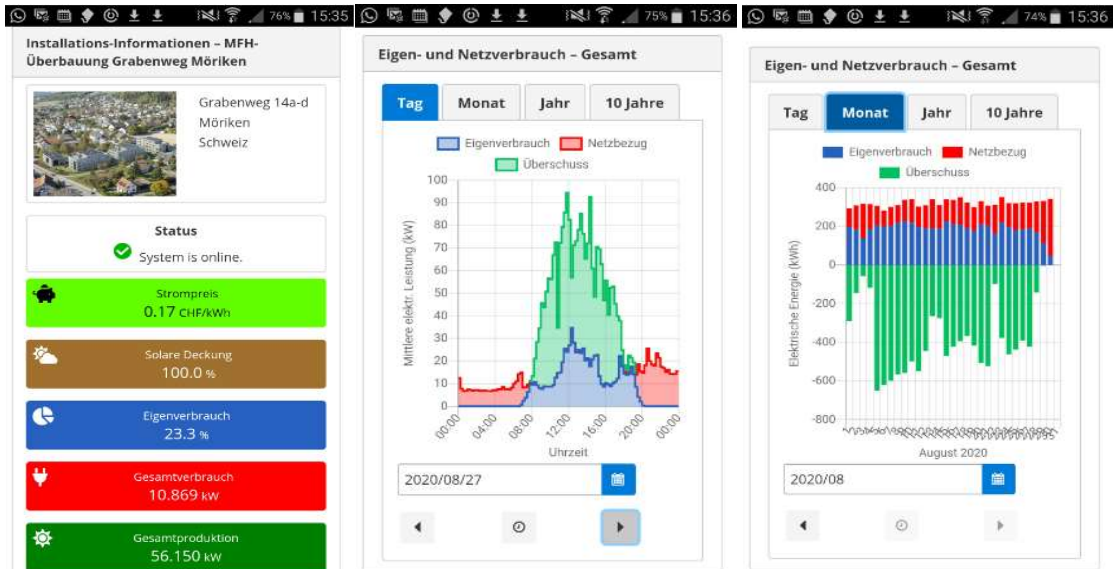


Abbildung 9: Visualisierungen für gesamtes Areal. Links: Einstiegsseite mit Strompreis und Kennzahlen, Mitte: Leistungsverläufe des gesamten Areals, Rechts: tägliche Statistik mit Eigenverbrauch, Netzbezug und Überschuss (Quelle: Smart Energy Control)



Abbildung 10: Industrie-PC mit Eigenverbrauchsmanager-Software zur Steuerung aller Verbraucher in einem Gebäude (Quelle: Smart Energy Control)

Als Wärmeerzeuger dient pro Haus eine Erdsonden-Wärmepumpe der Firma Stiebel Eltron (Abbildung 11 links). Zudem ist in jedem Haus eine kontrollierte Lüftung eingebaut, welche über ein Register mit der Wärmepumpe gekoppelt ist. Pro Gebäude sind je ein Puffer- und Brauchwarmwasser-Speicher eingebaut (Abbildung 12).

Der Heizkreis speist die Fussbodenheizungen in den Wohnungen. Zusätzlich ist ein Wärmetauscher eingebaut, welcher die Wohnungen im Sommer leicht kühlen kann über ein «Natural Cooling». Dazu wird die überschüssige Wärme des Gebäudes über die Erdsonden in den Boden abgegeben. Als Nebeneffekt werden die Sonden leicht generiert. Für das «Natural Cooling» laufen nur ein paar Umwälzpumpen, welche einen vernachlässigbar kleinen Energieverbrauch haben. Deshalb werden diese auch nicht optimiert.



Abbildung 11: Links: Stiebel-Eltron Wärmepumpe für ein Gebäude und kontrollierte Lüftung (Hintergrund), Rechts: Installation der privaten Stromzähler für die einzelnen Wohnungen, Disporäume und Verbraucher (Quelle: Smart Energy Control)



Abbildung 12: Vordergrund: Wärmepumpe mit Heizkreis und Wärmetauscher für «Natural Cooling» über Sonde (eingerahmt), Mitte: Pufferreservoir für Heizung, Hintergrund: Speicher für Brauchwarmwasser (Quelle: Smart Energy Control)



2.1 Gebäudedaten

Im vorliegenden Abschnitt werden die wichtigsten Daten des Gebäudes und der Technik wiedergegeben, welche für das Projekt von Bedeutung sind. Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den Bewohnern, welche zum Start der zweiten Messperiode in den Gebäuden wohnhaft waren. Dabei wird ersichtlich, dass die Personendichte in den untersuchten Häusern 1 bis 3 in einer ähnlichen Grössenordnung lag.

Tabelle 1: Daten zu den Bewohnern

	Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4	Gesamt
# Erwachsene	16	16	18	5	55
# Kinder	0	5	1	0	6
# Personen	16	21	19	6	61
Energiebezugsfläche	1'295	1'312	1'312	465	4'384
Personendichte (# Personen / EBF)	0.012	0.016	0.014	0.013	0.014

Tabelle 2 gibt eine Übersicht zu den Planungswerten. Die Energiebezugsflächen der Häuser 1 bis 3 sind praktisch gleich. Auch der theoretische Heizwärmebedarf ist in Haus 1 nur unwesentlich tiefer. Beim Warmwasserbedarf sind die Werte identisch. Bei der installierten Photovoltaik gibt es gewisse Unterschiede zwischen den Gebäuden. Diese spielen in den Auswertungen jedoch keine Rolle, da für die Berechnung der momentanen Kennzahlen die gesamte Produktion und der gesamte Verbrauch des Areals berücksichtigt wird.

Tabelle 2: Übersicht Parameter und Planungswerte Möriken

		Haus 1	Haus 2	Haus 3	Haus 4	TG / Gartenhaus	gesamt
Informationen							
Energiebezugsfläche	[m2]	1295	1312	1312	465		4384
Bewohner		16	20	19	6		61
Heizwärmebedarf ber.	[kWh/m2]	12.7	13.4	13.4	18.9		
Warmwasserbedarf ber.	[kWh/m2]	20.8	20.8	20.8	20.8		
Gebäudehüllzahl		1.37	1.37	1.37	1.99		
Installierte Photovoltaik	[kWp]	41.25	35.75	39.35	41.3	6.6	164.25

Tabelle 3 zeigt die Dimensionierung der technischen Speicher. Die Speicher wurden vom HLK-Planer etwas überdimensioniert gegenüber den minimalen Empfehlungen gemäss SIA-Normen. Es stellte sich im Projektverlauf jedoch heraus, dass eine Überdimensionierung des Pufferspeichers nicht notwendig gewesen wäre, solange die thermische Energie im Gebäude gespeichert werden kann. Das Gebäude ist der wesentlich grössere und effizientere Speicher, wie diese Projektphase zeigte. Beim Brauchwarmwasserspeicher hat die Überdimensionierung jedoch einen gewissen Vorteil, da dadurch weniger Nachladezyklen notwendig sind. Allerdings müsste der Speicher noch grösser dimensioniert werden, um ein einmaliges Laden tagsüber zu ermöglichen. Dies macht jedoch aus Kostengründen keinen Sinn. Limitierend war hier vielmehr die Grösse des Technikraums.

Tabelle 3: Dimensionierung der Speicher und Wärmepumpen (Faktoren in Klammern: Überdimensionierung gegenüber Standard-Auslegung)

	Häuser 1 bis 3	Haus 4
--	----------------	--------



Inhalt Pufferspeicher	1'500 Liter (Faktor 3)	720 Liter
Inhalt WW-Speicher	2'190 Liter (Faktor 2)	1'000 Liter
Typ WP	Stiebel Eltron WPF 27 Erdsonden, Passivkühlung, tak- tend	Stiebel Eltron WPF 10 cool Erdsonden, Passivkühlung, tak- tend
Heizleistung WP (B0W35)	29.69 kW (Faktor 1.2)	10.31 kW
Elektrische Leistungsaufnahme (B0W35)	6.12 kW	2.05 kW
Leistungszahl, COP (B0W35)	4.85	5.02

Tabelle 4 gibt eine Übersicht zur Bauweise der Häuser 1 bis 3. Alle Häuser sind in derselben Holz-/Mischbauweise ausgeführt. Der einzige kleine Unterschied besteht darin, dass im Haus 1 der Betonanteil etwas geringer ist als in den beiden anderen Häusern. Die Innenwände wurden im Haus 1 aus Holz ausgeführt, während die Aussenwände in allen Häusern aus Holz bestehen. Die Fussböden mit integrierten Fussbodenheizungen sind in allen Gebäuden gleich ausgeführt, mit hoher thermischer Trägheit. Alle Gebäude verfügen auch über ein zentrales Treppenhaus mit Liftschacht aus Beton. Im Verlaufe des Projektes hat sich gezeigt, dass der wesentliche Anteil der Energie in den Fussböden gespeichert wird. Deshalb hatte der leichte Unterschied in der Bauweise keinen wesentlichen Einfluss.

Tabelle 4: Bauweise der Gebäude

	Haus 1	Haus 2	Haus 3
Bauweise	Holzrahmenbauweise	Hybridbauweise	Hybridbauweise
Betonanteil	mittel	hoch	hoch
Bauweise nach SIA ¹⁾	mittel	mittel-schwer	mittel-schwer
Wärmekapazität geschätzt nach SIA ¹⁾	0.08 kWh/m2K	0.10 kWh/m2K	0.10 kWh/m2K
Energiebezugsfläche	1'295 m2	1'312 m2	1'312 m2

1) SIA 380/1 (2016), Abschnitt B.9

In Tabelle 5 wurde eine Abschätzung der theoretischen thermischen Speicherfähigkeit der Gebäude in Kilowattstunden (kWh) gemacht. Dazu wurde die SIA-Norm 380/1 [3] herangezogen, welche flächenbezogene Wärmekapazitäten für typische Bauweisen angibt. Es wurde angenommen, dass es sich um «mittlere» bis «mittelschwere» Bauten handelt (die exakten Definitionen können in der Norm nachgelesen werden). Die Wärmekapazitäten wurden entsprechend gemittelt. Die Speicherfähigkeiten wurden für verschiedene hypothetische Temperaturerhebungen berechnet. Die Speicherfähigkeiten der drei Gebäude befinden sich in einer ähnlichen Grössenordnung, wobei das Haus 1 etwas tiefere Werte aufweist. Die Werte befinden sich im Bereich **100...400 kWh** je nach Temperaturerhebung.

Tabelle 5: Theoretische Speicherfähigkeit der Gebäude nach SIA 380/1

Speicherfähigkeit Gebäude in kWh für verschiedene Temperaturerhebungen (K)			
Wärmekapazität/EBF	0.15 kWh/m2K	"schwer"	
Wärmekapazität/EBF	0.08 kWh/m2K	"mittel"	
Wärmekapazität/EBF	0.03 kWh/m2K	"leicht"	
	Haus 1	Haus 2	Haus 3
Bauweise	"mittel"	"mittel-schwer"	"mittel-schwer"
Wärmekapazität/EBF (kWh/m2K)	0.08	0.10	0.10



Energiebezugsfläche (m ²)		1295	1312	1312
	1	104	131	131
	2	207	262	262
	3	311	394	394

Als Vergleich dazu wurden in Tabelle 6 die theoretischen Speicherfähigkeiten der technischen Speicher (Puffer, Brauchwarmwasser) abgeschätzt. Dazu wurden die effektiv installierten Speicherinhalte berücksichtigt und aufaddiert. Es wurden verschiedene typische Temperaturerhebungen angenommen zur Speicherung der Solarenergie. Die erreichten Werte liegen mit ca. **20..60 kWh** wesentlich tiefer als beim Gebäude als Speicher. Es handelt sich hier um einen **theoretischen Steigerungsfaktor von ca. 5..7**, wenn das Gebäude als Speicher bewirtschaftet wird. Das Projekt zeigt auf, welcher Steigerungsfaktor in der Praxis in real bewohnten Gebäuden und optimaler Regeltechnik erreicht werden kann.

Tabelle 6: Theoretische Speicherfähigkeit der technischen Speicher

Speicherfähigkeit techn. Speicher in kWh für verschiedene Temperaturerhebungen (K)				
Wärmekapazität Wasser		4.19 kJ/kgK		
		Haus 1	Haus 2	Haus 3
Inhalt Puffer (Liter)		1500	1500	1500
Inhalt WW-Speicher (Liter)		2190	2190	2190
Inhalt Gesamt (Liter)		3690	3690	3690
	5	21	21	21
	10	43	43	43
	15	64	64	64

Es ist hier anzumerken, dass die verwendeten Regler kein Modell für das Gebäude oder der technischen Speicher benötigen. Es braucht also keine aufwändige Parametrierung. Obige Angaben wurden nur zu Vergleichszwecken gemacht. Auch die tatsächliche Grösse der technischen Speicher spielt keine wesentliche Rolle für das vorliegende Projekt. Es geht in diesem Projekt nicht um die Dimensionierung der Speicher, sondern um die regelungstechnische Optimierung mit den gegebenen Speichergrössen. Da das Gebäude das weitaus grössere Potential aufweist als die technischen Speicher, sind die Resultate im Wesentlichen von der optimalen Einbindung des Gebäudes abhängig. Die regelungstechnische Einbindung wurde universell gemacht und ist unabhängig von obigen Parametern.

3 Vorgehen und Methode

3.1 Arealnetz mit verteilter Intelligenz

Die Stromversorgung geschieht über ein eigenes Arealnetz mit einem Netzanschlusspunkt (Abbildung 14). Neben dem lokalen Stromnetz ist ein lokales Kommunikationsnetz installiert, welches über LAN (Local Area Network) die vier Häuser und die Tiefgarage miteinander verbindet. Für die Gesamtoptimierung in Projektphase I wurde ein System mit verteilter Intelligenz entwickelt, welches mit einer Steuerung pro Gebäude auskommt. Jede Steuerung bewirtschaftet ein Gebäude mit allen Produzenten und Verbrauchern. Die Wärmepumpen und Haushaltgeräte in den Wohnungen können solaroptimiert betrieben werden. Eine separate Steuerung in der Tiefgarage steuert die Ladestationen nach solarem Überschuss bzw. optimaler Lastverteilung. Die insgesamt 5 Steuerungen kommunizieren untereinander



in Echtzeit. Sie können entweder das gesamte Areal optimieren (was in Projektphase I genutzt wurde) oder einzelne Gebäude mit unterschiedlichen Szenarien fahren (was in der vorliegenden Projektphase II genutzt wurde). Die Stromabrechnung innerhalb des Areals erfolgt im Rahmen eines Zusammenschlusses zum Eigenverbrauch (ZEV) und wurde über dasselbe System vorgenommen.

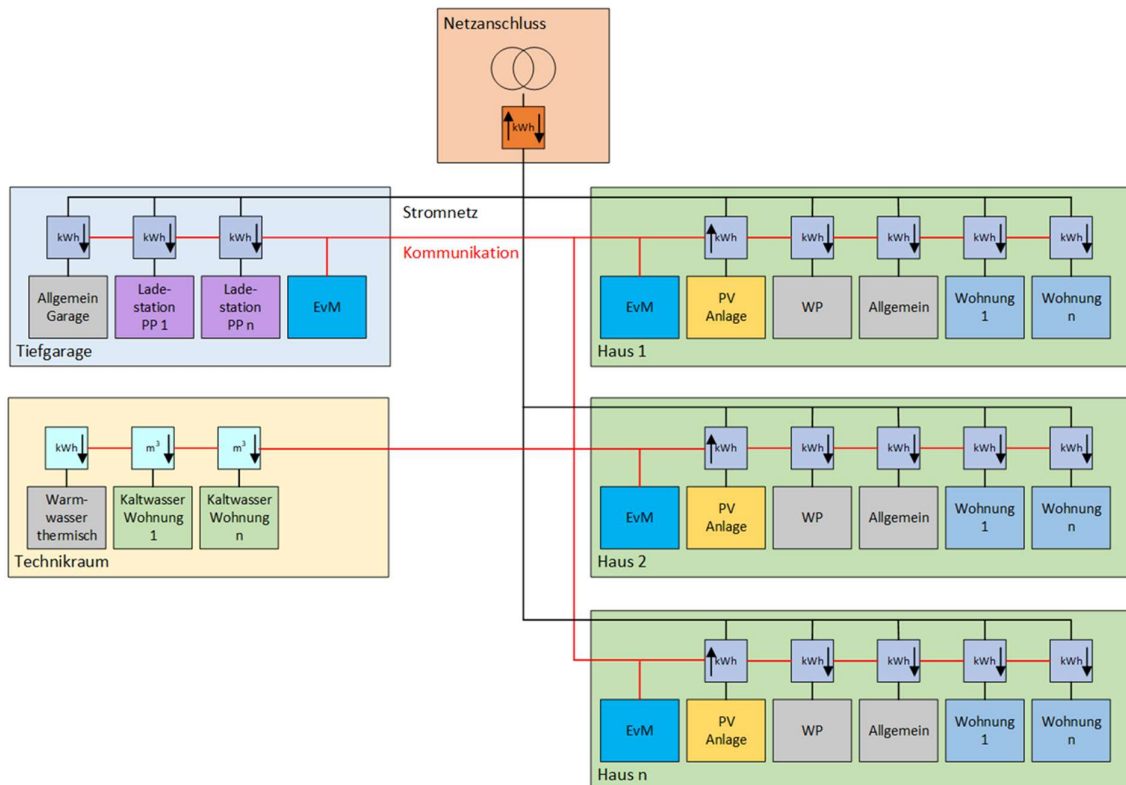


Abbildung 13: Areal-Ver-netzung mit einem Netzan-schlusspunkt und verteilter Intelligenz, EvM = Eigenverbrauchsmanager, WP = Wärmepumpe, PV = Photovoltaik, PP = Parkplatz (Quelle: Smart Energy Control)

3.2 Einbindung Wärmepumpe und Gebäude ins Energiemanagementsystem (EMS)

Die Wärmepumpen von Stiebel-Eltron wurden über das MODBUS-Protokoll in das Energiemanagementsystem (EMS) eingebunden (Abbildung 14). Als EMS wurde der «Eigenverbrauchsmanager» der Firma Smart Energy Engineering eingesetzt, welcher als Prototyp auf die spezifischen Erfordernisse des Pilotprojektes angepasst wurde.

Der Eigenverbrauchsmanager kann die Sollwerte des Brauchwarmwasserspeichers (BWW), Pufferspeichers (SP) sowie des Gebäudes gezielt beeinflussen. Die Sollwerte werden nach oben oder unten gefahren je nach solarer Deckung und Komfortbedarf. Zudem liest der Eigenverbrauchsmanager sämtliche Zustände und Temperaturwerte aus der Wärmepumpe aus und nutzt diese zur Optimierung. Die MODBUS-Schnittstelle dient auch zu Servicezwecken und zur Einstellung der Wärmepumpen über Fernzugriff.

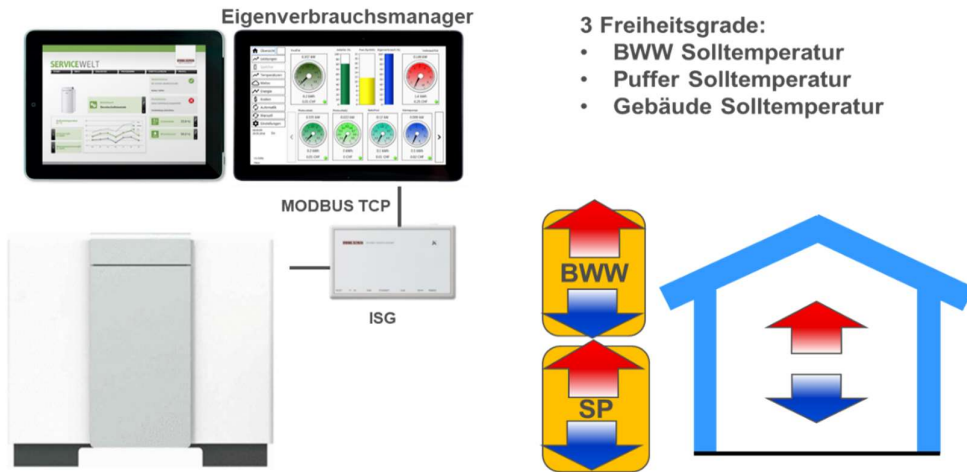


Abbildung 14: Einbindung der Wärmepumpen über MODBUS (Quelle: Smart Energy Engineering)

Neben den Wärmepumpen wurden auch die KNX-Raumbedienstationen in den Eigenverbrauchsmanager eingebunden (Abbildung 15). Dadurch wird pro Wohnung eine Raumtemperatur erfasst und die Sollwerte können vom Eigenverbrauchsmanager beeinflusst werden. Bei genügend solarer Deckung werden diese leicht nach oben gefahren.

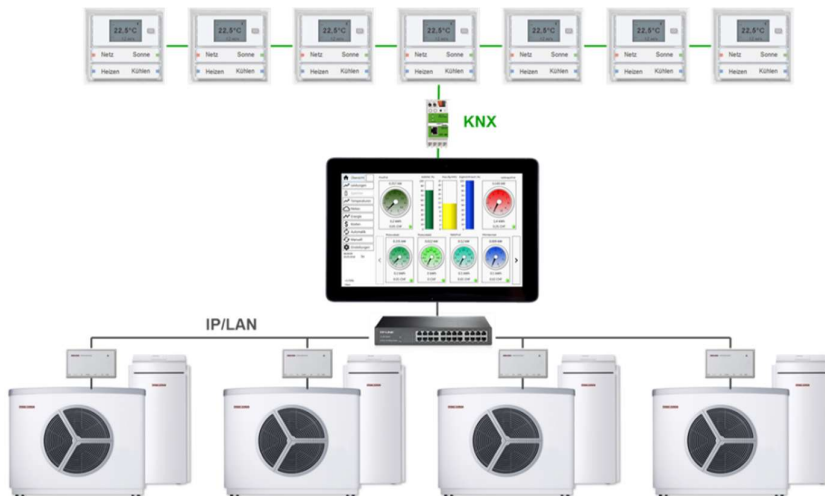


Abbildung 15: Einbindung in das KNX-System (Prinzip-Bild, im realisierten System existiert nur 1 Wärmepumpe pro Gebäude)

3.3 Preisbasierter Optimierungsalgorithmus

Die Optimierung erfolgt nach dem in [1] vorgestellten Preisregler. Dieser basiert auf zwei Preiskurven, welche in Echtzeit aus den Daten berechnet werden (Abbildung 16). Grün ist der Nachfragepreis, abhängig von der mittleren Raumtemperatur im Gebäude. Blau ist der Angebotspreis in Abhängigkeit des Tarifs und des solaren Deckungsgrades. Aus der Differenz zwischen grüner und blauer Kurve wird eine Stellgröße berechnet, welche proportional auf die Solltemperaturen der Wärmepumpe wirkt. Bei positiver Differenz (grün > blau) werden die Solltemperaturen angehoben, bei negativer Differenz (grün < blau) abgesenkt. Der Vorteil dieses Regelkriteriums liegt darin, dass gleichzeitig die lokale Produktion,



der Bedarf des Gebäudes und die tarifliche Situation in der Optimierung berücksichtigt werden. Auch die Wetterprognose kann im Nachfragepreis berücksichtigt werden, was bei einem trägen Gebäude von Vorteil ist. Aktuell wurde im Regler ein Solartarif von 0 Rp/kWh hinterlegt, was in einer Optimierung des Eigenverbrauchs resultiert (Minimalwerte der blauen Kurve bei 100% solarer Deckung liegt bei 0 Rp/kWh).

