

Hybrid-FLEX - Optimal charging of decentralised hot water storages

Robert Pratter¹, Thomas Nacht², Christian Halmdienst³

Kurzfassung: Um die europäischen und nationalen Klimaziele zu erfüllen, benötigt es eine Kombination aus Verbrauchseinsparung und verstärktem Einsatz von erneuerbaren Energieträgern. Der volatile und dargebotsabhängige Charakter der erneuerbaren Energieträger führt jedoch dazu, dass das Energiesystem zukünftig mehr Flexibilität auf der Verbraucherseite aufweisen muss. Um diesen und weiteren Anforderungen, wie der Minimierung der Verluste im Hausleitungssystem, genüge zu leisten, werden im Projekt Hybrid-FLEX die effizientere Gestaltung der Warmwasserversorgung in Mehrparteienwohnhäusern sowie die Anforderungen an Flexibilität adressiert. Dazu wurden mehrere Themenschwerpunkte ausgearbeitet, wobei der Themenschwerpunkt „Optimierung des PV-Einsatzes für die Wärmeerzeugung“ unter Einsatz einer Luft/Wasser-Wärmepumpe in diesem Beitrag im Detail behandelt werden soll.

Die Basis der Untersuchungen bildet das aktuell vom Projektpartner Pink vertriebene System enerboxx[®]. Dabei handelt es sich um dezentrale Warmwasserspeicher für Wohnungen in Mehrparteienwohngebäuden, welche von einem zentralen Wärmeerzeuger erhitzt werden. Durch die punktuelle Ladung der dezentralen Speicher sollen im Gegensatz zu herkömmlichen Systemen die Verluste in den Rohrleitungen deutlich reduziert werden, da das Rohrsystem nicht dauernd auf Temperatur gehalten werden muss. Aktuell erfolgt die Warmwasserbeladung der dezentralen Einheiten zu fix vorgegebenen Zeitpunkten. Der Beladungsprozess erfolgt dabei immer nach einem fixen Schema, der im Vorfeld der Inbetriebnahme auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst wird. Der Zeitpunkt der Ladung sowie die Lademenge soll zukünftig optimiert werden. Der optimierte Betrieb muss dabei eine Balance zwischen Erreichen der gewünschten Ziele (Optimierungsziel) und Komfortbeibehaltung (NutzerInnenziel) finden. Im Falle des Themenschwerpunktes Optimierung des PV-Einsatzes, wird anhand von Prognosedaten der Globalstrahlung und der Außenlufttemperatur das optimale Zeitfenster für den Betrieb der zentralen Wärmepumpe zur Maximierung des PV-Eigenverbrauchs ermittelt. Darüber hinaus wird ein Verfahren entwickelt, welches die Kapazitätsabschätzung der enerboxxen[®] erhöht.

Die ersten Simulationsergebnisse der PV-Eigenbedarfsoptimierung zeigen, dass mit dem enerboxxsystem die Verluste in den Verteilrohrleitungen im Vergleich zu einem Zirkulationssystem ohne Wohnungsspeicher deutlich gesenkt werden können. Für ein Szenario mit drei enerboxxen[®] und einer angenommenen Rohrlänge von 66 m können die Verluste beispielsweise um mehr als 30 % gesenkt werden. Durch die zusätzliche Optimierung der Beladungszeit sowie der Belademenge, lässt sich darüber hinaus eine Eigenverbrauchssteigerung der PV-Erzeugung um mehr als 10 % erreichen.

Keywords: dezentrale Warmwasserspeicher, Flexibilitäten, Eigenbedarfsoptimierung, Rohrverluste

¹ 4wardEnergy Research GmbH, Reininghausstraße 13A, 8020 Graz, 0664/88500337, robert.pratter@4wardenergy.at

² 4wardEnergy Research GmbH, Reininghausstraße 13A, 8020 Graz, 0664/88500336, thomas.nacht@4wardenergy.at

³ Pink GmbH, Bahnhofstraße 22, 8665 Langenwang, 06641434305, c.halmdienst@pink.co.at

1 Einleitung

Das europäische Klima- und Energiepaket sieht eine Reduktion der CO₂-Emissionen um 40 % (bezogen auf das Level von 1990) sowie eine Steigerung des Anteils der Erneuerbaren um 32 % bis zum Jahr 2030 vor. (Europäische Kommission, 2018) Darüber hinaus wird aktuell sogar die völlige Klimaneutralität Europas bis zum Jahr 2050 diskutiert. (Europäische Kommission, 2019) Um diese Ziele erreichen zu können, müssen in den nächsten Jahren weitreichende Maßnahmen gesetzt werden. Auch wenn die größten Herausforderungen zurzeit im Mobilitätssektor liegen, darf der Gebäudesektor nicht vernachlässigt werden. (Parlamentsskorrespondenz, 2018) Die Raumheizungen gemeinsam mit der Warmwasseraufbereitung in Gebäuden verursachen derzeit rund 16 % der österreichischen Treibhausgasemissionen in Sektoren außerhalb des Emissionshandels. Zudem sind Heizung, Warmwasser und Kühlung in Gebäuden für rund 27 % des gesamten österreichischen Endenergiebedarfs verantwortlich. Eine erfolgreiche Umsetzung der Klima- und Energiestrategie kann daher nur erfolgen, wenn beim Umbau der Energieversorgung auch ein Fokus auf den Wärmemarkt bzw. die Wärmeerzeugung und -verteilung in Gebäuden selbst, sowie in weiterer Folge auf die Verschränkung des Strom- und Wärmebereichs gelegt wird. Deshalb findet sich der Gebäudesektor auch in der österreichischen #mission2030 Strategie verstärkt wieder. So wird beispielsweise im 5. Leuchtturmprojekt: „Erneuerbare Wärme“ das Ziel, eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs in diesem Sektor zu erzielen, adressiert. Gleichzeitig soll der Anteil an erneuerbaren Energieträgern durch die Schrittweise Substitution fossiler Energieträger gesteigert werden. (BMNT & BMVIT, 2018)

Ungefähr jede zweite Wohneinheit in Österreich befindet sich in einem Mehrparteienwohnhaus mit mehr als zwei Wohneinheiten. Speziell im urbanen Umfeld ist der mehrgeschossige Wohnbau stark verbreitet. Ein Großteil dieser Gebäude ist zudem heutzutage zentral beheizt. (Zucha, et al., 2017). Vor allem wenn zusätzlich die Trinkwasserversorgung über Zirkulationsleitungen realisiert wird, treten oft hohe Verluste in den Zuleitungen zu diesen Wohneinheiten auf. Ein Umstand der durch den intelligenten Einsatz von dezentralen Speichern verringert werden kann. Somit können neuartige energietechnische Lösungen für diese Gebäude einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele liefern.

Um die Klimaziele zu erreichen, muss aber nicht nur der Verbrauch adressiert werden, auch die Erzeugung wird zukünftig einen hohen erneuerbaren Anteil aufweisen müssen. Ein Prozess der bereits in Gange ist. Um ein auf Erneuerbaren basierendes Energiesystem betreiben zu können, muss das Energiesystem zukünftig mehr Flexibilität auf der Verbraucherseite aufweisen. (Hübner, et al., 2017) Das wird vor allem durch den volatilen und dargebotsabhängigen Charakter der erneuerbaren Energieträger bedingt. Um diesen und weiteren Anforderungen, genüge zu leisten, werden im Projekt Hybrid-FLEX¹ die effizientere Gestaltung der Warmwasserversorgung in Mehrparteienwohnhäusern sowie die Anforderungen an Flexibilität adressiert.