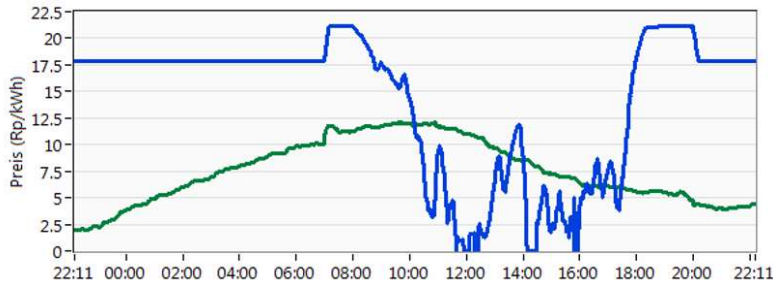


Abbildung 16: Preiskurven an einem Beispiel-Tag (blau Angebotspreis, grün Nachfragepreis)

3.4 Hydraulik-Schema der Wärmepumpen-Installation (allgemein)

Abbildung 17 zeigt das Hydraulik-Schema in allgemeiner Form mit der Anbindung der Wärmepumpe an die Photovoltaik. Für die Eigenverbrauchsoptimierung werden die Temperaturen der Speicher gezielt nach oben und unten gefahren. Hier werden nicht nur der Puffer- und Brauchwarmwasserspeicher bewirtschaftet, sondern auch das Gebäude. Die Pfeile deuten an, wie die Temperaturen angehoben bzw. abgesenkt werden und wie gross die Speicherkapazität ist (Breite). Der Temperaturhub ist bei den technischen Speichern wesentlich grösser als beim Gebäude, die Speicherkapazität ist beim Gebäude jedoch wesentlich grösser. In konventionellen Systemen werden nur die technischen Speicher bewirtschaftet, hier auch das Gebäude. Zudem werden die Temperaturen hier auch abgesenkt, nicht nur angehoben. Dadurch ergibt sich eine «symmetrische» Bewirtschaftung der Speicher, was für die Effizienz der Wärmepumpe von Vorteil ist.

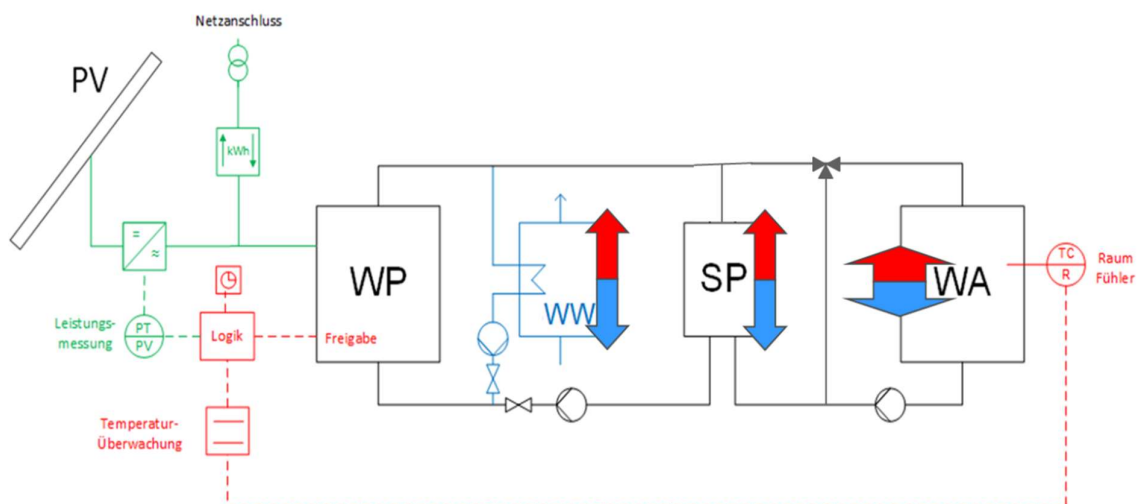


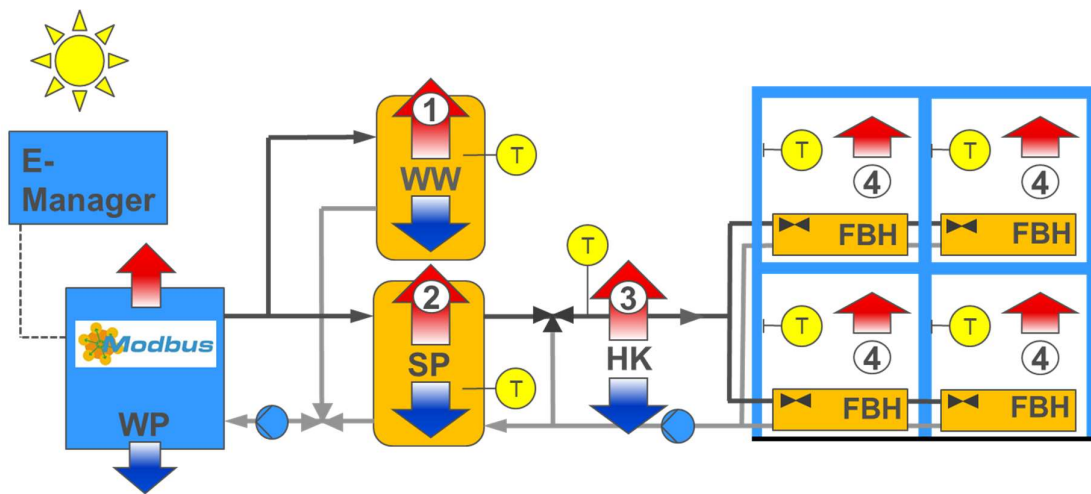
Abbildung 17: Allgemeines Hydraulik-Schema zur Einbindung der Wärmepumpenanlage. WP = Wärmepumpe, WW = Brauchwarmwasserspeicher, SP = Pufferspeicher, WA = Wärmeabgabesystem



Wesentliches Element ist die Temperaturüberwachung. Um bei einer aktiven Bewirtschaftung des Gebäudes den Komfort jederzeit einhalten zu können, ist zwingend eine Überwachung der Raumtemperaturen notwendig. Die mittlere Raumtemperatur wird in der Regel-Logik berücksichtigt. Zudem fließt die aktuelle PV-Produktion ein abzüglich des restlichen Verbrauchs im Gebäude. Bei genügend PV-Überschuss werden die Temperaturen angehoben. Bei genügend PV-Überschuss werden die Temperaturen angehoben.

3.5 Vollständiges Thermomanagement

Um aktiv thermische Energie im Gebäude einspeichern zu können, wurde durch die Firma Smart Energy Engineering das sogenannte «Thermomanagement» entwickelt. Die technische Umsetzung wird in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Für die Erfassung des Gebäudezustands befindet sich in jeder Wohnung mindestens ein Raumfühler. Wichtig anzumerken ist, dass diese Raumfühler in modernen Gebäuden standardmässig vorhanden sind, um die Fussbodenheizungen der Wohnungen lokal zu regeln (sogenannte Thermostate). Als einzige Zusatzanforderung muss eine Datenschnittstelle vorhanden sein, über welche eine Verbindung zum Energiemanagementsystem (EMS) hergestellt werden kann. Deshalb wurden in diesem Projekt Raumbdienstationen mit einem KNX®-Bus installiert. Das EMS liest einerseits die Temperaturen aus und beeinflusst andererseits aktiv die Basis-Sollwerte der Wohnungen. Durch eine leichte Anhebung der Sollwerte (4) werden die lokalen Ventile der Fussbodenheizungen automatisch geöffnet. Damit kann tagsüber bei solarem Überschuss mehr thermische Energie im Gebäude gespeichert werden.



- ① Anhebung/Absenkung Brauchwarmwasser-Sollwert
- ② Anhebung/Absenkung Speicher-Komfortwert
- ③ Anhebung/Absenkung Heizkreis-Komfortwert
- ④ Anhebung Raum-Sollwerte

Abbildung 18: Hydraulik-Schema zur Einbindung der Wärmepumpenanlage in ein Mehrfamilienhaus mit vollständigem Thermomanagement. E-Manager = Energiemanager, WP = Wärmepumpe, WW = Brauchwarmwasserspeicher, SP = Pufferspeicher, HK = Heizkreis, FBH = Fussbodenheizung, 1..4: Freiheitsgrade der Regelung (Pfeile für Anhebung/Absenkung)



Wesentlich ist auch die Anhebung der Vorlauftemperatur (3) bei solarem Überschuss, damit die Energie überhaupt von dem Pufferspeicher ins Gebäude fließen kann. Durch die Anhebung (3) wird das Mischventil entsprechend geöffnet. Die Anhebung des Pufferspeichers (2) ist gleich wie bei «konventionellen» Systemen, allerdings wird hier eine beidseitige Bewirtschaftung mit Absenkung gemacht, um die Effizienz zu erhöhen. Auch der Brauchwarmwasserspeicher (3) wird gezielt bewirtschaftet, jedoch unabhängig vom restlichen System. Bei modernen Inverter-Wärmepumpen könnte mit dem System auch die Drehzahl der Wärmepumpe beeinflusst werden, was hier aber nicht der Fall war (in Möriken sind taktende Wärmepumpen eingebaut).

3.6 Variable Beeinflussung der Heizkurve (Komfortwert)

Abbildung 19 zeigt auf, wie die Temperaturen der Wärmepumpe angehoben bzw. abgesenkt werden. Dabei wird lediglich der Komfortwert beeinflusst, das heisst der Fusspunkt der Heizkurve. Der Sollwert ergibt sich dann aus der Heizkurve und der aktuellen Aussentemperatur. Die Heizkurve wird nicht verändert. Diese muss vorgängig durch den HLK-Techniker optimal aufs Gebäude abgestimmt werden, wie in «konventionellen» Systemen. Bei modernen Gebäuden mit guter Dämmung ist die Heizkurve relativ «flach» (kleine Steigung). Der Sollwert entspricht je nach angesteuertem Heizkreis der Vorlauftemperatur (Gebäudekreis) oder der Rücklauftemperatur (Ladekreis Pufferspeicher).

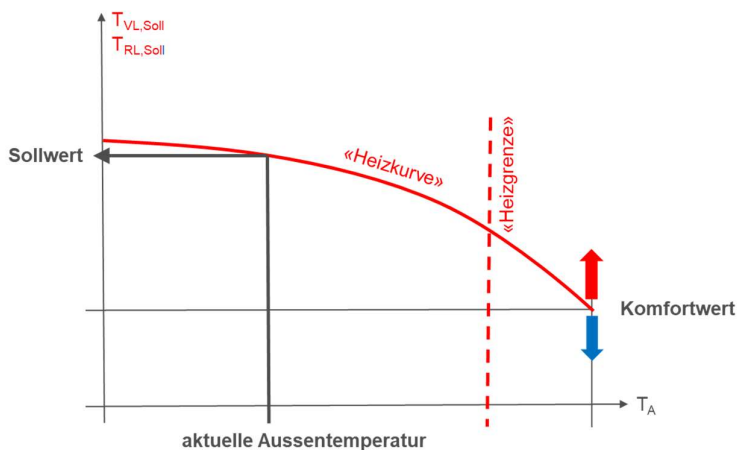


Abbildung 19: Heizkurve mit Schiebung des Komfortwertes. $T_{VL,Soll}$ = Vorlauf-Solltemperatur, $T_{RL,Soll}$ = Rücklauf-Solltemperatur, T_A = Aussentemperatur.

Ohne Schieben des Komfortwertes hätte nur die Aussentemperatur einen Einfluss auf das Verhalten der Wärmepumpe. Damit könnte keine Energie ins Gebäude gespeichert werden. Im Gegenteil, die Wärmepumpe würde bei tiefen Aussentemperaturen nachts vermehrt laufen. Nur dank dem gezielten Anheben des Komfortwertes kann diesem Effekt entgegengewirkt werden. Bei einer «flachen» Heizkurve dominiert dann der Effekt der Komfortanhebung über dem Effekt der Aussentemperatur. Genau dieses Verhalten ist erwünscht.

Aus regelungstechnischer Sicht ist die Aussentemperatur bei modernen Gebäuden mit guter Dämmung nicht mehr die wichtigste Störgrösse. Vielmehr ist dies die passive Sonneneinstrahlung durch die Fenster, welche die Innenraumtemperatur stark beeinflusst (was ja im Winter auch erwünscht ist). Diese Tatsache wird in den vorliegenden Regelalgorithmen berücksichtigt, wie die folgenden Abschnitte zeigen.



3.7 Adaption des Regelbereichs an verschiedene Situationen

Die folgenden Abbildungen zeigen den Regelbereich für die Komforttemperatur für verschiedene Situationen. Beim Auslegungsfall (Abbildung 20) liegt die mittlere Raumtemperatur in der Mitte eines vorgegebenen Raumtemperatur-Bereichs. Als Folge davon wird die Komforttemperatur der Wärmepumpe symmetrisch um den Auslegungswert geregelt. Die Regelung erfolgt aufgrund des Preiskriteriums (kleines Bild). Bei maximalem Angebotspreis (blau) wird auf das Minimum gefahren, bei minimalem Angebotspreis wird auf das Maximum gefahren. Dies bedeutet, dass bei maximaler PV-Produktion auf das Maximum gefahren wird und im Hochtarif bei Netzbezug auf das Minimum. Wichtig ist hier die symmetrische Betriebsweise um den Komfortwert. Dadurch wird die Effizienz der optimal eingestellten Wärmepumpe im Mittel nicht beeinflusst.

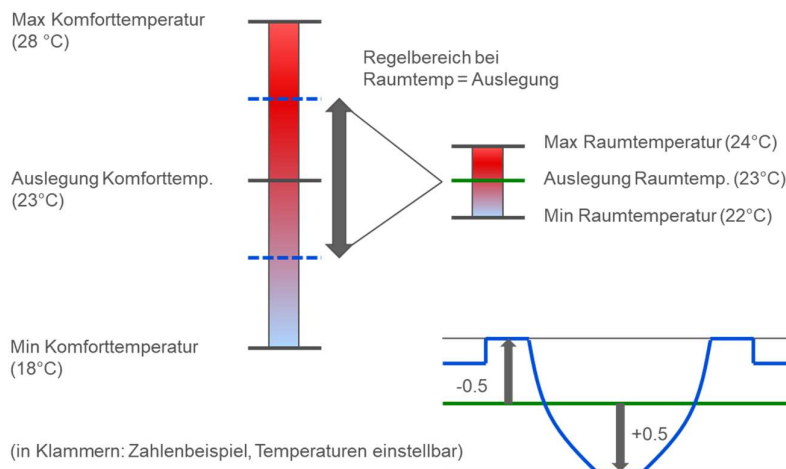


Abbildung 20: Auslegungs-Situation: Mittlere Raumtemperatur, Regelbereich symmetrisch zum Auslegungswert der Komforttemperatur.

Falls sich das Gebäude durch externe Störgrößen stark erwärmt (hier vor allem durch passive Sonneneinstrahlung über die Fenster), liegt der Fall maximaler Raumtemperatur vor (Abbildung 21). Hier liegt die mittlere Raumtemperatur auf dem Maximum des vorgegebenen Raumtemperatur-Bereichs. Als Folge davon wird der Regelbereich der Wärmepumpe nach unten geschoben. Die Komforttemperatur wird dann zwischen dem Komfortminimum und dem Auslegungswert geregelt. Durch die asymmetrische Absenkung kann einer Überhitzung des Gebäudes aktiv entgegengewirkt werden und die Effizienz der Wärmepumpe steigt. Bei maximaler Raumtemperatur liegt der Nachfragepreis (grün) auf dem Minimum (kleines Bild). Deshalb wird hier nur noch auf negative Stellwerte gefahren (Komfort nach unten).

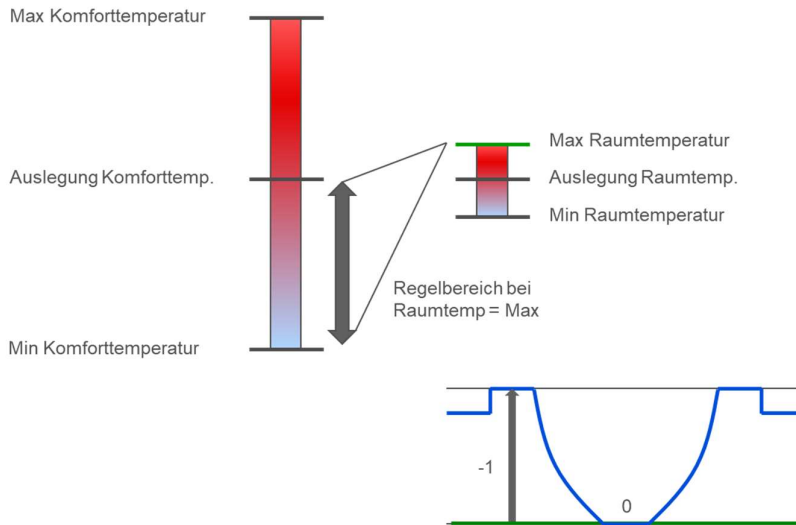


Abbildung 21: Situation «Max-Temperatur»: Maximale Raumtemperatur erreicht, Regelbereich nach unten verschoben zu tiefen Komforttemperaturen.

Falls sich das Gebäude durch externe Störgrößen stark abkühlt (kalte Wintertage, keine Sonne), liegt der Fall minimaler Raumtemperatur vor (Abbildung 22). Hier liegt die mittlere Raumtemperatur auf dem Minimum des vorgegebenen Raumtemperatur-Bereichs. Als Folge davon wird der Regelbereich der Wärmepumpe nach oben geschoben. Die Komforttemperatur wird dann zwischen dem Auslegungswert und dem Komfortmaximum geregelt. Durch die asymmetrische Anhebung kann einer Unterkühlung des Gebäudes aktiv entgegengewirkt werden. Dabei nimmt die Effizienz der Wärmepumpe gegenüber dem Auslegungsfall etwas ab. Diese Betriebsweise ist jedoch wesentlich effizienter als permanent zu hoch eingestellte Heizkurve, wie dies leider in «konventionellen» Installationen oft der Fall ist. Bei minimaler Raumtemperatur liegt der Nachfragepreis (grün) auf dem Maximum (kleines Bild). Deshalb wird hier nur noch auf positive Stellwerte gefahren (Komfort nach oben).

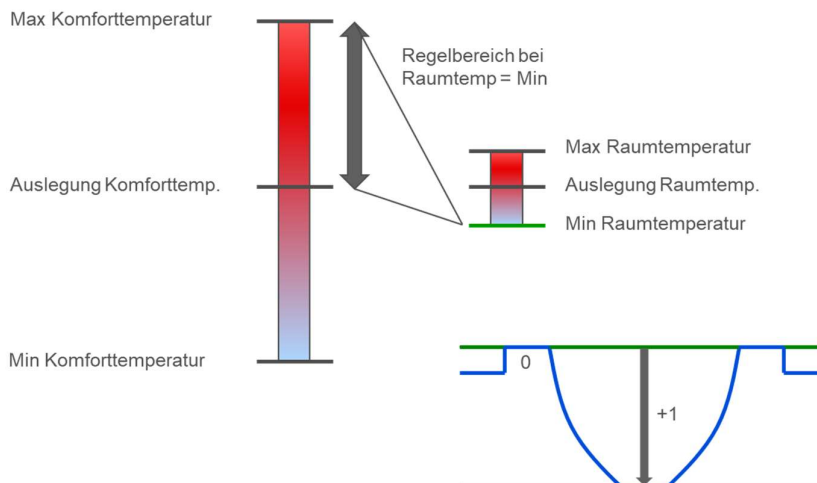


Abbildung 22: Situation «Min-Temperatur»: Minimale Raumtemperatur erreicht, Regelbereich nach oben verschoben zu hohen Komforttemperaturen.



Insgesamt ergibt sich durch die intelligente Beeinflussung der Heizkurve eine Steigerung der Effizienz gegenüber «herkömmlichen» Systemen. Neben der PV-Produktion werden auch externe Störgrößen wie die passive Sonneneinstrahlung optimal berücksichtigt, was bei modernen Gebäuden mit hohem Fensteranteil und guter Dämmung von entscheidender Bedeutung ist.

3.8 Regler-Einstellungen für die zweite Messperiode 2021

Die Gebäudetechnik und Wärmepumpen wurden im Verlaufe des Novembers und Dezembers 2020 nochmals optimal eingestellt und untereinander abgeglichen. So wurden die Heizkurven und der hydraulische Abgleich optimiert. Sämtliche Parameter der Wärmepumpen wurden so eingestellt, dass die Gebäude vergleichbaren Komfort bzw. Raumtemperaturen hatten (max +/- 0.5°C mittlere Temperaturabweichung). Dieser Abgleich wurde unabhängig von der übergeordneten regelungstechnischen Optimierung gemacht.

Anschliessend wurden folgende drei Stufen der Eigenverbrauchsoptimierung aufgeschaltet:

- **Gebäude 1:** Keine Optimierung des Heizens, nur manuelle Optimierung der Warmwasserproduktion mit festem Zeitprogramm über den Tag.
- **Gebäude 2:** Einfache Optimierung des Heizens und der Brauchwarmwasserproduktion über die Überhöhung des Puffer- und Brauchwarmwasserspeichers.
- **Gebäude 3:** Vollständige Optimierung des Heizens über den Einbezug des Gebäudes als thermischer Speicher («Thermo-Management»). Optimierung der Brauchwarmwasserproduktion durch Überhöhung des Brauchwarmwasserspeichers.

Tabelle 7 gibt eine Übersicht zu den Regler-Einstellungen in der ersten Auswerteperiode (Januar bis August). Der angegebene Bereich der mittleren Raumtemperatur dient zur Überwachung. Die Komforttemperaturen der Wärmepumpe sind in «KomfortHK1» für den Heizkreis 1 und «KomfortHK2» für den Heizkreis 2 aufgeteilt. Diese Bezeichnungen werden von Stiebel Eltron verwendet für den Ladekreis des Pufferspeichers (Heizkreis 1) und den Entladekreis ins Gebäude (Heizkreis 2). Die Basis-Soll-Raumtemperatur wurde im vollständig optimierten Gebäude im angegebenen Bereich variiert, in den anderen Gebäuden konstant belassen. Die Bewohner konnten ihre effektiven Sollwerte in den Wohnungen individuell einstellen, relativ zum Basiswert (max. -3K bis + 3K).

Für das Brauchwarmwasser (WW) wurde jeweils ein Eco- und Komfort-Wert eingestellt, welcher nach einem fixen Zeitprogramm umgestellt wurde (im angegebenen Zeitbereich auf Komfort, ausserhalb auf Eco). In Haus 2 und 3 wurde der WW-Komfortwert zudem variiert je nach solarer Produktion. Bereits in der vorangehenden Messphase I wurde festgestellt, dass durch die Abschaltung der WW-Zirkulation nachts ein häufiges Nachladen des WW-Speichers verhindert werden konnte. Deshalb wurde auch in der Messphase II die Zirkulationspumpe nachts über eine einfache Zeitschaltuhr abgeschaltet (der angegebene Zeitraum definiert den eingeschalteten Zustand).

Tabelle 7: Regler-Einstellungen für die zweite Messperiode (vor Rochade, bis August 2022)

	Haus 1	Haus 2	Haus 3
Regler Heizen	Manuell	Speicher Überhöhung	Thermo-Management
Regler WW	Manuell auf Tag	Speicher Überhöhung	Speicher Überhöhung
Mittelwert Raumtemp. ¹⁾	-	22.5..25°C	22..25°C
KomfortHK1 ²⁾	22°C	23.5..30°C	16..22..28°C



KomfortHK2 ³⁾	22°C	23.5°C	16..22..28°C
Basis Soll Raumtemp. ⁴⁾	22°C	22°C	22..24°C
WW Eco	50°C	-	-
WW Komfort	60°C	50..60°C	50..60°C
WW Zeitprogramm	11:00..16:00 Uhr	08:00..18:00 Uhr	08:00..18:00 Uhr
Zirkulation Zeitprogramm	05:00-22:00 Uhr	05:00-22:00 Uhr	05:00-22:00 Uhr
Legionellenvorbeugung (60 °C)	11:00-16:00 Uhr täglich	12:00..16:00 nur So	13:00..16:00 Uhr täglich
SIA-Norm 385/1	neu	alt	neu

¹⁾ Bereich für die Überwachung der mittleren Raumtemperatur. Untere Grenze...obere Grenze.

²⁾ Komfort-Vorgabe für den Heizkreis 1 (Ladekreis), Fusspunkt der Heizkurve, justiert für gleichen Komfort in allen Gebäuden. Abgesenkt...Standard...erhöhter Wert.