¹ dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Energieforschungsprogramms 2016 durchgeführt

2 Technologisches Konzept der untersuchten Speicherlösung

Die sogenannte enerboxx[®] (Pink GmbH, 2020), ein dezentrale Wandspeicher für Geschosswohnbauten und Reihenhausanlagen, stellt die zentrale Komponente des betrachteten Systems dar. Der Wandspeicher, der in Abbildung 1a schematisch dargestellt ist, wird in jeder Wohnung installiert und über ein 2-Leiter Netz versorgt. Jede enerboxx[®] ist mit drei Temperatursensoren im Speicher (PT 1000) ausgestattet. Einer im oberen Bereich (bei ca. 35 l), einer im mittleren Bereich (bei ca. 75 l) und einer am Boden der enerboxx[®] (ca. 140 l). Darüber hinaus ist jeweils ein Temperatursensor im Vor- sowie im Rücklauf der enerboxx[®] verbaut. Abbildung 1b zeigt die Temperaturverteilung in einer enerboxx[®] der während eines Entladevorgangs mit einer Wärmebildkamera aufgenommen wurde. Es ist ersichtlich, dass durch das spezielle Design in Kombination mit einem Edelstahl-Wellrohr-Wärmetauscher, eine sehr gute Schichtung erreicht wird, die auch während des Entladevorgangs aufrecht bleibt

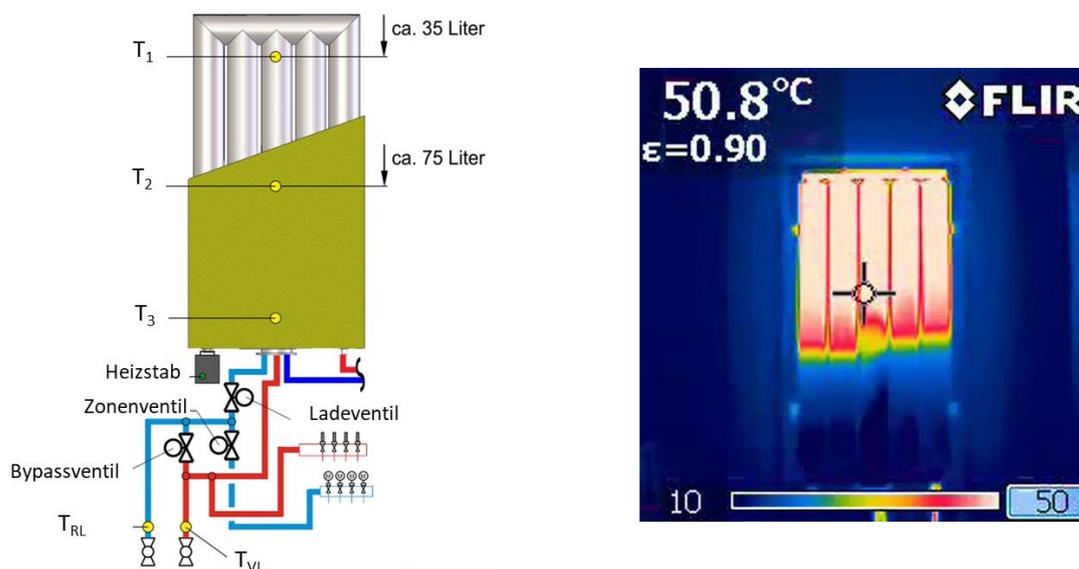


Abbildung 1 a: Position des Messequipments; b: Temperaturverteilung während eines Entladevorgangs in einer enerboxx[®] als Aufnahme einer Wärmebildkamera

Aktuell werden enerboxxen[®] zu zeitlich fixierten Ladefenstern beladen. Die Beladung je Zeitfenster erfolgt dabei in zwei Phasen, der Vorlade- und der Hauptladephase. Für die Vorladung werden die enerboxxen[®] in mehrere Gruppen unterteilt, die nacheinander beladen werden, um Ladespitzen zu vermeiden, die bei der gleichzeitigen Beladung von kalten Speichern auftreten können. Haben alle enerboxxen[®] eine bestimmte mittlere Temperatur über alle Temperaturschichten erreicht, werden diese in der Hauptladephase gemeinsam beladen. Während der Heizperiode muss die Hauptladephase zeitlich begrenzt werden, da das System neben der Warmwasser- auch für die Raumwärmebereitstellung verantwortlich ist. Diese erfolgt seriell und ohne Einbindung eines weiteren Speichers. Daher muss sichergestellt werden, dass die Raumwärmebereitstellung nicht zu lange von der Warmwasserbereitstellung unterbrochen wird. In diesem Fall besteht die Möglichkeit die enerboxxen[®] mit einem Heizstab zusätzlich weiter zu beladen, sollte unmittelbar eine größere Menge an Warmwasser benötigt werden. Damit soll sichergestellt werden, dass es zu keiner Zeit zu Einbußen des

NutzerInnenkomforts kommt. Diese Regelstrategie wird am sogenannten „Systemregler“ in Kombination mit einem CMI-Interface durchgeführt.