³⁾ Komfort-Vorgabe für den Heizkreis 2 (Entladekreis), siehe oben.

⁴⁾ Basis-Vorgabe für die Solltemperaturen in den Wohnungen. Konstant (ein Wert) bzw. Bereich untere Grenze...obere Grenze. Die Bewohner können einen zusätzlichen Offset (+/- 3°C) vorgeben.

Tabelle 8 gibt eine Übersicht zu den Regler-Einstellungen in der zweiten Auswerteperiode (Oktober bis Dezember). Dabei wurden die Regler zwischen den Gebäuden ausgetauscht («Regler-Rochade»), um allfällige systematische Fehler auszuschliessen. Im September wurden die Gebäude neu abgeglichen, um wieder ähnliche Verhältnisse zu haben.

Tabelle 8: Regler-Einstellungen für die zweite Messperiode (nach Rochade, ab Oktober 2022)

	Haus 1	Haus 2	Haus 3
Regler Heizen	Thermo-Management	Keine Optimierung	Speicher-Überhöhung
Regler WW	Speicher Überhöhung	Manuell auf Tag	Speicher Überhöhung
Mittelwert Raumtemp. ¹⁾	22..25°C	-	22..25°C
KomfortHK1 ²⁾	16..22..28°C	23.5°C	21..30°C
KomfortHK2 ³⁾	16..22..28°C	23.5°C	21°C
Basis Soll Raumtemp. ⁴⁾	22/23..24°C	22/23°C	22/23°C
WW Eco	-	50°C	-
WW Komfort	50..60°C	60°C	50..60°C
WW Zeitprogramm	13:00..17:00 Uhr	12:00..16:00 Uhr	12:30..17:00 Uhr
Zirkulation Zeitprogramm	05:00-22:00 Uhr	05:00-22:00 Uhr	05:00-22:00 Uhr
Legionellenvorbeugung (60 °C)	14:00-16:00 Uhr täglich	12:00..16:00 Uhr täglich	14:30..16:30 Uhr nur So
SIA-Norm 385/1	neu	neu	alt

⁴⁾ Ab Dezember 2021 wurden sämtliche Basis-Soll-Raumtemperaturen-Minima von 22 auf 23°C erhöht (auf Wunsch einzelner Bewohner) und ein neuer Abgleich der Wärmepumpen vorgenommen

Ein wichtiges Thema betrifft die Hygiene des Trinkwassers. Die Anforderungen wurden in den neuen SIA-Trinkwassernormen 385/1 und 385/2 erheblich verschärft. Obwohl für die Gebäude aufgrund des



Zeitpunktes der Inbetriebnahme noch die alten Normen gelten, wurden hier in den untersuchten Gebäuden 1 und 3 bereits die neuen Normen berücksichtigt. Dabei müsste eine konstante Temperatur von 55°C gefahren werden, um eine Legionellenbildung vollständig zu verhindern. Mit einer konstanten Temperatur könnte jedoch keine Eigenverbrauchsoptimierung vorgenommen werden. Es musste also ein Kompromiss gefahren werden. Dazu wurde der Minimalwert auf 50°C gesetzt, während täglich eine garantierte einmalige Erhöhung der Temperatur auf 60°C stattfand. Diese Überhöhung wurde auch bei geringer solarer Deckung durchgeführt, aber nur in einem beschränkten Zeitraum (unter «Legionellenvorbeugung» angegeben). Die vorliegenden Wärmepumpen konnten 60°C im Speicher problemlos erreichen. Es waren also keine Elektroinsätze notwendig. Diese wurden aus Effizienzgründen komplett deaktiviert.



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Beispieltage

Folgend wird anhand eines Beispieltags die Wirkung der verschiedenen Optimierungsalgorithmen verglichen. Es handelt sich dabei um einen typischen sonnigen, aber kalten Tag im März 2021.

Der Verlauf der Gesamtproduktion und des Gesamtverbrauchs des Areals mit vier Gebäuden ist in Abbildung 23 dargestellt. Die Gesamtproduktion enthält die Produktion aller verteilten PV-Anlagen auf den Dächern und Fassaden. Der Gesamtverbrauch enthält neben den Wärmepumpen auch den Haushaltstrom der Wohnungen, den Allgemeinstrom und die Elektromobil-Ladestationen.

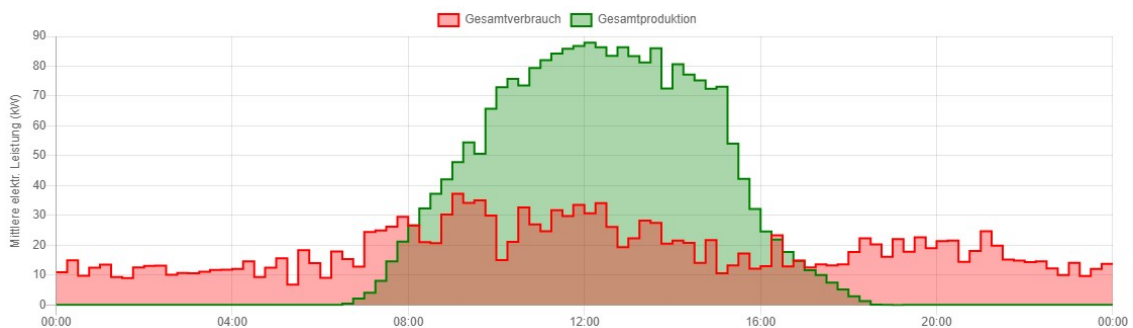


Abbildung 23: Gesamtproduktion und -Verbrauch des Areals am 23.3.2021

In obiger Darstellung sind alle Verbraucher «verschmiert», weshalb keine detaillierten Aussagen gemacht werden können zur Optimierung der einzelnen Verbraucher. Interessanter sind deshalb die folgenden Bilder, in welchen die drei Optimierungsalgorithmen für die Wärmepumpen in den Gebäuden 1 bis 3 verglichen werden.

Abbildung 24 zeigt die Situation ohne automatische Optimierung. Im Temperaturverlauf (Diagramm oben) wird sofort ersichtlich, dass der Sollwert für das Brauchwarmwasser (rot) mit einem festen Zeitprogramm von 11:00 bis 16:00 Uhr auf 60°C erhöht wurde, ausserhalb auf 50°C (aus Komfortgründen wurde auf eine vollständige Absenkung verzichtet). Das Einschalten der Zirkulation um 05:00 Uhr ist ebenfalls erkennbar (Abfall der Speichertemperatur). Das Brauchwarmwasser musste an diesem Tag zwei Mal nachgeladen werden, was auch in den Leistungsverläufen sichtbar ist (Diagramm Mitte, hellblaue Sequenzen), wobei ein grosser Anteil solar gedeckt werden konnte (Diagramm unten, blaue Anteile). Für das Heizen ist nun die Temperatur des Pufferspeichers relevant (okker). Die Heizzyklen der Wärmepumpe sind deutlich erkennbar, auch in den Leistungsverläufen (Diagramm Mitte, dunkelblaue Sequenzen). Hier sind die Taktungen der Wärmepumpe über den ganzen Tag hinweg verteilt, es findet keine Optimierung statt. Einzig am Nachmittag ist eine leichte Reduktion der Taktungen erkennbar. Der Netzbezug ist erheblich (Diagramm unten, roter Anteil). Die vorgegebenen Komforttemperaturen (schwarz) lagen ganztags bei konstant 22°C. Ein leichter Einfluss der Heizkurve ist in der Vorlauftemperatur (grün) erkennbar, in Abhängigkeit der Aussentemperatur (blau). Leider ist diese gegenläufig zur PV-Produktion, was der grosse Nachteil ist bei nicht optimierten Systemen. Die mittlere Raumtemperatur des Gebäudes 1 lag am Morgen um 08:00 Uhr bei 22.7°C und am Abend um 20:00 Uhr bei 23.5°C. Die leichte Erhöhung der Raumtemperatur ist auf die passive Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

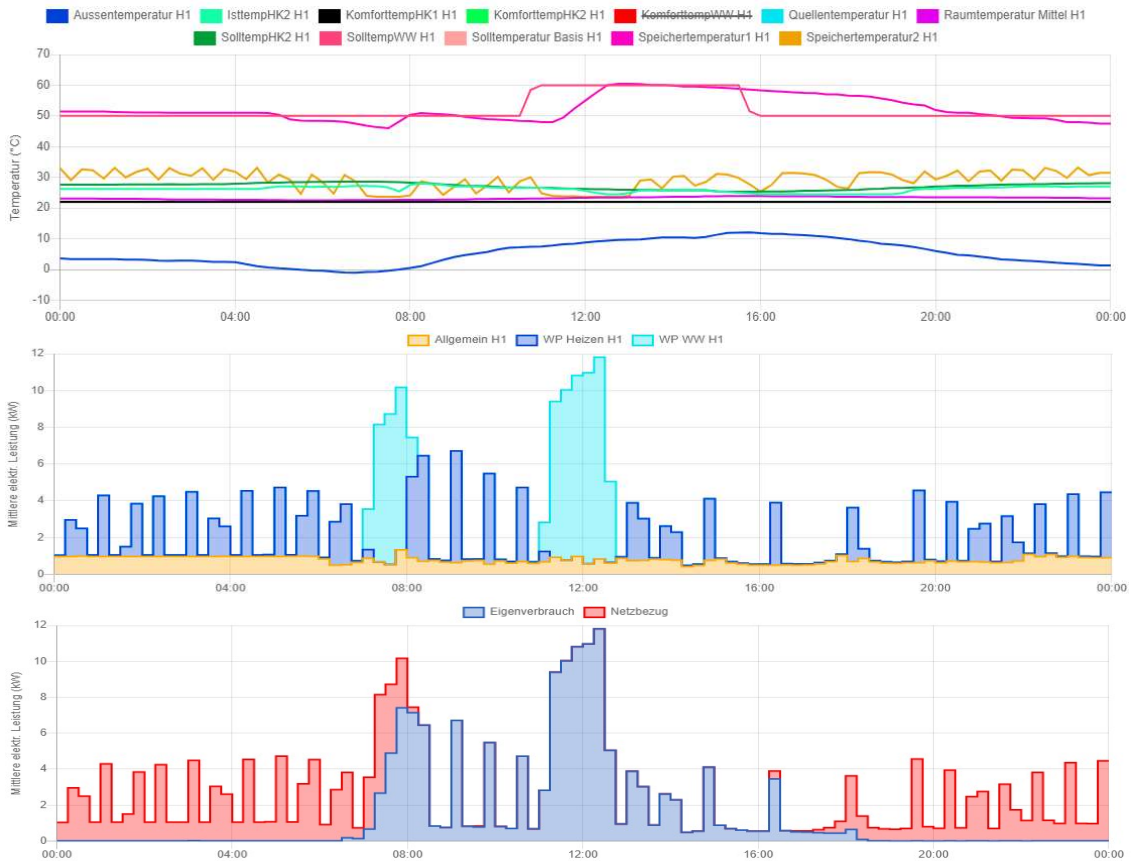


Abbildung 24: Temperatur- und Leistungsverläufe Wärmepumpe Gebäude 1 am 23.3.2021 (keine automatische Optimierung)

Abbildung 25 zeigt die Situation mit einfacher Optimierung, also nur Überhöhung der Speichertemperaturen. Im Temperaturverlauf wird sofort ersichtlich, dass der Sollwert für das Brauchwarmwasser im Zeitbereich 08:00 bis 18:00 Uhr optimiert wurde. An diesem Tag führte dies zu beinahe konstant 60°C im optimierten Bereich aufgrund der hohen PV-Produktion (rote Kurve). Auch hier wurde das Brauchwarmwasser mehrmals nachgeladen, was in den Leistungsverläufen sichtbar ist, wobei ein relativ grosser Anteil solar gedeckt werden konnte. Im Gegensatz zur Situation ohne Optimierung ist hier eine deutliche Erhöhung der Temperatur im Pufferspeicher erkennbar (ocker, max. 40°C). Diese resultiert aus der Anhebung der Komforttemperatur bei solarer Produktion bis auf 30°C (schwarz). Die Heizzyklen der Wärmepumpe verschieben sich demnach (Diagramm Mitte, dunkelblau). Unmittelbar nach der WW-Produktion um 11:00 Uhr ist eine längere Aufheizphase des Pufferspeichers erkennbar. Auf dem hohen Niveau finden noch ein paar Nachladungen statt, während abends wieder auf ein tieferes Niveau abgesenkt wird. Der Pufferspeicher reicht offensichtlich nur für ein paar Stunden und abends muss wieder nachgeladen werden, was in weiteren Taktungen mit Netzbezug resultiert (Diagramm unten, roter Anteil). Dies ist auch deutlich an den Taktungen morgens erkennbar, welche aufgrund des Vortags entstanden sind. Die Taktungen der Wärmepumpe konnten also über den Tag hinweg optimiert werden, allerdings ist der Effekt beschränkt. Abends konnte der Netzbezug etwas reduziert werden. Die vorgegebene Komforttemperatur für den Vorlauf ins Gebäude lag ganztags auf einem konstanten Wert. Auch hier bewirkt die Heizkurve ein gegenläufiges Verhalten der Vorlauftemperatur (grün) zur PV-Produktion, was dazu führt, dass keine Energie im Gebäude gespeichert werden kann. Die mittlere Raumtemperatur



des Gebäudes 2 lag am Morgen um 08:00 Uhr bei 22.4°C und am Abend um 20:00 Uhr bei 23.1°C. Die leichte Erhöhung der Raumtemperatur ist nur auf die passive Sonneneinstrahlung zurückzuführen.

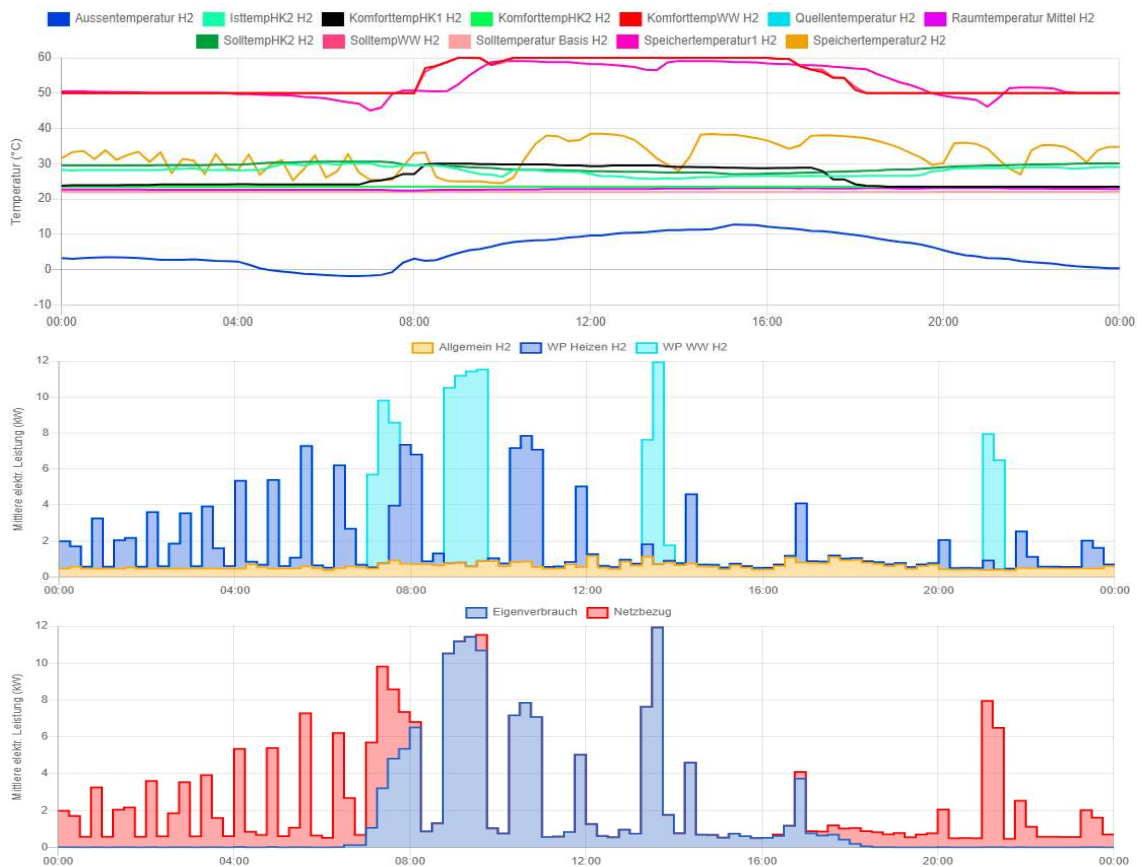


Abbildung 25: Temperatur- und Leistungsverläufe Wärmepumpe Gebäude 2 am 23.3.2021 (einfache Optimierung mit Speicherüberhöhung)

Abbildung 26 zeigt die Situation mit vollständiger Optimierung, also mit dem Gebäude als thermischen Speicher. Im Gegensatz zur einfachen Optimierung wird hier die Temperatur im Pufferspeicher deutlich weniger erhöht (ocker, max 30°C). Auch die Komforttemperatur (schwarz) hat einen deutlich anderen Verlauf. Sie wird nämlich tagsüber leicht erhöht und nachts leicht abgesenkt. Dies führt im Mittel zu einem unveränderten Temperaturniveau für die Wärmepumpe, was die Effizienz beibehält. Die Heizzyklen der Wärmepumpe verschieben sich aufgrund der Massnahme stark zu Gunsten des Eigenverbrauchs. Offensichtlich reicht das Gebäude als Speicher über den ganzen Abend und bis weit in die Morgenstunden. Die Wärmepumpe hat in diesem Bereich keine Taktungen mehr. Der Netzbezug konnte insgesamt stark reduziert werden (Diagramm unten, roter Anteil). Die Komforttemperatur für den Vorlauf ins Gebäude wurde ganztags in gleicher Masse variiert wie die Komforttemperatur für den Pufferspeicher (schwarz). Dies führte bei gleichbleibender Heizkurve zu einem mittläufigen Verhalten der Vorlauf-temperatur (grün) zur PV-Produktion, was dazu führt, dass effektiv Energie im Gebäude gespeichert werden kann. Die mittlere Raumtemperatur des Gebäudes 3 lag am Morgen um 08:00 Uhr bei 23.2°C und am Abend um 20:00 Uhr bei 24.1°C. Die Erhöhung der Raumtemperatur lag damit unter 1°C, war also im Vergleich zur Erhöhung aufgrund der passiven Sonneneinstrahlung kaum spürbar für die Be-



wohner. Im Gegenteil, eine etwas erhöhte Raumtemperatur abends wurde von den Bewohnern als angenehm und natürlich eingestuft. Es kam auch zu keiner Reaktion von geöffneten Fenstern, was in den individuellen Raumtemperaturen der einzelnen Wohnungen überprüft werden konnte (hier nicht gezeigt). Es ist also festzustellen, dass die Einspeicherung von Energie in der Gebäudemasse für den Benutzer zu keinerlei Komfortverlust führt, eher schon zu einer Komforterhöhung im natürlichen Tagesverlauf. Es ist auch nur ein kleiner Teil der Energiespeicherung direkt in der Raumtemperatur spürbar, ein grösserer Teil wird in der Gebäudemasse inkl. Fussbodenheizung und Beton gespeichert. Obwohl die Vorlauftemperaturen nur marginal angehoben wurden (an diesem Tag von 27 auf 32°C), konnte doch eine erhebliche Menge an Energie im Gebäude gespeichert werden aufgrund der hohen Wärmekapazität des Gebäudes. Selbstverständlich wurden über das ganze Jahr die Einsatzgrenzen der Fussbodenheizung beachtet (im Jahr 2021 lag die Vorlauftemperatur immer unter 35°C, auch in den kalten Februar-Tagen).

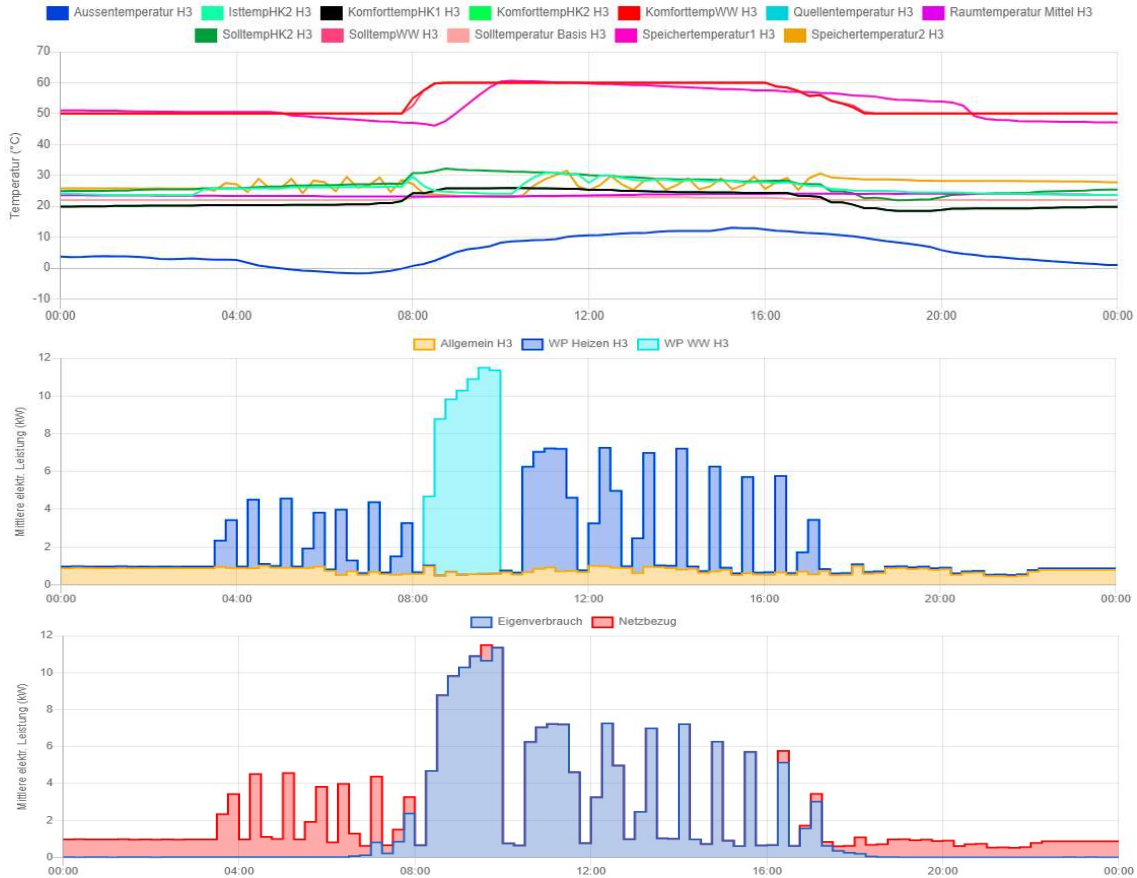


Abbildung 26: Temperatur- und Leistungsverläufe Wärmepumpe Gebäude 3 am 23.3.2021 (vollständige Optimierung mit Gebäude als thermischer Speicher)

Abbildung 27 zeigt die Situation mit vollständiger Optimierung an einem wärmeren Tag mit etwas höherer Aussentemperatur in den Morgenstunden. An diesem Tag fallen die Taktungen der Wärmepumpe am morgen früh ganz weg und die solare Deckung erreicht ihr Maximum.

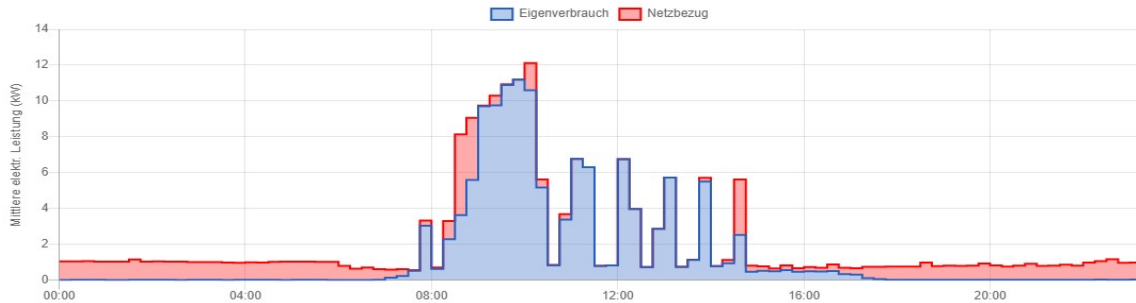


Abbildung 27: Leistungsverläufe Wärmepumpe Gebäude 3 am 13.3.2021 (vollständige Optimierung mit Gebäude als thermischer Speicher, höhere Aussentemperaturen)

4.2 Auswertung einzelner Monate

Folgend wird eine erste statistische Auswertung der Messdaten für den gesamten Monat März gezeigt. Abbildung 28 zeigt die erreichten solaren Deckungsgrade für die Wärmepumpen. Für den aktuellen Vergleich sind nur die Gebäude 1 bis 3 mit gleicher Bauart und Grösse relevant. Beim Brauchwarmwasser waren keine grossen Unterschiede erkennbar (rote Balken). Dort spielte die Optimierungsmethode offensichtlich keine grosse Rolle. Es reichte im Prinzip, tagsüber ein erhöhtes Programm zu fahren mit mehr oder weniger festen Zeiten.

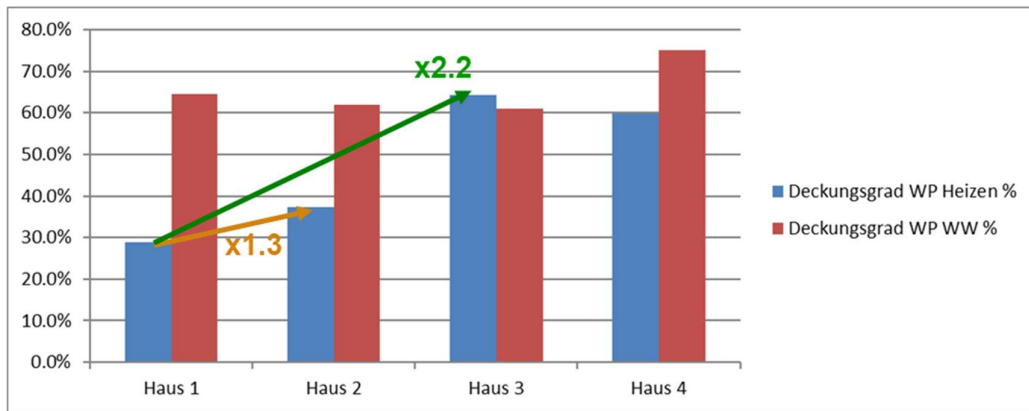


Abbildung 28: Solare Deckungsgrade der Wärmepumpen für Heizen und Brauchwarmwasser (WW) im Monat März für die vier Gebäude

Interessanter ist jedoch der Vergleich der solaren Deckungsgrade für das Heizen (blaue Balken). Hier sind markante Unterschiede erkennbar. Der Fall ohne Optimierung (Haus 1) kam auf einen natürlichen Deckungsgrad von ca. 30%. Dieser ist abhängig von der Grösse der PV-Anlage, der Leistung der Wärmepumpe und der Dämmung des Gebäudes. Mit einer einfachen Optimierung (nur Speicherüberhöhung) war eine Steigerung auf knapp 40% möglich (also ca. Faktor 1.3). Mit einer vollständigen Optimierung unter Einbezug des Gebäudes als thermische Masse war eine Steigerung auf über 60% möglich (also mehr als Faktor 2). Die Steigerung von einfacher zu vollständiger Optimierung lag immerhin bei einem Faktor von 1.7. Es kann also festgehalten werden, dass durch Berücksichtigung des Gebäudes als thermischer Speicher 1.7-mal mehr Energie gespeichert werden konnte als bei ausschliesslicher



Bewirtschaftung des Pufferspeichers. Dabei ist zu beachten, dass der Pufferspeicher in den betrachteten Gebäuden bereits um den Faktor 3 überdimensioniert wurde. Bei einer Standardauslegung für MFH wäre das Optimierungspotential also noch wesentlich grösser.

Abbildung 29 zeigt die erreichten Arbeitszahlen für die vier Gebäude. Auch hier ist nur der Vergleich der ersten drei Gebäude relevant. Die Arbeitszahlen für die Warmwasserproduktion ist aufgrund gleicher Temperaturniveaus ähnlich (rote Balken). Einzig kann hier festgehalten werden, dass die tägliche Legionellen-Vorbeugung mit Solarstrom zu keiner messbaren Verschlechterung der Arbeitszahlen führte (Haus 1 und 3). Es wurde vollständig auf Elektroinsätze verzichtet.

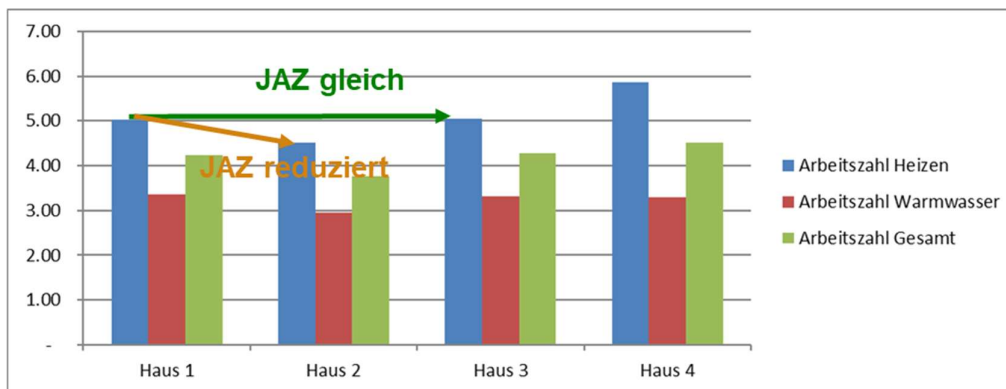


Abbildung 29: Arbeitszahlen der Wärmepumpen für Heizen, Brauchwarmwasser (WW) und gesamt im Monat **März** für die vier Gebäude

Interessant ist nun die Auswertung der Arbeitszahlen für das Heizen (blaue Balken). Die grundsätzlich hohe Arbeitszahl von 5 ist auf die hohe Effizienz der eingesetzten Sole/Wasser-Wärmepumpen von Stiebel Eltron sowie die optimale Einstellung zurückzuführen (Haus 1). Auffällig ist hier, dass bei der einfachen Optimierung mit Speicherüberhöhung ein Abfall der Arbeitszahl auf 4.5 resultiert, was immerhin einer Reduktion der Effizienz um 10% entspricht (Haus 2). Dies ist eindeutig auf die erhöhten Temperaturen im Pufferspeicher bei Solarproduktion zurückzuführen (siehe vorheriger Abschnitt). Im Gegensatz dazu ist bei der vollständigen Optimierung über die Gebäudemasse keine Reduktion der Arbeitszahl ersichtlich. Dies ist auf die intelligente Regelung mit kleinem Temperaturhub und symmetrischer Anhebung sowie Absenkung zurückzuführen (siehe Ausführungen im vorherigen Abschnitt). Dabei wird gezielt die hohe Wärmekapazität des Gebäudes genutzt.

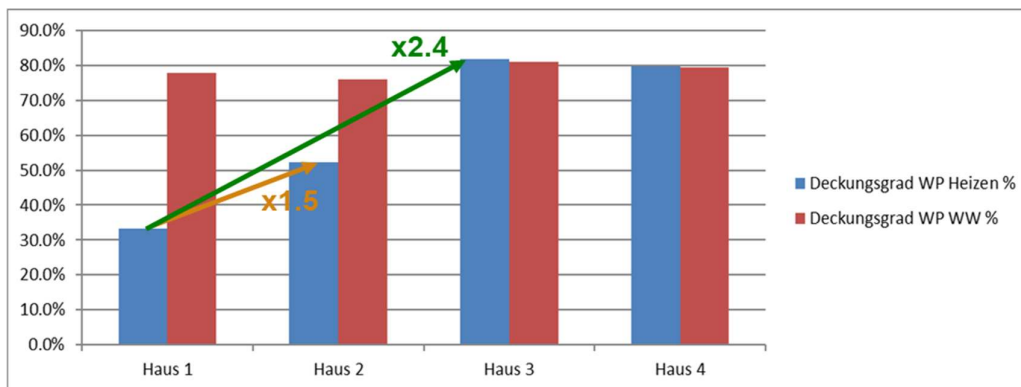


Abbildung 30: Solare Deckungsgrade der Wärmepumpen für Heizen und Brauchwarmwasser (WW) im Monat **April** für die vier Gebäude

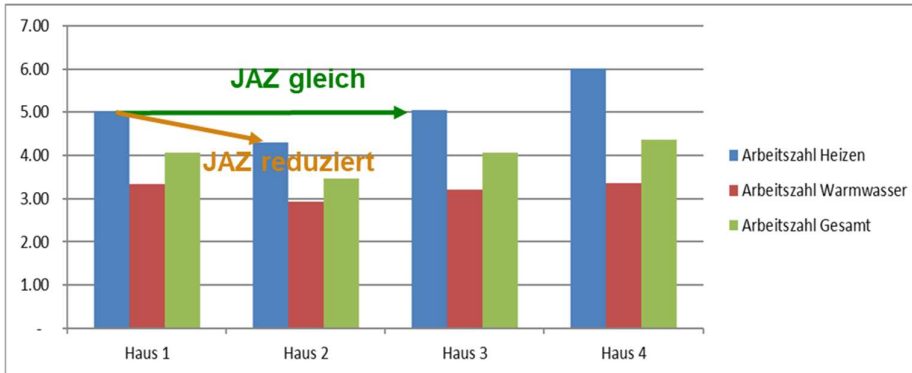


Abbildung 31: Arbeitszahlen der Wärmepumpen für Heizen, Brauchwarmwasser (WW) und gesamt im Monat **April** für die vier Gebäude

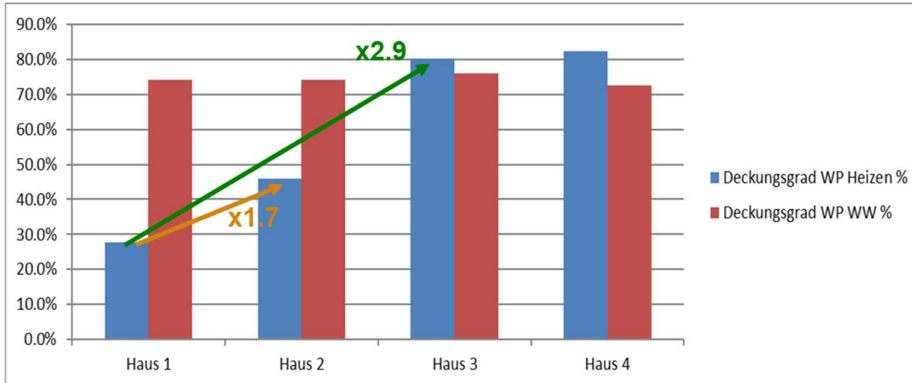


Abbildung 32: Solare Deckungsgrade der Wärmepumpen für Heizen und Brauchwarmwasser (WW) im Monat **Mai** für die vier Gebäude

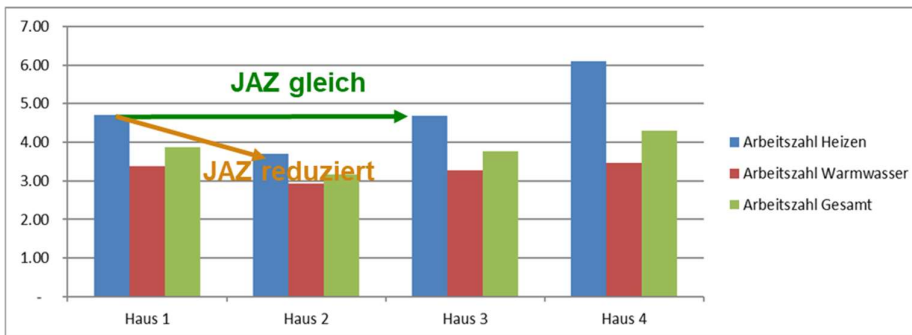


Abbildung 33: Arbeitszahlen der Wärmepumpen für Heizen, Brauchwarmwasser (WW) und gesamt im Monat **Mai** für die vier Gebäude

4.3 Beurteilung des Komforts

Der Komfort wird durch die Auswertung der Schwankungsbreite der Raumtemperaturen beurteilt. Die Resultate mit Thermomanagement sind in den folgenden Abbildungen aufgezeigt. Abbildung 34 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Raumtemperatur für einen sonnigen Frühlingstag. In der violetten Kurve wird sofort ersichtlich, dass die Schwankungsbreite mit ca. 1K sehr klein ist. Die Temperatur wird über Nacht leicht abgesenkt und tagsüber leicht erhöht. Abends sind die Wohnugen angenehm warm. Dieser Verlauf kommt dem natürlichen Empfinden des Menschen entgegen. Interessant ist die



Phasenverschiebung von ca. 6-8 Stunden, mit welcher das Gebäude auf den Wärmeeintrag reagiert. Diese ist durch die natürliche Trägheit gegeben. Dadurch wirkt mittags nur die passive Sonneneinstrahlung auf die Wohnzimmer, und die Fussbodenheizung ist noch auf relativ tiefer Temperatur. Dies reduziert das «Hitzegefühl» der Bewohner und verhindert ein Öffnen der Fenster. Erst am Abend wirkt die gespeicherte Wärme der Fussbodenheizung auf die Wohnzimmertemperatur und führt zu dem erwähnten angenehmen Gefühl. In derselben Abbildung ist auch die leichte Anhebung der Basis-Solltemperatur ersichtlich (hell-pinke Kurve). Diese ist notwendig, damit die Thermostaten öffnen. Man sieht hier, dass eine leichte Reduktion gegen Abend stattfindet. Der Istwert (violett) liegt durchwegs höher als der Basis-Sollwert. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Bewohner bei ihren Raumbediengeräten positive Offsets eingegeben haben (+ Einstellungen). Daraus resultiert auch der relativ hohe Mittelwert von ca. 24 °C.

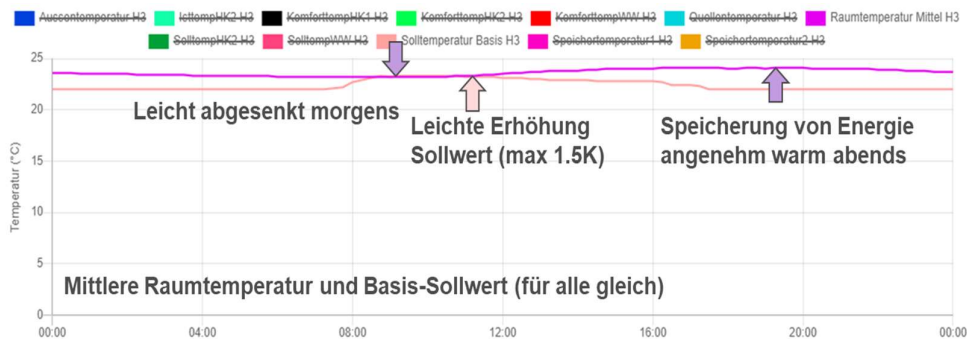


Abbildung 34: Schwankungen der mittleren Raumtemperatur für Haus 3 am 23.3.2021 (vollständiges Thermomanagement)

Abbildung 35 zeigt die Schwankungen einer zufällig ausgewählten Raumtemperatur in einer Wohnung am selben Tag. Auch hier ist die kleine Schwankungsbreite von nur 1K sichtbar. Es wird hier auch klar, dass der zusätzliche «Überhitzungsschutz» in der Regelung funktioniert. Dieser reduziert die Wärmepumpe, wenn die mittlere Raumtemperatur des Gebäudes zunimmt (siehe Kapitel 3.7).

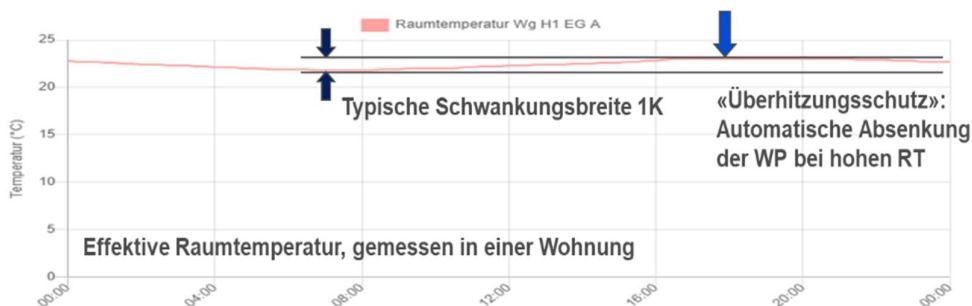


Abbildung 35: Schwankungen einer einzelnen Raumtemperatur, EG Haus 3 am 23.3.2021 (vollständiges Thermomanagement)

Abbildung 36 zeigt eine statistische Auswertung der Raumtemperaturschwankungen für den Monat März. Es werden die minimalen und maximalen täglichen Schwankungen, sowie deren Mittelwerte und Standardabweichungen dargestellt. Für das Haus 3 mit Thermomanagement (grün) wurden die tiefsten Temperaturschwankungen festgestellt. Dies ist auf das aktive Eingreifen des Reglers zurückzuführen.

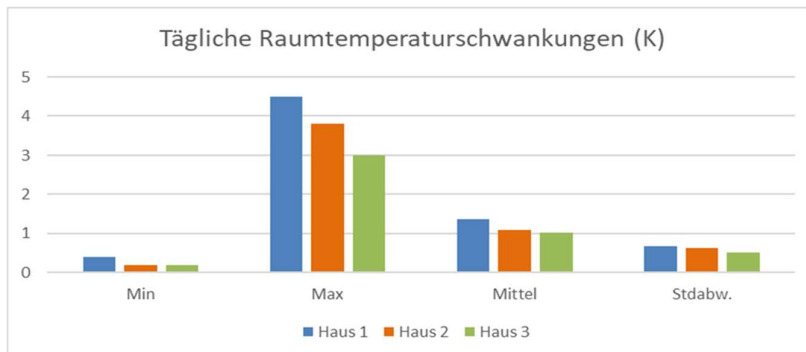


Abbildung 36: Raumtemperaturschwankungen im Monat März für Haus 1 (keine Optimierung), Haus 2 (nur Speicherüberhöhung), Haus 3 (vollständiges Thermomanagement)

Insgesamt kann also gesagt werden, dass die Kombination aus der Trägheit des Gebäudes und aktivem Überhitzungsschutz der Regelung eine Überhitzung des Gebäudes ausschliesst, auch an sonnigen Frühlingstagen. An nebligen Wintertagen sind die Schwankungsbreiten noch wesentlich kleiner. Hier wird nur die Heizsaison betrachtet. Die Temperaturen im Sommer spielen hier keine Rolle. Durch Beobachtung der Temperaturverläufe konnten auch Rückschlüsse auf das Lüftungsverhalten festgestellt werden. Während der Heizsaison konnte kein Öffnen der Fenster wegen allfälliger Überhitzung festgestellt werden.

Anders sieht die Situation im Sommer aus, welche hier regelungstechnisch nicht beeinflusst werden konnte. Dort konnte eine Überhitzung der Attikawohnungen festgestellt werden, welche durch die baulichen Gegebenheiten begünstigt wurde (praktisch keine natürliche Beschattung, grosse Terrassen, grosse Fensterflächen). In allen anderen Wohnungen der unteren Geschosse (EG bis OG) herrschte hingegen auch im Sommer stets ein sehr angenehmes Klima. Dort half die natürliche Beschattung durch die Bauweise (Loggias) wesentlich mit. Auch die passive Kühlung über die Erdsonden konnte ihren Beitrag leisten. In den Attikawohnungen wäre allerdings eine aktive Klimatisierung von Vorteil, welche aufgrund des hohen solaren Überschusses zu 100% mit Solarstrom betrieben werden könnte. Der Sommer-Fall muss in der Architektur der Zukunft jedoch vermehrt berücksichtigt werden!

4.4 Jahresauswertungen

Dieser Abschnitt behandelt den Hauptfokus der Auswertungen, nämlich die Wirkung der Regler in Bezug auf den solaren Deckungsgrad der Wärmepumpen. Damit kann gezeigt werden, wieviel Energie aus dem solaren Überschuss gespeichert werden kann, bzw. wie stark der Betrieb der Wärmepumpen in die solare Produktion geschoben werden konnte. Die Auswertungen wurden jeweils für die einzelnen Häuser 1 bis 3 gemacht, in welchen unterschiedliche Regelalgorithmen unter sonst vergleichbaren Bedingungen liefen.

4.4.1 Steigerungsfaktoren

Als wichtigstes Resultat wird in Abbildung 37 aufgezeigt, wie stark der solare Deckungsgrad der Wärmepumpe im Heizmodus gesteigert werden konnte durch die regelungstechnische Optimierung. Der Referenzwert von 100% entspricht dabei dem Gebäude ohne Optimierung (Haus 1). Die okkerfarbene Kurve entspricht den monatlichen Steigerungsfaktoren beim Gebäude mit einfacher Speicherüberhöhung (Haus 2). Die grüne Kurve zeigt die Steigerungsfaktoren beim Gebäude mit vollständigem Thermomanagement (Haus 3). Es wird sofort ersichtlich, dass die Steigerungsfaktoren



mit Thermomanagement wesentlich höher sind dank Speicherung der Energie in der Gebäudemasse. Je nach Monat konnten Steigerungsfaktoren bis 2.9 (290%) erreicht werden. Die Steigerungsfaktoren sind in den nebelfreien Monaten (ab Februar) über 2 (> 200%). Im Mai mit der höchsten Solarproduktion erreichen sie ihr Maximum. Von Juni bis September ist Sommersaison und die Wärmepumpe ist nicht im Heizmodus, weshalb hier keine Auswertungen gemacht wurden. Ab Oktober wurde die in Abschnitt 3.8 beschriebene «Regler-Rochade» ausgeführt (siehe Tabelle 9). Auch nach der «Rochade» war derselbe Effekt erkennbar, die grüne Kurve mit Thermomanagement (jetzt Haus 1) war zeigte ähnlich hohe Steigerungsfaktoren.

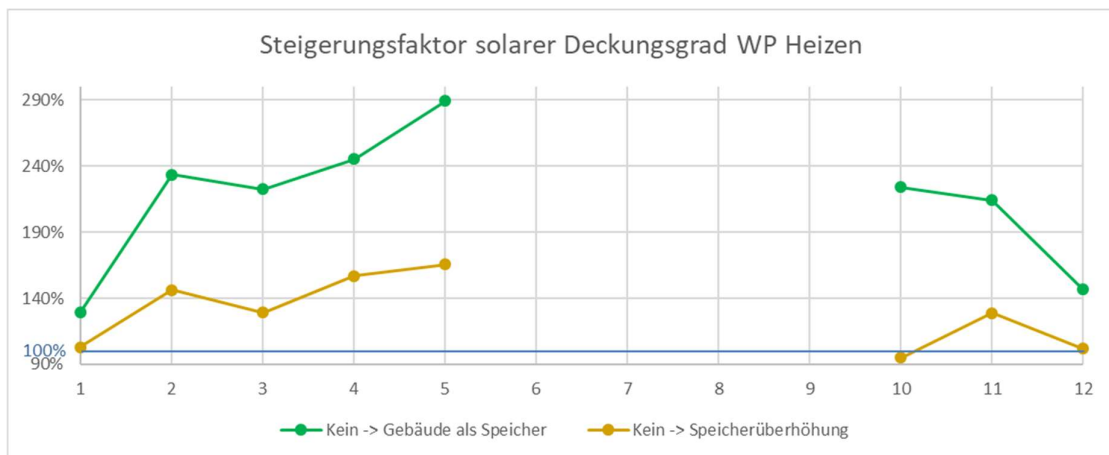


Abbildung 37: Monatliche Steigerungsfaktoren des solaren Deckungsgrades für die Wärmepumpe im Heizmodus gegenüber dem Fall ohne Optimierung (grün: vollständiges Thermomanagement mit Gebäude als Speicher, okker: nur Speicherüberhöhung)

Die kleine vertikale Verschiebung der Kurven nach der «Rochade» ist auf leichte Unterschiede bei den Gebäuden bzw. der Einstellung der Gebäudetechnik inkl. Wärmepumpen zurückzuführen. Obwohl das Thermomanagement nun auf das «leichtere» Haus 1 angewendet wurde, war der Speichereffekt in derselben Grössenordnung. Daraus lässt sich schliessen, dass ein Grossteil der thermischen Energie in den Fussböden gespeichert wird (Wärmeabgabesystem mit Fussbodenheizung). Die Bauweise der Zwischenwände hat wohl eine kleinere Wirkung (beim Haus 1 aus Holz statt Beton). Eine gute Dämmung ist allerdings entscheidend für die Speicherwirkung. Diese war bei allen Gebäuden auf dem maximalen Minergie-P-Eco-Standard.