Im Zuge des Forschungsprojekts Hybrid-Flex werden die aktuell verwendeten Regelungskomponenten um das Energiemanagementsystem SEMS (LEVION Technologies GmbH, 2020) erweitert. Der „Systemregler“ der enerboxen[®] bezüglich Anzahl verwertbarer Signal- und Dateneingänge beschränkt und kann daher keine komplexen Optimierungsstrategien für die Beladung der enerboxen[®] ausführen. Die Erweiterung um SEMS erlaubt eben das und wird dazu genutzt, einen Optimierungsalgorithmus auszuführen, welcher zuvor in einer Simulationsumgebung entwickelt und erprobt wurde. Dazu werden die Messwerte vom Systemregler das CMI übergeben, mit externen Daten wie einer Wetterprognose kombiniert und daraus Empfehlungen für den optimalen Zeitpunkt der Beladungen generiert, welche wieder zurück an den Systemregler und in weiterer Folge an die enerboxen[®] übergeben werden. Was genau unter dem optimalen Zeitpunkt zu verstehen ist, wird in weiterer Folge noch erklärt, es ist auf jeden Fall möglich unterschiedliche Strategien für die Beladung zu verfolgen. Dieser Ansatz ermöglicht eine klare Abgrenzung zwischen dem Systemregler und dem Energiemanagementsystem SEMS, was technologische wie auch organisatorische Vorteile mit sich bringt. Außerdem hat dieser Ansatz den Vorteil, dass der Systemregler auch weiterhin unabhängig von der Optimierung funktioniert, in dem er auf die Standardregelstrategie (fixe Beladefenster) zurückgreift, falls kein oder ein fehlerhaftes Signal von SEMS übermittelt wird. Dadurch wird ein robustes Systemverhalten gewährleistet.

Im Projekt wurden verschiedenste Strategien zur Effizienzsteigerung der Wärmeversorgung von Mehrfamilienwohnhäusern mit Fokus auf dezentrale Speicherlösungen untersucht. Zu diesem Zweck wurden drei Szenarien definiert, welche sich signifikant hinsichtlich der Anwendung des Hybrid-FLEX Ansatzes unterscheiden. Diese sind (1) die Großstädtische Wärmeversorgung, (2) die Optimierung des PV-Einsatzes für die Wärmeerzeugung und (3) die dezentrale Wärmeversorgung unter Ausnutzung von elektrischen Flexibilitäten, wobei in diesem Beitrag der Fokus vor allem auf dem zweiten Szenario, der Optimierung des PV-Einsatzes für die Wärmeerzeugung, liegt. Der dafür notwendige Systemaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Als Wärmequelle wurde eine Luft/Wasser-Wärmepumpe in Kombination mit einer Photovoltaikanlage (PV) gewählt. Ziel ist es, einen möglichst großen Anteil der elektrischen Antriebsleistung der Wärmepumpe durch den PV-Überschuss (= PV-Erzeugung abzüglich Strom für Gemeinschaftsflächen) zu decken¹. Der zusätzlich benötigte Antriebsstrom wird aus dem öffentlichen Netz bezogen. Um die Zirkulation des warmen Mediums im gesamten Rohrsystem zu vermeiden, wurde eine hydraulische Weiche in das System integriert. Die Installation eines größeren Speichers anstatt der hydraulischen Weiche als zusätzliche Flexibilität in Kombination mit den dezentralen enerboxen[®] wurde im Zuge des Projekts Hybrid-Flex nicht untersucht, wird vom Projektteam aber als interessantes Szenario für weiterführende Untersuchungen angesehen.

¹ Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass das Projekt vor der Möglichkeit zur Errichtung gemeinschaftliche betriebener Erzeugungsanlagen (Mieterstrommodell) geplant und eingereicht wurde.