Tabelle 9: Regler-Rochade und Zuordnung zu den Häusern

Monate	Haus 1	Haus 2	Haus 3
1..5	keine Optimierung	nur Speicher	inkl. Gebäude
6..9	Sommer, kein Heizen		
10..12	inkl. Gebäude	keine Optimierung	nur Speicher

Tabelle 10 zeigt die jährlich erreichten Steigerungsfaktoren. Dabei wurden die monatlichen Werte mit den effektiven Verbrauchswerten aus Abbildung 38 gewichtet und anschliessend gemittelt (der solare Deckungsgrad bezieht sich auf den effektiven Verbrauch). Damit konnte für das Thermomanagement ein **jährlicher Steigerungsfaktor von ca. 2** ermittelt werden, was ein sehr hoher Wert ist. Durch intelligente Regelungstechnik kann also doppelt so viel Energie im Gebäude gespeichert werden! Im Vergleich dazu fällt der Steigerungsfaktor von ca. 1.2 durch die reine Speicherüberhöhung bescheiden aus. Die Resultate decken sich mit den in den Planungsgrundlagen PV-WP [9] geschätzten Steigerungsfaktoren (Spalte PV-WP).



Tabelle 10: Gewichtete Jahresmittelwerte der Steigerungsfaktoren (PV-WP: Schätzwerte aus Planungsgrundlagen)

Gewichtete Mittelwerte Jahr (Messwerte)		PV-WP
Keine Optimierung → Gebäude als Speicher	197% (2)	(2)
Keine → Speicherüberhöhung	123% (1.2)	(1.3)

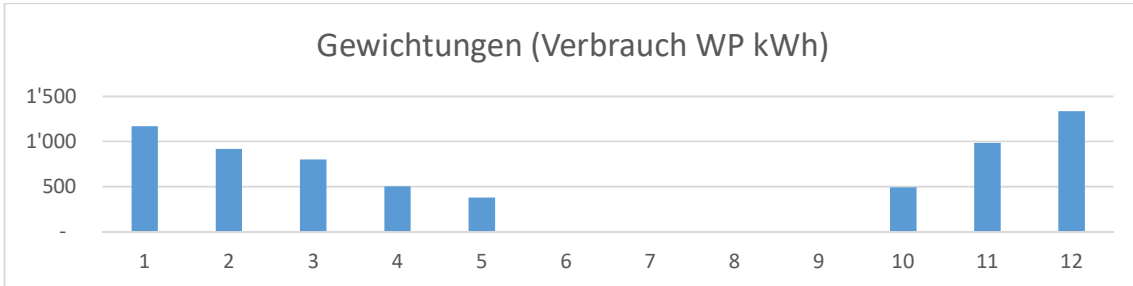


Abbildung 38: Monatliche Verbrauchswerte (Haus 1) als Gewichtung zur Berechnung der jährlichen Kennzahlen

Interessant für die Effizienz ist die Betrachtung der Arbeitszahlen der Wärmepumpen. Abbildung 39 zeigt die monatliche Beeinflussung der Arbeitszahlen im Heizmodus für die verschiedenen Regelmethoden. Auch hier entspricht die Referenz (100%) wieder dem Gebäude ohne Optimierung. Die grüne Kurve zeigt den Fall mit Thermomanagement. In den Monaten Januar bis Mai ist klar ersichtlich, dass das Thermomanagement die Effizienz der Wärmepumpe nicht beeinflusst. Der Grund liegt in der symmetrischen Fahrweise und dem kleinen Temperaturhub. Im Gegensatz dazu ist eine eindeutige Effizienzverschlechterung erkennbar bei der reinen Speicherüberhöhung (ocker). Diese wird verursacht durch die einseitige Temperaturanhebung. Im vorliegenden Fall ist diese moderat (Begrenzung der maximalen Komforttemperatur auf 30°C). Bei einer noch grösseren Überhöhung würde die Effizienz noch mehr abnehmen. Würde ein Elektroeinsatz eingesetzt, würde die Effizienz nochmals massiv sinken (im Extremfall unter 30%).

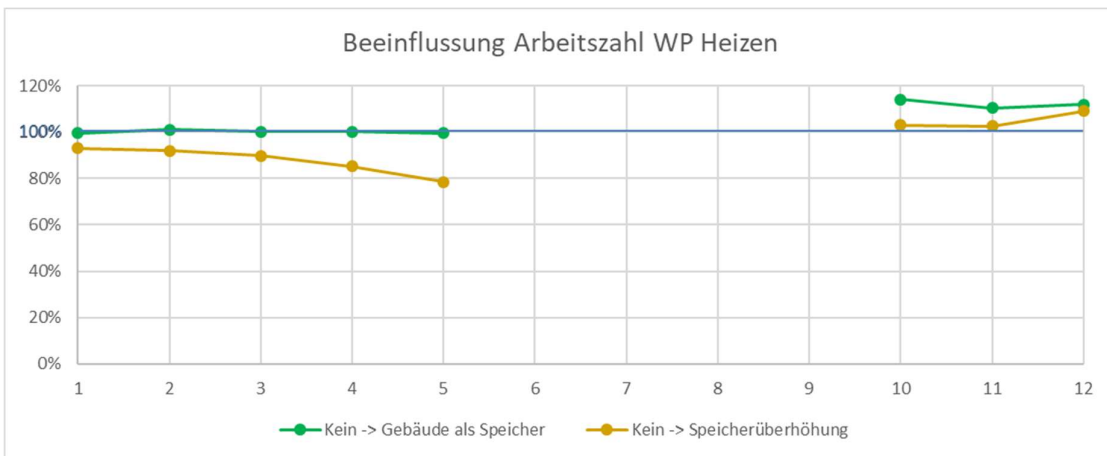


Abbildung 39: Monatliche Beeinflussung der Arbeitszahl der Wärmepumpe im Heizmodus gegenüber dem Fall ohne Optimierung (grün: vollständiges Thermomanagement mit Gebäude als Speicher, ocker: nur Speicherüberhöhung)



Auch hier ist eine kleine Verschiebung der Kurven nach der «Regler-Rochade» erkennbar. Offensichtlich ist das Haus 1 insgesamt etwas effizienter als Haus 3. Die Annahme identischer Häuser konnte also nicht perfekt erreicht werden. Dies kann verschiedene Gründe haben wie leichte Unterschiede in der Vorlauftemperatur, der passiven Sonneneinstrahlung, der Lüftung und der Raumtemperatureinstellungen durch die Bewohner. Wesentlich ist jedoch, dass der Regler mit Thermomanagement (grün) auch nach der «Regler-Rochade» die eindeutig höchste Effizienz hat im Vergleich zu den anderen Reglern.

Als wichtige Erkenntnis kann man festhalten, dass das hier vorgestellte Thermomanagement eine massive Steigerung des solaren Deckungsgrades um den Faktor 2 ermöglicht ohne Reduktion der Effizienz!

Im Gegensatz dazu erkaufte man sich bei der reinen Speicherüberhöhung die Steigerung des solaren Deckungsgrades durch einen Verlust in der Effizienz. Je höher der Temperaturhub nach oben geht, desto grösser sind die Effizienzverluste. Am schlimmsten wäre hier die Verwendung eines Elektroeinsatzes, welcher in diesem Projekt nicht betrachtet wurde.

4.4.2 Solaranteile Wärmepumpen

In diesem Abschnitt werden die absoluten Zahlen der erreichten solaren Deckungsgrade aufgezeigt. Diese sind abhängig von der Installation, der Grösse der PV-Anlage im Verhältnis zu den Verbrauchern sowie der Witterung. Abbildung 40 zeigt die monatlichen Werte für das Heizen nach Regelstrategien aufgeteilt (verschiedene Farben). Im Dezember und Januar sind die solaren Deckungsgrade sehr tief wegen den vorhandenen Nebellagen. Ab Februar nehmen sie zu. Am höchsten sind die Werte in der Übergangszeit März-Mai und Oktober. Die Sommermonate Juni-September sind für das Heizen nicht relevant. Vergleicht man die verschiedenen Farben der Balken untereinander, wird der im vorangehenden Abschnitt beschriebene Steigerungsfaktor durch das Thermomanagement sofort ersichtlich (blau zu grün). Bereits im Februar ist mehr als eine Verdoppelung von 15 auf 34% erkennbar, welche im Mai zu einer Verdreifung von 28 auf 80% ansteigt. Im Vergleich dazu sind die Werte nur mit Speicherüberhöhung wesentlich tiefer (rote Balken). Der violette Balken für Haus 4 ist hier eigentlich nicht im Untersuchungsbereich (anderes Gebäude). Man sieht jedoch auch hier die Wirkung des Thermomanagements deutlich.

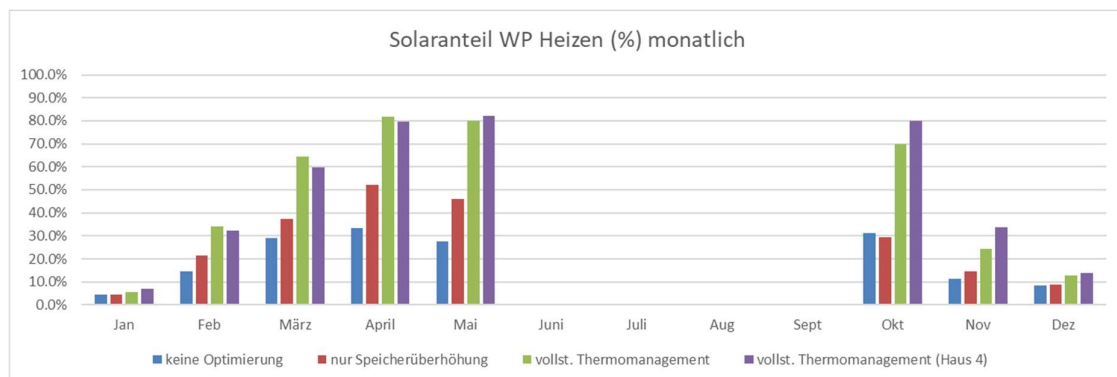


Abbildung 40: Monatliche Solaranteile (solare Deckungsgrade) für die Wärmepumpe im Heizmodus

Auch die «Rochade» der Regler ist ab Oktober berücksichtigt. Es befinden sich also nicht mehr die gleichen Gebäude hinter den Farben. Deshalb ändern auch die absoluten Werte der Solaranteile leicht. Der Effekt des Thermomanagements ist aber auch nach der «Rochade» sehr deutlich erkennbar.



Abbildung 41 zeigt die solaren Deckungsgrade für die Brauchwarmwasser-Produktion. Die absolut höchsten Werte liegen hier in den Übergangs- und Sommermonaten bei max. 80..90%. Die Regelungsstrategie spielt eine untergeordnete Rolle, solange das Warmwasser vornehmlich am Tag produziert wird. Dies ist in den Häusern 1 bis 3 der Fall. Im Haus 4 wird die Legionellen-Vorbeugung nachts vorgenommen. Dies resultiert in etwas tieferen Solaranteilen im Winter (November und Dezember, violette Balken). Im Winter sind die Werte kleiner wegen der tieferen solaren Produktion, ähnlich wie beim Heizen.

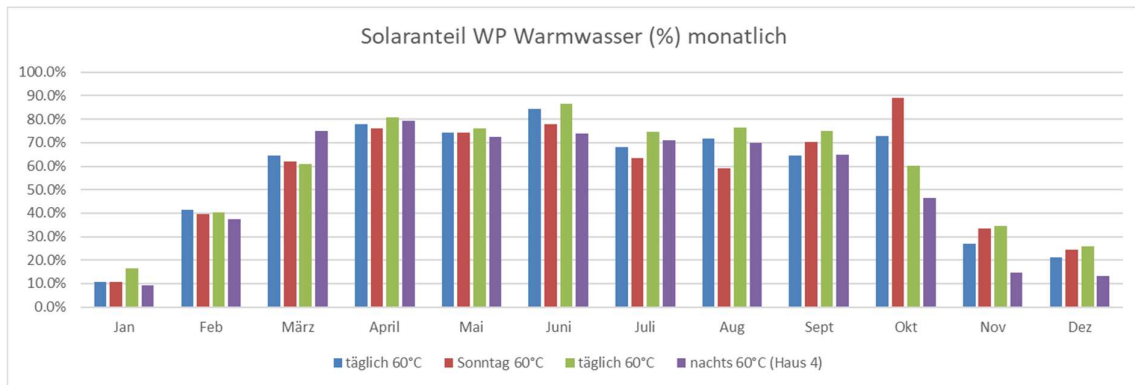


Abbildung 41: Monatliche Solaranteile (solare Deckungsgrade) für die Wärmepumpe im Warmwasser-Modus

Folgend werden die Kennzahlen auf drei Jahreszeiten gemäss Tabelle 11 verteilt. Die Einteilung wurde aufgrund der vorherrschenden Sonneneinstrahlung und Aussentemperaturen gewählt. Die Wintermonate November bis Februar haben die tiefste Produktion und Aussentemperaturen. März bis Mai sowie Oktober haben eine hohe Produktion und höhere Aussentemperaturen, sind aber noch in der Heizperiode. Die restlichen Monate Juni-September sind ausserhalb der Heizperiode.

Tabelle 11: Definition der Jahreszeiten

Jahreszeit (Periode)	Monate
Jahr	Jan-Dez (12 Monate)
Winter	Nov-Feb (4 Monate)
Übergang	März-Mai, Okt (4 Monate)
Sommer	Juni-Sept (4 Monate)

Abbildung 42 zeigt den solaren Deckungsgrad für das Heizen über das gesamte Jahr sowie die Jahreszeiten «Winter» und «Übergang», wieder aufgeteilt nach den Regelstrategien (Farben). Über das ganze Jahr gesehen, konnte der Wert von 18 auf 36% verdoppelt werden (blau zu grün), was den Steigerungsfaktor von 2 in Abschnitt 4.4.1 bestätigt. In der Übergangszeit konnte sogar eine Steigerung von 30 auf 72% erreicht werden, was einem Faktor von 2.4 entspricht. Im Winter sehen die absoluten Werte wesentlich kleiner aus, was auf die häufigen Nebellagen zurückzuführen ist. Aber auch hier konnte der Wert von 9 auf knapp 18% fast verdoppelt werden, und zwar nur mit dem vollständigen Thermomanagement.

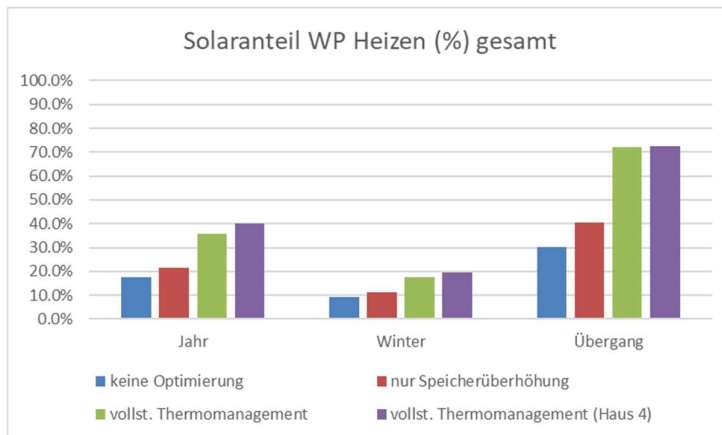


Abbildung 42: Jahreszeitliche Solaranteile (solare Deckungsgrade) für die Wärmepumpe im Heizmodus

Abbildung 43 zeigt die solaren Deckungsgrade für die Brauchwarmwasser-Produktion. Auch hier variieren die absoluten Werte nach Jahreszeit. In der Übergangs- und Sommerzeit sind diese wesentlich höher als in der Winterzeit. Wie bereits erwähnt spielt die Regelungsstrategie hier eine untergeordnete Rolle. Es reicht tagsüber mit festen Zeitprogrammen zu produzieren. Aber auch hier ist im Winter der etwas tiefere Solaranteil in Haus 4 ersichtlich (violetter Balken), welcher aus der Legionellen-Vorbeugung nachts resultiert.

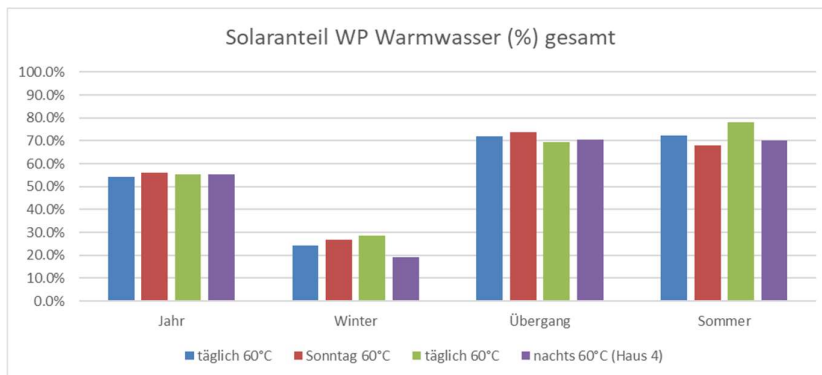


Abbildung 43: Jahreszeitliche Solaranteile (solare Deckungsgrade) für die Wärmepumpe im Warmwasser-Modus

4.4.3 Netzbezug Wärmepumpen

Beim Netzbezug der Wärmepumpe im Heizmodus (Abbildung 44) ergibt sich das umgekehrte Bild wie beim Solaranteil. Die absolut höchsten Werte werden in den Wintermonaten erreicht, allerdings sind auch dann noch Reduktionen möglich mit Thermomanagement (blau zu grün). Im Dezember und Januar betragen die Reduktionen weniger als 10 Prozentpunkte. Im November und Februar ist eine Reduktion um die 20 Prozentpunkte möglich. In der Übergangszeit sind wesentlich höhere Reduktionen möglich.

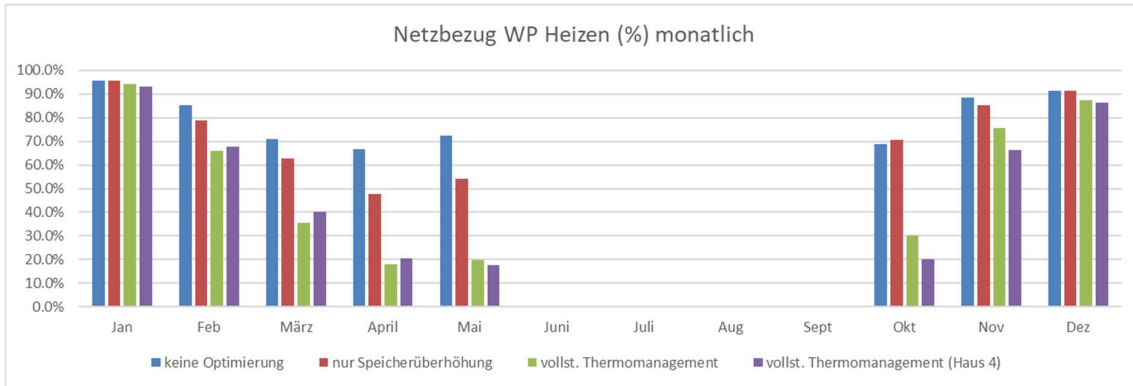


Abbildung 44: Monatlicher Netzbezug (Anteil in % an Gesamtverbrauch) für die Wärmepumpen im Heizmodus

Bei der Warmwasser-Produktion (Abbildung 45) treten die absolut höchsten Werte ebenfalls in den Wintermonaten November-Januar auf. Im Haus 4 ist der höhere Netzbezug durch die nächtliche Legionellen-Vorbeugung ersichtlich. Im Sommer und in der Übergangszeit sinken die Netzbezüge massiv.

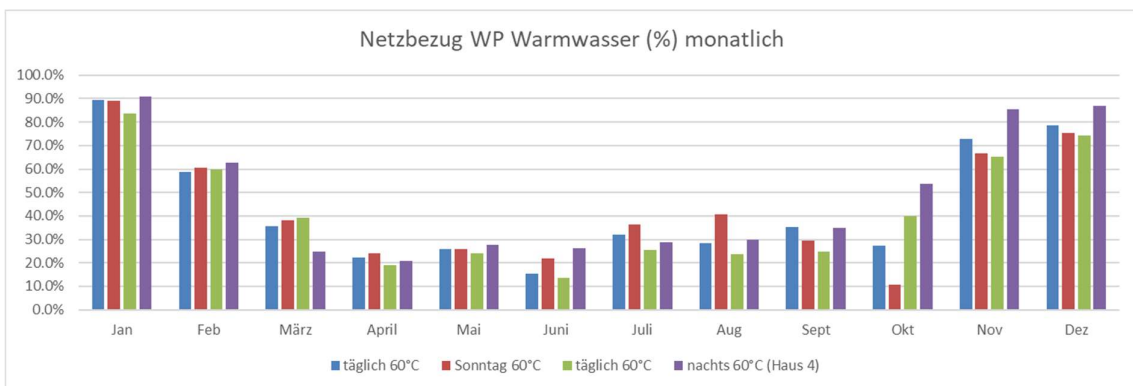


Abbildung 45: Monatlicher Netzbezug (Anteil % an Gesamtverbrauch) für die Wärmepumpen im Warmwasser-Modus

Abbildung 46 zeigt den Netzbezug über das ganze Jahr und nach Jahreszeiten aufgeteilt (gemäss Tabelle 11). Im Winter kann der Netzbezug durch das Thermomanagement immerhin um 10 Prozentpunkte abgesenkt werden (von 90% blau auf 80% grün). Das tönt zwar absolut gesehen nicht nach viel, kann aber trotzdem der Problematik der befürchteten «Winterstromlücke» entgegenwirken, wenn gesamtschweizerisch eine Vielzahl von Gebäuden optimiert wird.

Zudem kann die thermische Speicherfähigkeit auch für ein gezieltes Lastmanagement genutzt werden. Bei Hochlastphasen im Stromnetz können die Wärmepumpen abgeschaltet werden. So kann das Stromnetz entlastet werden. Früher wurde das mit Rundsteuerungen gemacht, in Zukunft wäre auch ein variabler Tarif als Anreiz denkbar. Bei hohem Tarif würden die Wärmepumpen automatisch heruntergefahren. Dies war die ursprüngliche Idee der Preisregler aus der ersten Projektphase [1]. Da wäre eine tarifgesteuerte, netzdienliche Optimierung möglich.

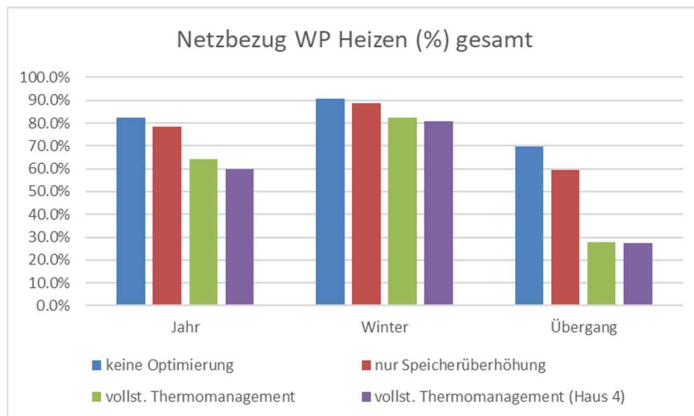


Abbildung 46: Jahreszeitlicher Netzbezug (Anteil % an Gesamtverbrauch) für die Wärmepumpe im Heizmodus

Abbildung 47 zeigt den Netzbezug für die Warmwasserproduktion nach Jahreszeiten. Auch hier variieren die absoluten Werte je nach Jahreszeit. In der Übergangs- und Sommerzeit ist der Netzbezug wesentlich tiefer als in der Winterzeit. Auch hier erhöht die Legionellen-Vorbeugung nachts den Netzbezug im Winter (Haus 4). Ansonsten hat die Regelstrategie keinen grossen Einfluss, solange möglichst tagsüber geladen wird. Ein einfaches Zeitprogramm genügt (blau).

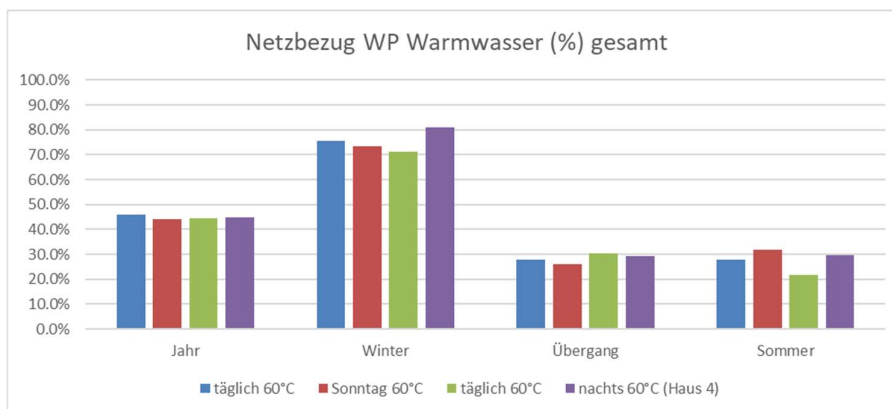


Abbildung 47: Jahreszeitlicher Netzbezug (Anteil % an Gesamtverbrauch) für die Wärmepumpe im Warmwasser-Modus

4.4.4 Arbeitszahl Wärmepumpen

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Regelstrategien auf die Effizienz des Systems beschrieben. Dazu werden die Arbeitszahlen der Wärmepumpen untersucht, separiert für den Fall Heizen und Warmwasserproduktion. Als Ergänzung zum Abschnitt 4.4.1 werden hier die Absolut-Werte betrachtet.

Abbildung 48 zeigt die monatlichen Arbeitszahlen für das Heizen. Bei der Speicherüberhöhung (rote Balken) ist eine deutliche Reduktion der Arbeitszahlen ersichtlich in den Monaten Januar bis Mai gegenüber dem Fall ohne Optimierung (blaue Balken). Im Gegensatz dazu ist beim Thermomanagement keine Reduktion der Arbeitszahlen ersichtlich (grüne Balken). Der Grund liegt darin, dass beim Thermomanagement die Temperaturen symmetrisch angehoben und abgesenkt werden, während bei der Speicherüberhöhung asymmetrisch nur angehoben wird. Auch der Temperaturhub ist dort grösser.



Aufgrund der «Regler-Rochade» sieht die Situation ab Oktober auf den ersten Blick etwas anders aus (die Reihenfolge der Häuser wurde vertauscht, siehe Zahlen oberhalb der Balken). Die erhöhten Arbeitszahlen bei den roten Balken werden hier nicht durch die Speicherüberhöhung verursacht, sondern durch die etwas effizientere Grundeinstellung von Haus 3 im Vergleich zu Haus 2. Im Vergleich dazu liegen die Arbeitszahlen mit Thermomanagement (grüne Balken) nochmals höher. Aber auch hier ist aus physikalischen Überlegungen nicht anzunehmen, dass das Thermomanagement die Effizienz gegenüber dem nicht optimierten Fall erhöht hat, sondern die Grundeinstellung von Haus 1 war effizienter als Haus 2.

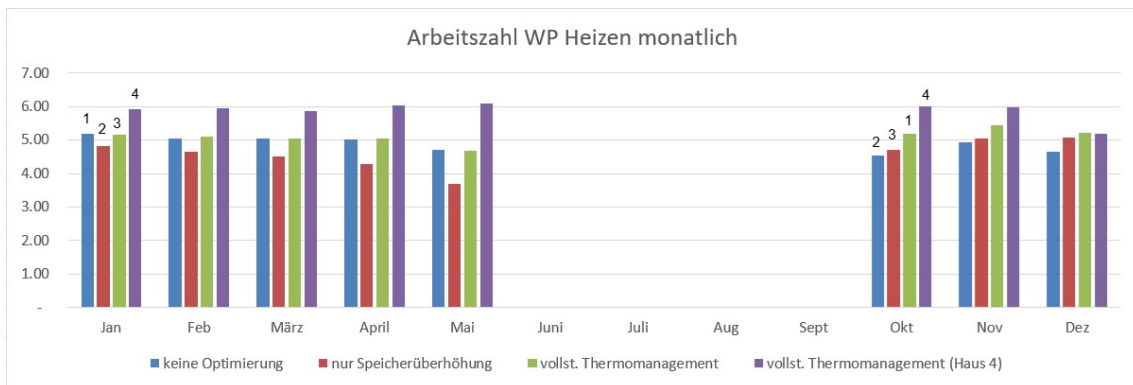


Abbildung 48: Monatliche Arbeitszahlen (Wärme / elektrischer Verbrauch) für die Wärmepumpen im Heizmodus (Haus 1, 2, 3, 4)

Abbildung 49 zeigt die Arbeitszahlen für die Brauchwarmwasser-Produktion. Die Arbeitszahlen für die untersuchten Häuser 1 bis 3 liegen ganzjährig etwa auf demselben Niveau, was primär den effizienten Erdsonden-Wärmepumpen zu verdanken ist. Zudem wurden die Temperaturen nicht sonderlich überhöht, sondern täglich auf maximal 60°C erhöht, über das ganze Jahr gleich. Falls Elektroinsätze verwendet worden wären, wären die Arbeitszahlen in den Monaten mit PV-Überschuss massiv abgesunken. Diese waren hier aber nicht aktiviert. Die etwas erhöhten Werte im Haus 4 sind vermutlich auf den hohen Warmwasserverbrauch im Sommer zurückzuführen, welcher das Temperaturniveau im Mittel senkte.

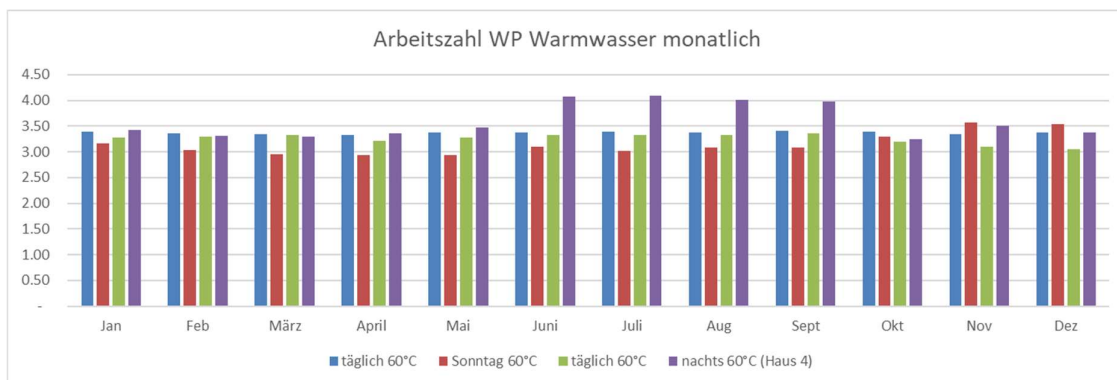


Abbildung 49: Monatliche Arbeitszahlen (Wärme / elektrischer Verbrauch) für die Wärmepumpen im Warmwasser-Modus

Abbildung 50 zeigt die jahreszeitlichen Resultate für das Heizen (Aufteilung gemäss Tabelle 11). Im Gegensatz zur reinen Speicherüberhöhung (rot) führt das Thermomanagement (grün) über das ganze Jahr betrachtet zu keiner Reduktion der Effizienz (Balkengruppe links). In der Übergangszeit ist die



Reduktion der Effizienz durch die reine Speicherüberhöhung am deutlichsten (Balkengruppe rechts). Die im Winter sichtbare Erhöhung der Effizienz beim Thermomanagement ist wohl eher auf die «Rochade der Regler» zurückzuführen als auf die Regelstrategie.

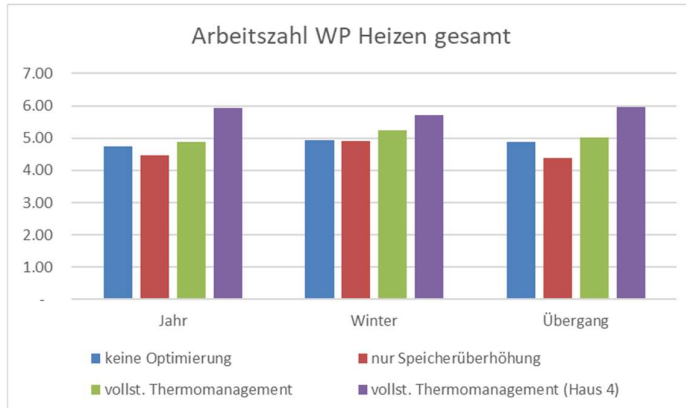


Abbildung 50: Jahreszeitliche Arbeitszahlen (Wärme / elektrischer Verbrauch) für die Wärmepumpe im Heizmodus

Abbildung 51 zeigt die Arbeitszahlen für die Brauchwarmwasser-Produktion nach Jahreszeiten. Abgesehen von Haus 4 im Sommer sind keine grossen Unterschiede erkennbar. Die Erdsonden-Wärmepumpen laufen in allen Jahreszeiten sehr effizient. Da die vorgegebenen Temperaturen von 50...60°C stets erreicht wurden, war auch keine Zuschaltung von Elektroinsätzen notwendig.

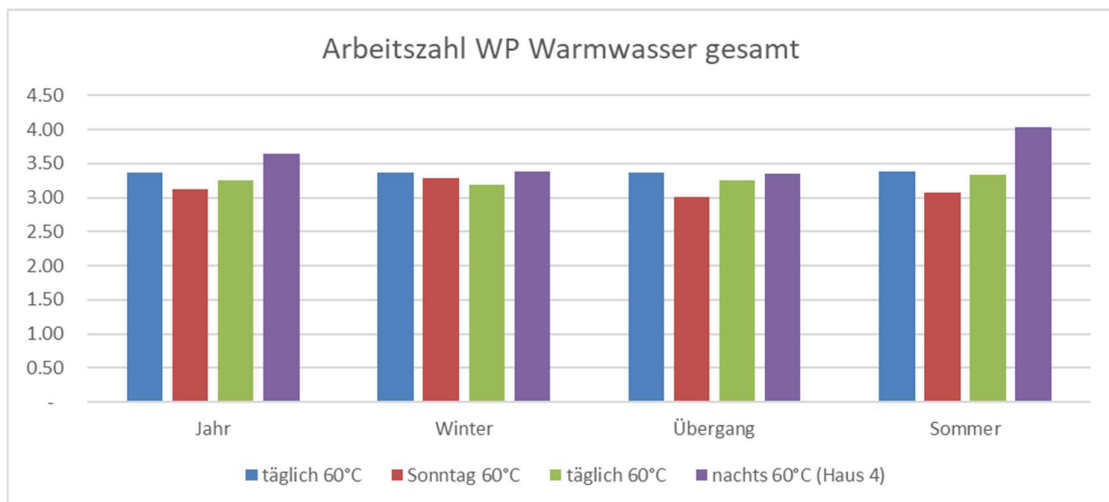


Abbildung 51: Jahreszeitliche Arbeitszahlen (Wärme / elektrischer Verbrauch) für die Wärmepumpe im Warmwasser-Modus

4.4.5 Auswertung gesamtes Areal (Ergänzung)

Obwohl der Fokus dieses Projektes auf der Auswertung der Wärmepumpen in den verschiedenen Gebäuden lag, wird folgend eine Gesamtauswertung für das gesamte Areal gezeigt. Die absoluten Werte hängen von vielen Faktoren ab, vor allem aber von der Gebäudephysik (hier sehr gute Dämmung) und der Grösse der PV-Anlagen (hier sehr grosszügig dimensioniert). Beim elektrischen Verbrauch der Haushalte spielt das individuelle Benutzerverhalten der Bewohner eine wesentliche Rolle.



Abbildung 52 zeigt die elektrischen Energiewerte des gesamten Areals für jeden Monat. Wie üblich ist ein gegenläufiger Verlauf von Produktion (hellgrün) und Verbrauch (dunkelgrün) über das Jahr ersichtlich. Der Eigenverbrauch (blau) hat sein Maximum in der Übergangszeit März-Mai. Der Netzbezug (rot) ist im Winter maximal, speziell in den Nebelmonaten November bis Januar. Im Gegensatz dazu ist in den Monaten April bis September ein grosser solarer Überschuss vorhanden. Dieser sollte sinnvoll genutzt werden, zum Beispiel für das Laden von Elektromobilen. Leider waren bis jetzt nur 2 Fahrzeuge auf dem Areal verfügbar. Weitere Fahrzeuge werden jedoch dazu kommen. Auch eine aktive Klimatisierung der Attika-Wohnungen könnte in Zukunft interessant sein, um der sommerlichen Hitze entgegenzuwirken. Der restliche Strom wird ins Netz eingespeist und kommt anderen Haushalten zugute. Überregional gesehen macht also eine Überdimensionierung der PV-Anlagen durchaus Sinn. Es sollte möglichst die gesamte zur Verfügung stehende Fläche genutzt werden. Die senkrechten Fassadenmodule konnten zwar den Winterstrom etwas steigern. Der Effekt wurde jedoch durch den Nebel stark beeinträchtigt.

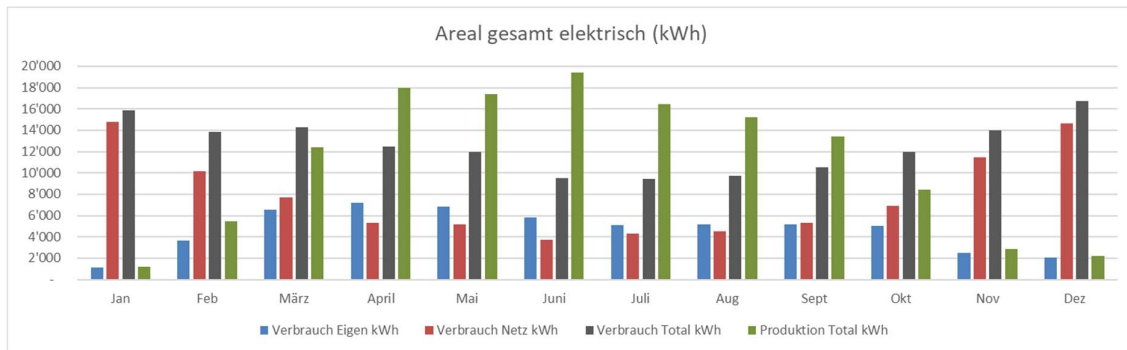


Abbildung 52: Monatliche Verbrauchs- und Produktionswerte des gesamten Areals

Abbildung 53 zeigt die monatlichen Kennzahlen für den Eigenverbrauchsgrad (blau) und Autarkiegrad (grün). Auch hier ist der übliche gegenläufige Verlauf ersichtlich. Im Sommer wird bis zu 60% Autarkiegrad erreicht, im Winter bis zu 90% Eigenverbrauchsgrad. Dies bedeutet, dass im Winter praktisch der gesamte produzierte Strom zeitgleich lokal verbraucht wird. Der Autarkiegrad im Sommer wird begrenzt durch den hohen nächtlichen Stromverbrauch der Haushalte. Hier könnte mit einem Batteriespeicher ein höherer Autarkiegrad erreicht werden. Eine Abschätzung hat gezeigt, dass mit einem Batteriespeicher von 200 kWh Kapazität die Autarkie in den Sommermonaten beinahe auf 100% erhöht werden könnte. Im Winter könnte der Eigenverbrauchsgrad von 90% auf 100% gesteigert werden, wegen den Verlusten in der Batterie würde der Netzbezug damit aber nicht sinken. Das befürchtete Problem der «Winterstromlücke» könnte eine Batterie also keinesfalls lösen. Demgegenüber stehen die hohen Investitionskosten und der ökologische Fussabdruck. Deshalb wurde im Projekt bewusst auf einen Batteriespeicher verzichtet.

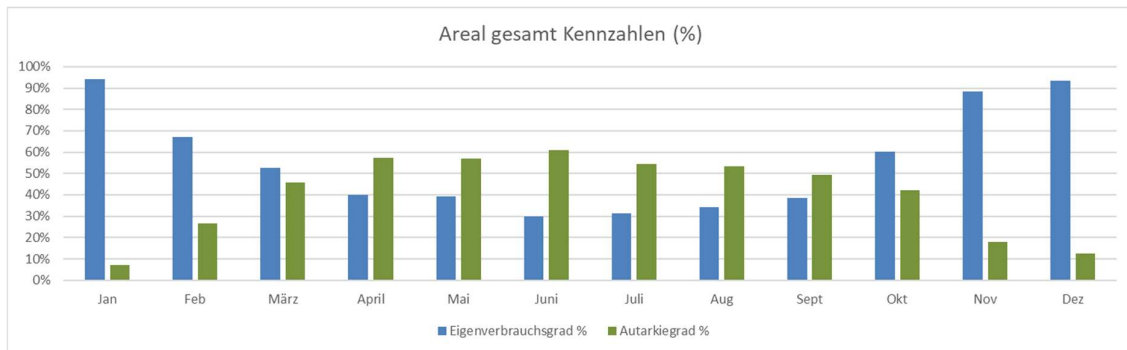


Abbildung 53: Monatliche Kennzahlen des gesamten Areals

Abbildung 54 zeigt die monatlichen elektrischen Verbrauchswerte für die Wärmepumpe im Heizmodus, aufgeteilt auf die einzelnen Gebäude. Hier sind auch die Umwälzpumpen berücksichtigt, weshalb im Sommer ein Verbrauch ersichtlich ist durch das «Natural Cooling». Die Unterschiede zwischen den Gebäuden sind vornehmlich auf die Anzahl Bewohner und das Benutzerverhalten zurückzuführen. Ein erhöhter Komfortbedarf führt zu einem höheren Heizenergieverbrauch. Abgesehen vom Januar hatte das Haus 1 die höchsten Verbrauchswerte für das Heizen. Im Dezember wurden die Wärmepumpen aufgrund der Benutzerwünsche in allen Häusern höher eingestellt, speziell im Haus 3. Das Haus 4 hat im Vergleich zu seiner Bewohnerzahl (ca. ein Drittel der anderen Häuser) den höchsten Energieverbrauch. Der Komfortanspruch war dort offensichtlich am höchsten. Es ist hier anzumerken, dass die Regelstrategien nur die Effizienz des Systems optimieren konnten. Die absoluten Verbrauchswerte sind aber stark abhängig von dem Benutzerverhalten.

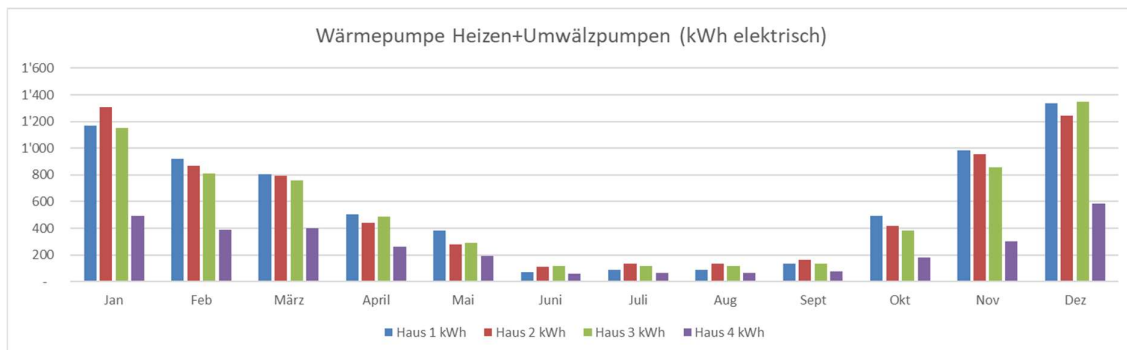


Abbildung 54: Monatliche elektrische Verbrauchswerte aller Wärmepumpen im Heizmodus (inkl. Umwälzpumpen)



Tabelle 12 zeigt den jährlichen elektrischen Energieverbrauch für das Heizen, bezogen auf die Anzahl Personen in den verschiedenen Gebäuden. Haus 4 hat mit 511 kWh den höchsten Bedarf pro Person, während Haus 2 mit nur 342 kWh den tiefsten Bedarf hat. Da liegt immerhin ein Faktor von 1.5 dazwischen (siehe Kapitel «Suffizienz»).



Tabelle 12: Jährliche Verbrauchswerte der Wärmepumpen für das Heizen, bezogen auf die Anzahl Personen in den Gebäuden

Wärmepumpe Heizen 2021				
Gebäude	Verbrauch kWh	Anz. Pers.	pro Person kWh	Faktor
Haus 1	6'966	16	435	1.3
Haus 2	6'846	21	326	1
Haus 3	6'568	19	346	1.1
Haus 4	3'069	6	511	1.6
Gesamt	23'448	62	378	

Abbildung 55 zeigt die monatlichen elektrischen Verbrauchswerte für die Brauchwarmwasser-Produktion. Die Unterschiede in den Verbrauchswerten für das Warmwasser sind erheblich und korrelieren nicht unbedingt mit der Anzahl Bewohner. Auch hier gibt es also deutliche Unterschiede im Benutzerverhalten. Sie sind noch deutlicher als beim Heizen.

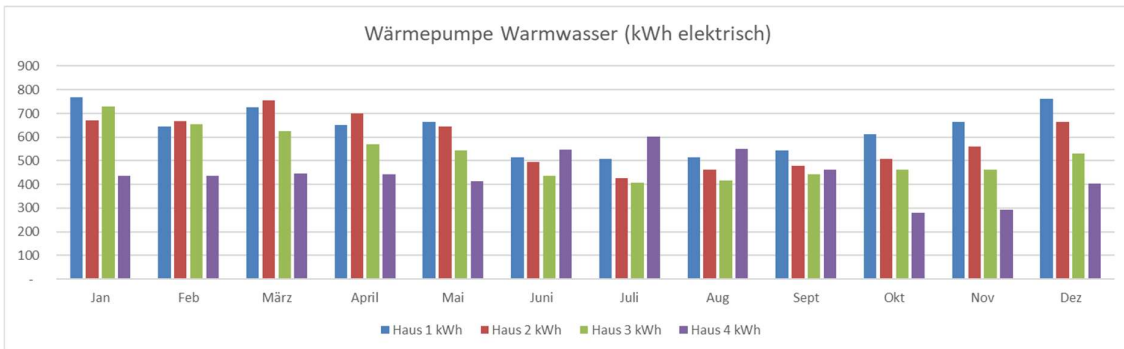


Abbildung 55: Monatliche elektrische Verbrauchswerte aller Wärmepumpen im Warmwasser-Modus

Tabelle 13 zeigt den jährlichen elektrischen Energieverbrauch für das Heizen, bezogen auf die Anzahl Personen. Hier hat Haus 4 (nur 6 Personen) mit 886 kWh den weitaus höchsten Verbrauch pro Person und Haus 3 mit nur 331 kWh den tiefsten Verbrauch. Die Unterschiede sind also erheblich (bis Faktor 2.7). Speziell beim Warmwasserverbrauch spielt das Benutzerverhalten eine grosse Rolle.

Tabelle 13: Jährliche Verbrauchswerte der Wärmepumpen für das Brauchwarmwasser, bezogen auf die Anzahl Personen in den Gebäuden

Wärmepumpe Warmwasser 2021				
Gebäude	Verbrauch kWh	Anz. Pers.	pro Person kWh	Faktor
Haus 1	7'569	16	473	1.5
Haus 2	7'037	21	335	1
Haus 3	6'281	19	331	1.0
Haus 4	5'315	6	886	2.7
Gesamt	26'201	62	430	

Tabelle 14 zeigt den gesamten elektrischen Energiehaushalt des Areals, bezogen auf die Anzahl Personen total. Der gesamte Netzbezug pro Person belief sich im Jahre 2021 auf 1'517 kWh. Der Wert ist auf sehr tiefem Niveau im gesamtschweizerischen Vergleich, jedoch deutlich höher als im Vorjahr (1'259



kWh). Auch der gesamte Verbrauch stieg pro Person von 2'257 kWh auf 2'424 kWh (plus 10%). Offensichtlich hat sich das Benutzerverhalten verändert. Einerseits stieg das Komfortbedürfnis bezüglich Raumtemperaturen deutlich, der Warmwasserverbrauch ist angestiegen und auch der Haushalt-Stromverbrauch nahm zu.

Tabelle 14: Jährliche elektrische Energiewerte für das gesamte Areal, bezogen auf die Anzahl Personen total und Vergleich mit dem Vorjahr

Gesamtes Areal			
Anzahl Personen total	62	2021	2020
	total	pro Person	pro Person
Verbrauch Eigen kWh	56'211	907	998
Verbrauch Netz kWh	94'071	1'517	1'259
Verbrauch Total kWh	150'282	2'424	2'257
Produktion Total kWh	132'371	2'135	2'508

Leider reduzierte sich im Jahre 2021 zudem die Produktion gegenüber dem Vorjahr, was auf die schlechte Witterung in den Sommermonaten zurückzuführen ist.

4.5 Messkontrolle

In diesem Abschnitt wird die Messkontrolle beschrieben, die von Seiten der FHNW durchgeführt wurde. Ziel der Messkontrolle ist eine stichprobenartige Plausibilitätsüberprüfung der Auswertungsergebnisse der Smart Energy Engineering GmbH. Als Grundlage für diese Messkontrolle wurden von der Smart Energy Engineering GmbH die aufgezeichneten Messdaten sowie die bereits bestehenden Auswertungen zur Verfügung gestellt.

Die Messdaten liegen in Log-Dateien vor, welche für jedes Gebäude und jeden Tag automatisch generiert wurden und in nahezu Minutentakt die gemessenen Temperaturen, Verbräuche etc. enthalten. Um die bestehende Auswertung der Smart Energy Engineering GmbH zu kontrollieren, wurde von der FHNW in Matlab eine programmatische Auslesung der Log-Dateien implementiert. Hierdurch können die Messdaten unabhängig von der bestehenden Auswertung analysiert werden. Im Folgenden werden die Analyseergebnisse dieser alternativen Auswertung beschrieben.

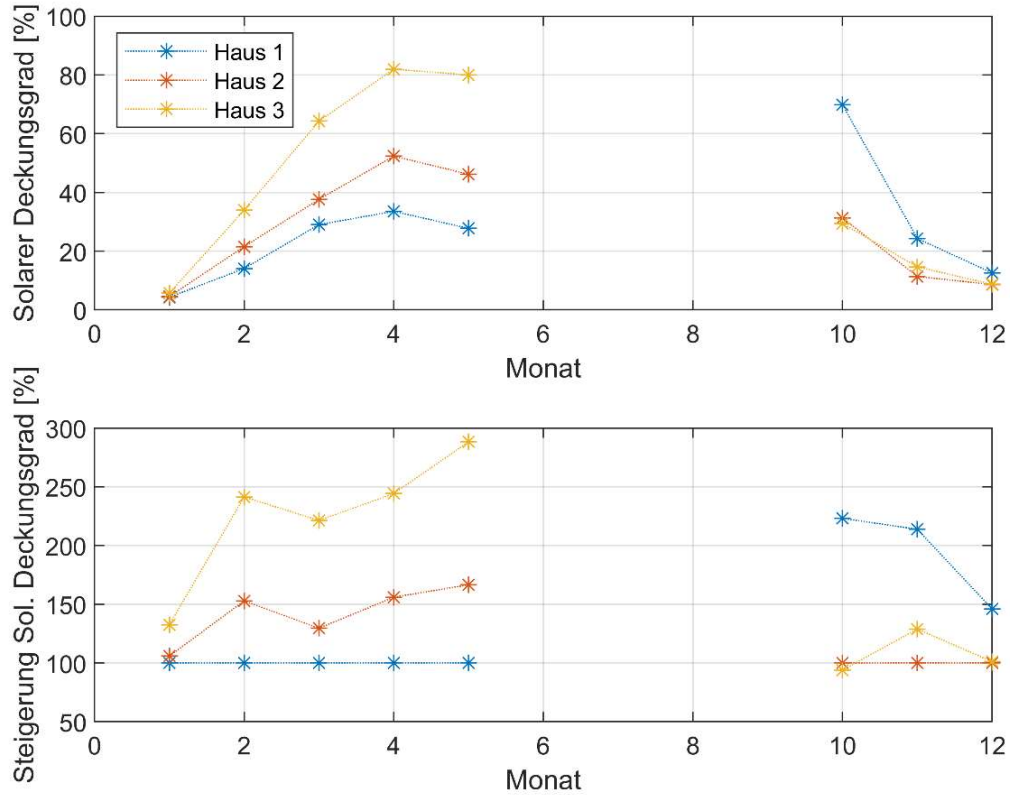


Abbildung 56: Absolute solare Deckungsgrade der Heizung (oben) und Steigerungsfaktoren (unten) der Gebäude 1-3 über das Jahr.

Abbildung 56 zeigt die Validierung zu den Steigerungen des solaren Deckungsgrads aus den Log-Dateien mit Matlab. Diese decken sich gut mit der Auswertung in Abbildung 37. Kleinere beobachtete Abweichungen stammen vermutlich daher, dass die Log-Dateien eine andere Abtastrate haben. Die Aussage, dass der solare Deckungsgrad verdoppelt wird, kann jedoch bestätigt werden.

Bei der Sichtung der bestehenden Auswertung der Smart Energy Engineering GmbH ist aufgefallen, dass der Austausch der Regelstrategien zwischen den Gebäuden («Regler-Rochade»), welcher Ende September 2021 durchgeführt wurde, eine Änderung der relativen Reihenfolge der Jahresarbeitszeiten zur Folge hatte. Um Fehler bei der Zuordnung der Regelstrategien zu den Gebäuden auszuschliessen, wurde die Heizleistung der Wärmepumpen zu einem Datum im Frühjahr mit einem Datum im Herbst verglichen. An der Heizleistung lässt sich ablesen, welche Regelstrategie in den einzelnen Gebäuden gefahren wird.

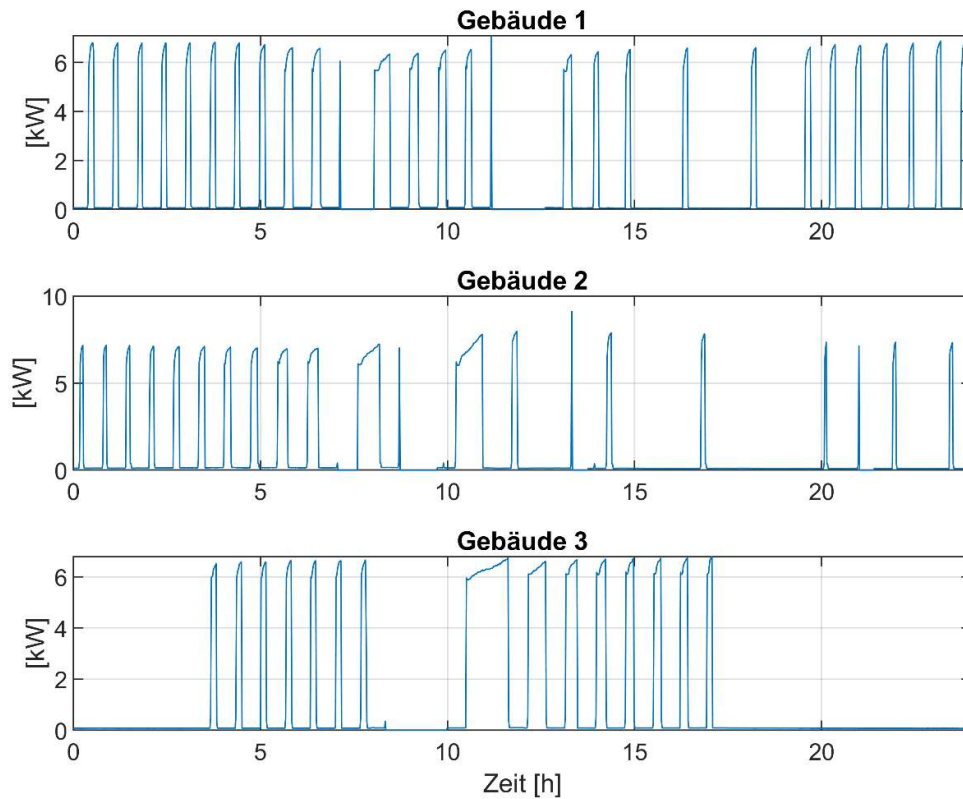


Abbildung 57: Heizleistung Wärmepumpe der Gebäude 1-3 am 23.3.2021.

In Abbildung 57 wird die Heizleistung der Wärmepumpen in den Gebäuden 1-3 am 23.03.21 über den Tag abgebildet. Ein Vergleich von Abbildung 57 mit Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigt zunächst einmal, dass die Auswertung der Smart Energy Engineering GmbH und die Auswertung der FHNW zu den gleichen Heizleistungsverläufen am 23.03.2021 führen. Unterschiedlich ist lediglich die Auflösung der Daten: Während bei der Darstellung von Smart Energy Engineering die Messdaten über einen Zeitraum von 15 Minuten gemittelt wurden, werden in Abbildung 57 die Daten im Minutentakt dargestellt. Wie in Abbildung 57 bestätigt wird, sehen wir in Gebäude 1 Regelstrategie A (keine Optimierung), in Gebäude 2 Regelstrategie B (einfache Optimierung mit Speicherüberhöhung) und in Gebäude 3 Regelstrategie C (vollständige Optimierung mit Thermo-Management).

Die Heizleistung der Wärmepumpen am 21.10.21 wird in Abbildung 58 dargestellt. Durch Vergleich der Heizleistungen mit Abbildung 57 lässt sich ablesen, dass im Herbst in Gebäude 1 Regelstrategie C (vollständige Optimierung mit Thermo-Management), in Gebäude 2 Regelstrategie A (keine Optimierung) und in Gebäude 3 Regelstrategie B (einfache Optimierung mit Speicherüberhöhung) gefahren



wurde. Die Zuordnung der Regelstrategien zu den Gebäuden ist der Übersicht halber nochmal in Tabelle 15 zusammengefasst. Schlussendlich bestätigt diese Stichprobe die von der Smart Energy Engineering GmbH angegebene Zuordnung der Regelstrategien zu den Gebäuden.

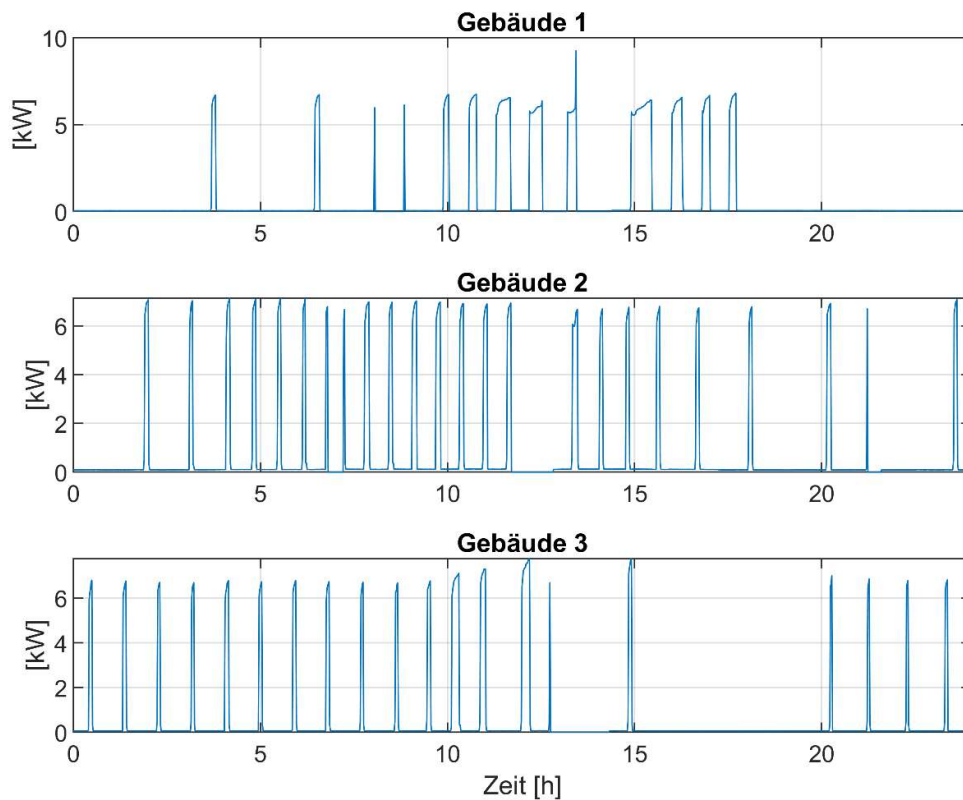


Abbildung 58: Heizleistung Wärmepumpe der Gebäude 1-3 am 21.10.2021.

Tabelle 15: Überprüfungsergebnis: Zuordnung der Regelstrategien zu den Gebäuden.

Gebäude	Regelstrategie Frühjahr	Regelstrategie Herbst
1	A (keine Optimierung)	C (Thermo-Management)
2	B (Speicherüberhöhung)	A (keine Optimierung)
3	C (Thermo-Management)	B (Speicherüberhöhung)

Die programmatische Auslesung der Messdaten mittels Matlab erlaubt es auch, die Verläufe der Kennzahlen über mehrere Tage zu mitteln. Hierdurch ist es möglich, den Einfluss der Regelstrategien auf die Temperaturverläufe in den Gebäuden über unterschiedliche Wetterlagen hinweg darzustellen. In Abbildung 59 ist der gemittelte Verlauf der solaren Leistung sowie der Vorlauftemperatur und der gemittelten Raumtemperatur in den Gebäuden 1-3 im Zeitraum Januar - April 2021 dargestellt. Die Leistung der Solaranlage wird in den drei Gebäuden separat aufgezeichnet. Durch leicht unterschiedliche Aufzeichnungszeiten in den drei Gebäuden kommt es zu leicht unterschiedlichen Leistungsdaten, qualitativ stimmen die Messdaten der solaren Leistung in den drei Gebäuden gut überein.

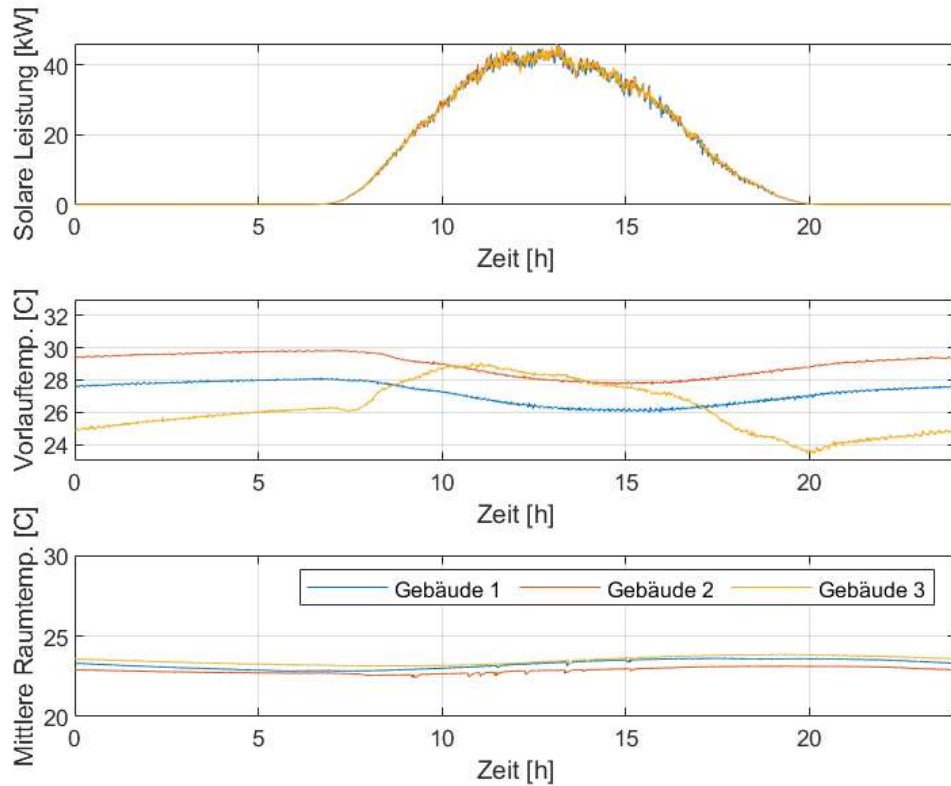


Abbildung 59: Gemittelte Verläufe der Solarleistung, der Vorlauftemperatur und der mittleren Raumtemperatur in den Gebäuden 1-3 im Zeitraum Januar - April 2021.

Die Temperaturverläufe in den drei Gebäuden sind im mittleren und unteren Teil von Abbildung 59 dargestellt. Die in der Auswertung der Smart Energy Engineering GmbH beschriebenen Einflüsse der Regelstrategien auf die Verläufe der Vorlauftemperatur und der mittleren Raumtemperatur werden in der Abbildung bestätigt. Zudem lässt sich erkennen, dass die durchschnittlichen Höhen der Vorlauftemperaturen der drei Gebäude in dem Zeitraum Januar-April 2021 nicht gleich sind. Mittelt man die Verläufe der Vorlauftemperaturen über den Tag, so erkennt man, dass die mittlere Vorlauftemperatur in Gebäude 2 am höchsten und im Gebäude 3 am niedrigsten ist. In kleinerem Ausmass lassen sich auch Unterschiede in der gemittelten Raumtemperatur feststellen. Hier ist der gemittelte Verlauf der gemittelten Raumtemperatur im Gebäude 3 am höchsten und in Gebäude 2 am niedrigsten.

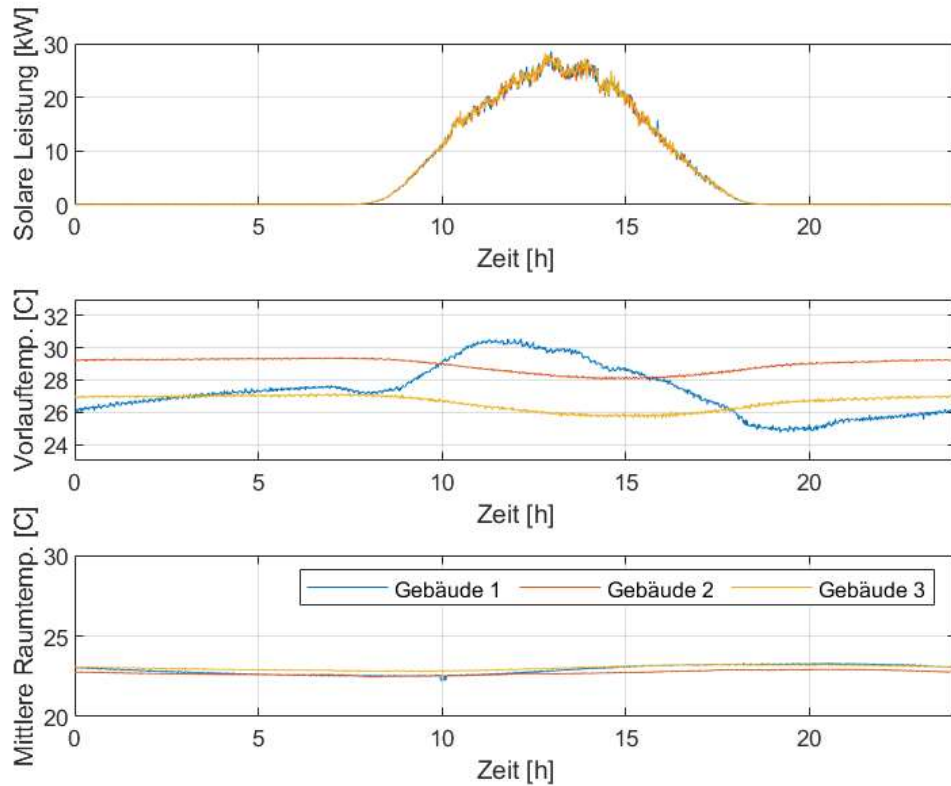


Abbildung 60: Gemittelte Verläufe der Solarleistung, der Vorlauftemperatur und der mittleren Raumtemperatur in den Gebäuden 1-3 im Zeitraum Oktober - Dezember 2021.

Die gleichen Daten sind in Abbildung 60 für den Zeitraum Oktober – Dezember 2021 dargestellt. Auch im Vergleich der Verläufe der Vorlauftemperaturen zwischen Abbildung 59 und Abbildung 60 lässt sich die im September vorgenommene Vertauschung der Regelstrategien zwischen den Gebäuden gut erkennen.

Die gemittelten Temperaturen beider Zeiträume sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Interessant ist hierbei folgender Aspekt: Trotz der Vertauschung der Regelstrategien bleibt die Reihenfolge der mittleren Höhe der Temperaturen der Gebäude bestehen: Der gemittelte Verlauf der Vorlauf-temperatur ist nach wie vor in Gebäude 2 am höchsten und im Gebäude 3 am niedrigsten. Ebenso ist der gemittelte Verlauf der gemittelten Raumtemperatur nach wie vor im Gebäude 3 am höchsten und in Gebäude 2 am niedrigsten.

Die Unterschiede in den gemittelten Raumtemperaturen zwischen den Gebäuden lassen sich durch ein unterschiedliches Heizbedürfnis der Bewohner der Gebäude erklären. Auch die Sonneneinstrahlung, die durch die unterschiedliche Orientierung der Gebäude unterschiedlich sein kann, kommt als Begründung in Frage. Weshalb die mittleren Vorlauftemperaturen der Gebäude unabhängig von der gewählten Regelstrategie unterschiedlich sind, ist jedoch aus den Daten nicht ersichtlich und hängt vermutlich mit den Einstellungen der Wärmepumpen zusammen.



Unabhängig vom Grund für diese Unterschiede haben die mittlere Raumtemperatur und die Vorlauftemperatur einen Einfluss auf Kennzahlen wie z.B. die Jahresarbeitszahl und plausibilisieren die in Abbildung 39 festgestellte Änderung der relativen Reihenfolge der Jahresarbeitszeiten zwischen den Gebäuden.

Tabelle 16: Gemittelte Vorlauf- und Raumtemperaturen der Gebäude 1-3 in den Zeiträumen Januar - April und Oktober – Dezember.

Ge- bäude	Mittlere Vorlauf- temperatur Januar- April 2021 [Grad C]	Mittlere Vorlauf- temperatur Okt. – Dez. 2021 [Grad C]	Mittlere Raumtem- peratur Januar- April 2021 [Grad C]	Mittlere Raumtem- peratur Okt. – Dez. 2021 [Grad C]
1	27.2	27.3	23.2	22.9
2	29.0	29.0	22.9	22.7
3	26.2	26.6	23.5	23.0



5 Schlussfolgerungen und Fazit

5.1 Wichtigste Resultate und Kennzahlen auf einen Blick

Durch die aktive Nutzung des Gebäudes als thermischer Speicher konnte der solare Deckungsgrad über das Jahr gesehen um den Faktor 2 erhöht werden und dies ohne Reduktion der Effizienz der Wärmepumpen (JAZ ca. 5). Im Gegensatz dazu konnte mit der heute üblichen Überhöhung der technischen Speicher nur ein Faktor von 1.2 erreicht werden und dies bei reduzierter Effizienz. Bei der Eigenverbrauchsoptimierung über Wärmepumpen ist also ein Paradigmenwechsel gefragt. Das Gebäude muss unbedingt in die Optimierung mit einbezogen werden. Gebäude in mittlerer und schwerer Bauweise mit guter Dämmung sind besonders gut geeignet dazu. Der Pufferspeicher kann nach Norm ausgelegt werden und muss nicht überdimensioniert werden, was wiederum Kosten und Platz spart.

Zudem konnte gezeigt werden, dass mit einer intelligenten Regelung der Komfort im Gebäude sogar noch leicht erhöht werden konnte, trotz gezielter Einspeicherung von Energie. Essenziell ist, dass die Raumtemperaturen aller Wohnungen erfasst und in der Regelung berücksichtigt werden. Auf diese Weise kann einer «Überhitzung» des Gebäudes aktiv entgegengewirkt werden.

Auch die automatische Adaption der Heizkurve über den Komfortwert (Fusspunkt) hatte einen klar positiven Effekt auf die Effizienz. Durch gezieltes Absenken oder Anheben der Heizkurve konnte der Regler optimal auf Störgrößen wie passive Sonneneinstrahlung oder längere Kälteperioden reagieren. Dadurch konnte die Heizkurve vorgängig optimal auf den effektiven Wärmebedarf des Gebäudes eingestellt werden (möglichst tief).

Bei der Brauchwarmwasserproduktion war die Optimierung wesentlich einfacher. Dort brauchte es im Prinzip nur ein festes Zeitprogramm, welches auf die PV-Produktionszeit am Tag abgestimmt wurde. Der Brauchwarmwasserspeicher wurde hier um den Faktor 2 überdimensioniert, um mit einer Tagladung durchzukommen (hier handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus, bei Einfamilienhäusern sind die Speicher nach Norm-Auslegung genügend gross dimensioniert). Auch die Abschaltung der Zirkulationspumpen nachts war sinnvoll und hat zu einer erheblichen Reduktion der Nachtladungen geführt und dies ohne spürbare Komforteinbussen. Dank der modernen Wärmepumpen konnten auch die nach der neuen SIA-Trinkwassernorm notwendigen Temperaturen im Speicher stets eingehalten werden. Auf Elektroeinsätze konnte vollständig verzichtet werden, was die Effizienz des Systems erheblich erhöhte.

5.1 Effizienz im Winter und Vergleich mit Batteriespeicher

Es konnte gezeigt werden, dass eine intelligente Regelung mit Thermomanagement den Netzbezug im Winter reduzieren kann. Hier konnte eine Reduktion um 10 Prozentpunkte erreicht werden. Wird eine solche Regelung in einer Vielzahl von Gebäuden eingesetzt, würde die energetische Netzbelastung im Winter schweizweit sinken. Noch erheblicher ist die Wirkung auf die leistungsmässige Netzbelastung. Bereits in der ersten Messperiode wurde gezeigt, dass im Prinzip innerhalb einem vorgegebenen «Leistungsband» gefahren werden kann. Die Lastpeaks können erheblich reduziert werden. In Hochlastphasen können die Wärmepumpen gezielt heruntergefahren und in den Tiefastphasen wieder hochgefahren werden. Im Zusammenhang mit dem grossen Speicherpotential der Gebäude ist das eine sehr kostengünstige, interessante Variante zur Stabilisierung des Stromnetzes in den kritischen Wintermonaten.



Als Vergleich wurde auch eine kurze Nutzenabschätzung eines stationären Batteriespeichers durchgeführt. Für die Eigenverbrauchsoptimierung wäre eine Kapazität von ca. 200 kWh notwendig. Aus den Daten wurde sofort ersichtlich, dass der Netzbezug im Winter nicht essenziell reduziert werden könnte. Aufgrund der langen Nebelperioden wäre der Speicher in den Wintermonaten fast immer leer, da kein solarer Überschuss vorhanden wäre. Dem verschwindenden Nutzen stehen sehr grosse Kosten und ein entsprechender ökologischer Fussabdruck entgegen. Batteriespeicher würden nur Sinn machen, um kurzfristige Peaks im Lastgang zu brechen, dazu sind aber heute die wirtschaftlichen Anreize noch viel zu gering.

5.2 Vorteil Monitoring

Einen wesentlichen Einfluss auf die Effizienz hat die optimale Einstellung der Wärmepumpe und der hydraulische Abgleich. Dieser Prozess wurde dank dem vorhandenen Monitoring-System mit Fernzugriff stark vereinfacht. Die Einstellungen konnten bequem aus der Ferne optimiert und die Reaktion des Systems über mehrere Tage «live» verfolgt werden. Vor Ort mussten nur noch Feinjustierungen vorgenommen werden.

Zudem konnte die Funktionsweise und Effizienz des Systems stets beobachtet und gegebenenfalls optimiert werden. Durch die laufende Aufzeichnung der Energiewerte, Leistungsdaten und Temperaturen war jederzeit ein Feedback vorhanden.

Auch für die Immobilienverwaltung hatte das System klare Vorteile. So konnte z.B. bei Reklamationen von einzelnen Bewohnern die entsprechenden Raumtemperaturen kontrolliert werden, was die Argumentation stark vereinfachte.

An einem frühen Sonntagmorgen konnte zudem der Ausfall einer Wärmepumpe frühzeitig erkannt werden, lange bevor es die Bewohner merkten. Durch einen rechtzeitigen Einsatz des Servicetechnikers am nächsten Tag konnte der Fehler an der Wärmepumpe behoben werden. Ohne das Frühwarnsystem wäre wertvolle Zeit verlorengegangen und es wäre zu unnötigen Reklamationen gekommen.

5.3 Effizienz versus Suffizienz

Das hier vorgestellte System wurde auf Effizienz getrimmt. Es kann aus Sicht der Autoren nicht mehr wesentlich gesteigert werden, sowohl von der Bauart der Gebäude, der Gebäudetechnik, wie auch der Regeltechnik her. Trotzdem gibt es aber noch erhebliches Potential zur Optimierung. Dieses betrifft klar das Verhalten der Bewohner. Hier waren deutliche Unterschiede erkennbar. Beim Energieverbrauch für Warmwasser wurden Unterschiede bis zu einem Faktor von 2.6 pro Person gemessen! Auch beim Heizen gab es einzelne Bewohner, welche schon bei Raumtemperaturen unterhalb von 23°C reklamierten und z.T. Elektroheizöfen einsetzten, um auf 25°C Raumtemperatur zu kommen. Obwohl dies nur Einzelfälle waren, hatten sie dennoch einen Einfluss auf das gesamte System. Auch der Stromverbrauch in den Wohnungen war sehr unterschiedlich und nahm in der zweiten Messperiode gegenüber der ersten deutlich zu (plus 10%). Offensichtlich hat sich hier ein «Rebound-Effekt» eingestellt. Das vorbildliche Verhalten der Bewohner in der ersten Messperiode nahm deutlich ab, trotz der immer noch gleichen Anreizsysteme.

Daraus ziehen die Autoren zwei wesentliche Schlussfolgerungen. Zum einen muss die Optimierung möglichst automatisch stattfinden. Dies wurde bei den Wärmepumpen umgesetzt. Der Faktor von zwei wäre nie zustande gekommen, wenn man hier die Benutzer durch manuelle Eingriffe hätte walten las-



sen. Zum anderen muss in Zukunft eine Sensibilisierung der Benutzer stattfinden. Das Thema «Suffizienz» muss ins Bewusstsein rücken. Wenn wir wirklich sparen wollen, müssen wir bereit sein, im Winter einen warmen Pullover anzuziehen und auf ein tägliches Vollbad zu verzichten.

5.4 Vergleich mit den übergeordneten Projektzielen

Gemäss Projekteingabe war in der zweiten Messperiode die Eigenverbrauchsoptimierung der Wärmepumpen im Vordergrund. Daraus ergaben sich folgende Fragestellungen, welche nun beantwortet werden können:

- Wie gross ist der quantitative Einfluss der Eigenverbrauchsoptimierung auf die ökologischen Kennzahlen und die Effizienz der Anlage? → Dank intelligenter Regelung konnten die ökologischen Kennzahlen (solarer Deckungsgrad) um den Faktor 2 gesteigert werden bei gleichbleibender Effizienz.
- Was bringt die thermische Speicherung in der Gebäudemasse? → Unter realen Bedingungen in bewohnten Gebäuden konnte um den Faktor 2 mehr Energie gespeichert werden. Damit konnte entsprechend mehr Solarstrom für die Wärmepumpen verwendet werden.
- Reicht eine Überhöhung der technischen Speicher? → Es konnte gezeigt werden, dass mit einer Überhöhung der technischen Speicher nur ein Steigerungsfaktor von 1.2 erreicht werden konnte. Das Potential ist also wesentlich kleiner, als wenn das gesamte Gebäude mit einbezogen wird.
- Was bringt die «intelligente» Optimierung der Wärmepumpen wirklich? → Dank der intelligenten Regelung konnte trotz der aktiven Speicherung von Energie im Gebäude der Komfort bezüglich Raumtemperaturen positiv beeinflusst werden.
- Was ist der Vorteil gegenüber einer «konventionellen» Optimierung (z.B. SG-Ready)? → Mit einer konventionellen Optimierung können nur Speicherüberhöhungen gefahren werden. Zudem ist die Einstellung bei SG-Ready sehr aufwändig, was hier stark vereinfacht wurde.
- Wie gross ist das Potential im Sommer, im Winter und in den Übergangszeiten? → Die Auswertungen haben gezeigt, dass das Potential in den Übergangszeiten am grössten ist. Aber auch im Winter war eine Reduktion des Netzbezugs möglich. Im Sommer war das Optimierungspotential am geringsten, da nur Brauchwarmwasser produziert wird. Mit aktiver Kühlung wäre auch der Sommerfall interessant.
- Was ist der Einfluss verschiedener Optimierungskriterien auf die Effizienz? → Dies wurde ausführlich behandelt mit den drei Gebäuden, in welchen verschiedene Regelstrategien liefen. Die Resultate wurden oben erwähnt.
- Wie weit kann ohne Komforteinbusse optimiert werden? → Dank den Raumfühlern und der Berücksichtigung in der Regelung waren keine Komforteinbussen erkennbar, im Gegenteil.

Insgesamt wurden die Erwartungen übertroffen. Insbesondere der positive Effekt auf den Komfort und die Effizienz waren neben den erreichten Steigerungsfaktoren eindrücklich.



6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesem Projekt flossen in die neuen «Planungsgrundlagen PV-WP» von Energie Schweiz. Die dort gezeigten Grundlagen zur Einbindung von Wärmepumpen wurden in Möriken 1:1 umgesetzt und das Potential des Thermomanagements konnte in der Praxis an real bewohnten Gebäuden eindrücklich messtechnisch nachgewiesen werden.

Aktuell wird im Verein «SmartGridReady» die Umsetzung des neuen Labels für Wärmepumpen mit intelligenter Schnittstelle durchgeführt. Dort werden zahlreiche Kenntnisse aus dem Projekt umgesetzt. Das Ziel ist ein Standard für die Zukunft, um die Einbindung von Wärmepumpen und anderen Geräten in Energiemanagementsysteme zu vereinfachen.

Im parallelen BFE-Projekt "Smarte Mobilität mit nachhaltigem E-Carsharing und bidirektionalem V2X" im Areal Erlenmatt Ost wurde die Elektromobilität mit bidirektionalen Ladestationen untersucht. Anstelle von stationären Batterien ist die Nutzung von Fahrzeugen als Batteriepuffer für die Bewirtschaftung der Gebäude sinnvoller. Damit können auch die Sektoren Mobilität und Gebäude optimal gekoppelt werden.

Im früheren BFE-Projekt «16A-Gebäude – Stromnetzstabilisierung und Nutzerbeeinflussung durch elektrische Leistungsbegrenzung für Gebäude» konnte simulationstechnisch gezeigt werden, dass die Anschlussleistung für Einfamilienhäuser begrenzt werden kann. Dort wurden noch Batterien verwendet. Im vorliegenden Projekt konnte diese Idee auf ein ganzes Areal erweitert werden. Es konnte gezeigt werden, dass auch ohne Batterien ein vorgegebenes Leistungsband eingehalten werden kann.

Als «Nebenprodukt» wurde im Verlaufe des Projektes ein neuartiges Monitoring-System für Gebäude entwickelt, welches den Verein «Minergie» zur Definition eines eigenen «Monitoring-Moduls» inspirierte. Alle grossen Bauten ab 2000m² Energiebezugsfläche mit Minergie-Label sowie kleinere Minergie-A-Bauten müssen heutzutage zwingend ein Monitoring-System haben. Der Nutzen eines solchen Systems wurde in diesem Projekt klar belegt.

Nach der Pilotphase wird das System in Möriken von der Firma Smart Energ Link AG übernommen. Die wesentlichen Ideen werden weitergeführt. Dazu gehört das farbliche Anreizsystem über die LED und das Thermomanagement der Wärmepumpen. Selbstverständlich bleibt auch der ZEV in der heutigen Form erhalten.

Durch die Zusammenarbeit mit diversen Vereinigungen und Organisationen war das Projekt zudem gut vernetzt. Dazu gehören Swissolar, FWS, Energie-Cluster, SuisseTec, KGTV, GKS, Brenet, Minergie, SmartGridReady, sia, Swissscleantech, Swiss-e-Mobility und diverse Architekten-Vereinigungen.



7 Kommunikation

Im Areal Möriken-Wildegg wurden zahlreiche Führungen durchgeführt für Interessierte, welche auf grossen Anklang stiessen. Zudem wurde das Projekt intern an die Mitbewohner kommuniziert.

Nach aussen wurden zahlreiche Vorträge, Tagungen und Seminare durchgeführt, in welchen das Projekt erwähnt wurde:

- Referat Eigenverbrauchsoptimierung, Zertifikatslehrgang CAS, HSLU, Februar 2022
- SIA 2063 Energiemanagementsysteme, Startsituation Vorprojekt, Januar 2022
- Minergie-Kurs Monitoring, Zürich, Dezember 2021
- Energie Zukunft Schweiz, Realtime Pricing, November 2021
- Energie Cluster, IG Speicher, November 2021
- Webinar «Gebäude & Mobilität», Swissolar, SmartGridReady, FWS, Swiss-e-Mobility, November 2021
- Tech Cluster Zug, «Multi Energy Hub», Oktober 2021
- Energie Zukunft Schweiz, Wärmepumpen-Pooling, Oktober 2021
- Brenet-Workshop «Event Network Series – Building-Related Multienergy Systems», September 2021
- Wärmepumpen-Tagung Burgdorf, Juni 2021
- Minergie-Kurs Monitoring, Online, Juni 2021
- Brenet-Status-Seminar, Sept. 2020: Erste Auswertung des innovativen ZEV-Areals in Möriken-Wildegg mit Strombörse
- Swissbau, Jan. 2020: Potentiale der Energieoptimierung Gebäude – Photovoltaik – Wärmepumpen
- Schweizer Planer-Tag, Brugg, Feb. 2019, Präsentation verteilte Intelligenz
- Serie Infoveranstaltung Fachstelle Energie, Kt. Aargau (Nov/Dez. 2019)
- Bau und Energiemesse Bern, Nov. 2019, Energiemanagement mit Eigenverbrauchsoptimierung
- Energie-cluster.ch, Zürich, Nov. 2019, Praxisbeispiel
- Hightech-Zentrum Aargau, Okt. 2019, Erkenntnisse aus dem BFE-Projekt in Wildegg
- Forum Energie Zürich, Fachgruppe Solararchitektur (Sept. 2019)
- Mehrere Besuchstage in Möriken, Sept/Okt. 2019, Vorstellung der Technik und Strombörse
- Offizielles Einweihungsfest in Möriken, Sept. 2019, mit Bertrand Piccard
- Tag der Sonne Sept. 2019, Areal Möriken
- Tag der offenen Türe, Möriken, Juni 2019
- Energie-Cluster 2018: Fallbeispiel für die Energiezukunft, Kurs Plusenergiegebäude
- Energie-Cluster 2018: Eigenverbrauch optimieren, neue Anreize auf der Anbieterseite
- Gebäudehülle Schweiz, EMPA NEST, 2018, Intelligente Regelungstechnik zur Optimierung des Eigenverbrauchs von Arealen, D. Zogg
- Hightech-Zentrum Aargau, Okt. 2018, Praxiszirkel Zusammenschlüsse zum Eigenverbrauch
- Brenet-Status-Seminar, Sept. 2018, Kurz-Vorstellung Projekt
- Tag der Sonne, Bern 2018, PV-Eigenverbrauchsoptimierung
- Swissolar, Bern April 2018, Nationale PV-Tagung, Vorstellung Leuchtturmprojekt Möriken AG
- 4 Events Energie-Cluster Nov. 2017: Kurs Plus-Energie-Gebäude, Vorgehen bei der Planung
- Bauschule Unterentfelden, Nov. 2017, Energie- und Lastmanagement in Plus-Energie-Bauten
- Baumesse Bern, Sept. 2017: Vorstellung Pilotprojekt Möriken-Wildegg
- Swissolar Zürich, Sept. 2017, Arbeitsgruppe solares Bauen, Energiemanagement im PEG
- Energie-Cluster, Bern, Sept. 2017, Veranstaltung "Monitoring und Optimierung in Gebäuden"
- Bundesamt für Energie, Bern, Sept. 2017, Mittagsveranstaltung: Vorstellung Projekt Möriken-Wildegg, Arealüberbauung mit innovativer Strombörse, D. Zogg



Zudem wurden zahlreiche Publikationen in Fachzeitschriften und Tageszeitungen veröffentlicht. Eine Auflistung der Publikationen befindet sich in Kapitel 8.

8 Publikationen aus dem Projekt

Eco2Friendly Magazin 1-22: Regelungstechnik für Wärmepumpen im Areal, D. Zogg

HK-Gebäudetechnik 1-22: Neue Planungsgrundlagen für die Kombination von Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen, Digitalisierung im Heizungskeller, D. Zogg & R. Kobler

Wärmepumpen und PV Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH) – EnergieSchweiz / BFE, 1.10.2021, D. Zogg

Wärmepumpen-Tagung Burgdorf 2021: Eigenverbrauchsoptimierung von Wärmepumpen im Areal über moderne Schnittstellen

HK-Gebäudetechnik 1-21: Auswertung der innovativen Areal-Überbauung in Möriken-Wildegg

BFE 11/2020: Areal Möriken-Wildegg mit innovativer Strombörse, Schlussbericht Phase I

EnergieSchweiz 08/2020: Wärmepumpen und PV – die clevere Kombination

Renggli, Faktor Raum 07/2020: Der Strom der Zeit, Setz Architektur AG

HK-Gebäudetechnik 11-19: Eigenverbrauchsmanager – Der Strom bekennt Farbe, D. Zogg

HK-Gebäudetechnik 10-19: PlusEnergie-Häuser mit modernstem Wohn- und Energiekonzept, P. Warthmann

Aargauer Zeitung, Okt 2019, Bertrand Piccard lobt Möriken-Wildeggs Solar-Pioniere

HK-Gebäudetechnik-2-19: Eigenverbrauchsoptimierung von Arealen mit verteilter Intelligenz, D. Zogg

Special HK-GT 3/4-19 Gebäudetechnik mit Elektromobilität, D. Zogg

Nachhaltiges Bauen, 3/2019, Den eigenen Strom optimal nutzen, Setz Architektur, Stiebel Eltron, Smart Energy Control et. al.

Aargauer Zeitung, Bauen Wohnen Renovieren, Sept. 2018: Die 101. Minergie-Zertifizierung von Setz Architektur AG – ein Leuchtturmprojekt

Architektur und Technik, Mai 2018, Durchdachte Energieeffizienz auch an Fassade, Möriken-Wildegg, Renggli AG / Setz Architektur AG

Bauen Wohnen Garten, März 2018: Das ist durchdachte Nutzung des Sonnenlichts, Setz Architektur AG / Immo Treier AG / Renggli AG

Schweizer Energie-Fachbuch, Dez. 2017: Durchdachte Energieeffizienz in Möriken AG, W. Setz

HK Gebäudetechnik 11/17: Vier MFH bestechen durch Nachhaltigkeit und durchdachte Energieeffizienz, W. Setz, D. Zogg

HK Gebäudetechnik 10/17: Win-Win-Situation für alle Beteiligten, D. Zogg

Wärmepumpentagung Burgdorf, Juni 2017: Areal-Überbauung mit Wärmepumpen und innovativer Strombörse, D. Zogg

Aargauer Zeitung, Juni 2017: Ein Spatenstich für die Energiezukunft

Lenzburger Bezirksanzeiger, Mai 2017: Startschuss und Spatenstich zur Arealüberbauung in Möriken-Wildegg



9 Literaturverzeichnis

- [1] BFE-Projekt «Innovative Eigenverbrauchsoptimierung für Mehrfamilien-Arealüberbauung mit lokaler Strombörse in Möriken-Wildegg – Phase I: Inbetriebnahme und erste Messperiode», Schlussbericht vom 30.11.2020, D. Zogg, H. Gysin, D. Zimmerli, <https://www.aramis.admin.ch/Dokument.aspx?DocumentID=66816>
- [2] BFE-Projekt «Optimierung des Eigenverbrauchs von Gebäuden OPTEG», Schlussbericht 2016, D. Zogg, <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=61161>
- [3] SIA 380/1:2016: Heizwärmebedarf von Gebäuden
- [4] SIA 384/1:2009: Heizungsanlagen in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen
- [5] SIA 384/2:2020: Heizungsanlagen in Gebäuden – Leistungsbedarf
- [6] SIA 384/3:2020: Heizungsanlagen in Gebäuden – Energiebedarf
- [7] SIA 385/1:2020: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden- Grundlagen und Anforderungen
- [8] SIA 385/2:2015: Anlagen für Trinkwarmwasser in Gebäuden- Warmwasserbedarf, Gesamtanforderungen und Auslegung
- [9] Wärmepumpen und PV Planungsgrundlagen für Wohnbauten (EFH und MFH) – EnergieSchweiz / BFE, 1.10.2021, D. Zogg, <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10636>
- [10] Minergie, 2017: Produktreglement zu den Gebäudestandards MINERGIE®/MINERGIE-P®/MINERGIE-A®, Version 2017.2, Verein Minergie
- [11] SG-Ready-Standard, 2013, Bundesamt für Wärmepumpen (bwp) Deutschland
- [12] Energie Schweiz: Solarstrom Eigenverbrauch, neue Möglichkeiten für Mehrfamilienhäuser und Areale
- [13] Energie Schweiz: Solarstrom Eigenverbrauch optimieren, Handbuch
- [14] Energie Schweiz / Swissolar, April 2019: Leitfaden Eigenverbrauch («ZEV-Leitfaden»)
- [15] OKEE-Projekt: Optimierung der Kopplung zwischen Elektrofahrzeugen und (Gebäude-) Energiemanagementsystemen - Ein innovatives Umsetzungsprojekt im Areal Erlenmatt Ost in Basel, ZHAW 11/2019, A. Roschewitz, J. Musiolik, D. Zogg et. al:
- [16] SmartGridReady für Anbieter von Systemen und Produkten, Verein SmartGridReady, Bern 2018, Ch. Brönnimann, J. Grossen et al.
- [17] SCCER Future Energy Efficient Buildings & Districts (2017 - 2020), speziell WP2 Building Energy Management, WP3 Urban Decentralized Energy Systems
- [18] CombiVolt: Analyse des Nutzens intelligenter Wärmepumpen-Steuerungen für PV-Eigenverbrauch und Netzstabilität durch Labortests und Simulationen (BFE 2019)
- [19] LEWASEF: Leistungsgeregelte Wärmepumpenanlage mit Solar-Eisspeicher und Fotovoltaik (BFE 2018)
- [20] 16A-Gebäude – Stromnetzstabilisierung und Nutzerbeeinflussung durch elektrische Leistungsbegrenzung für Gebäude (BFE-Programm Gebäude 2019).