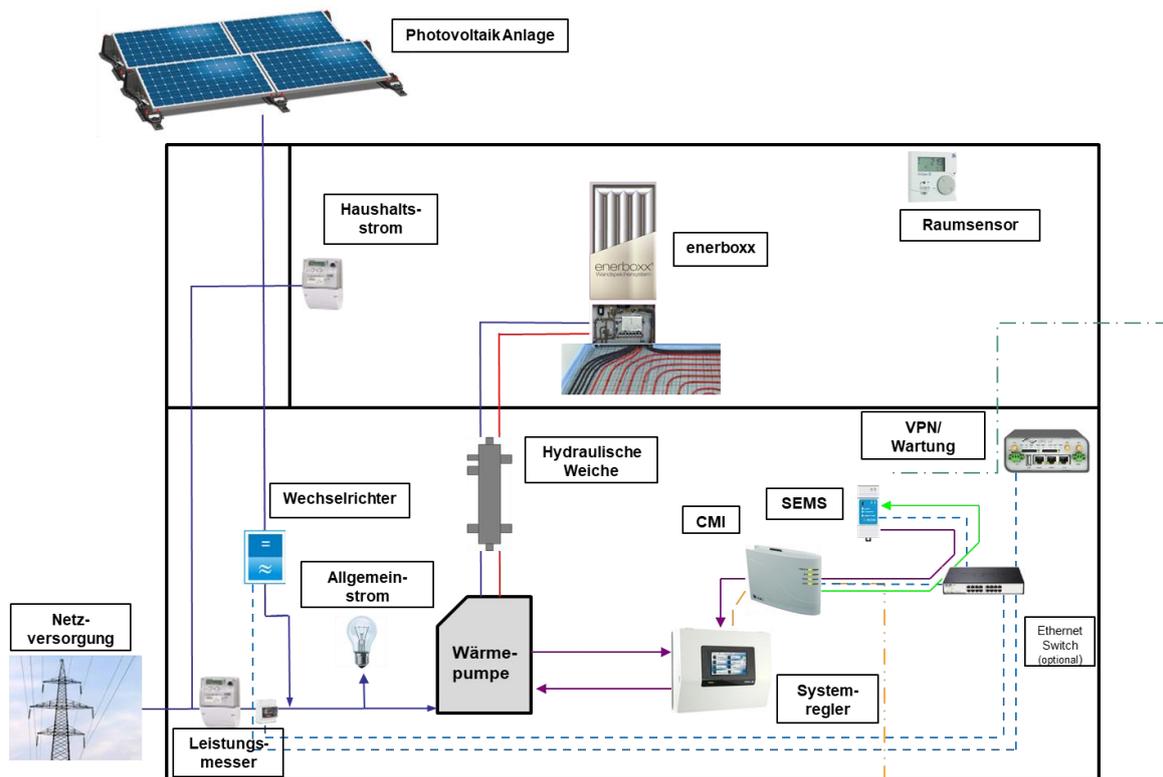


Abbildung 2: Systemkonfiguration für die Optimierung des PV-Einsatzes für die Wärmeerzeugung

3 Simulationsansatz

In der gegenwärtig verbauten Regelung werden die enerboxxen[®] zwei Mal am Tag zu fix vorgegebenen Uhrzeiten beladen, einmal in der Früh und einmal am späten Nachmittag/Abend. Das sind jene Zeiten, an denen in einem durchschnittlichen Haushalt die sogenannten Morgen- bzw. Abendspitzen auftreten, also der höchste Warmwasserbedarf besteht. (Neunteufel, et al., 2010) Dementsprechend macht es Sinn, dass die enerboxxen[®] zu diesen Zeiten einen hohen Energieinhalt aufweisen, um den NutzerInnenkomfort sicherzustellen. Allerdings trägt diese starre Regelung nicht zur Flexibilisierung des Verbrauchs bei. Um eine Flexibilisierung zu ermöglichen und den Eigenverbrauch erneuerbarer Energie zu steigern, wurde ein Optimierungsalgorithmus entwickelt, der eine intelligente Verschiebung der Ladefenster unter Berücksichtigung von zwischenzeitlich auftretenden Lastspitzen ermöglicht. Darüber hinaus wird als zweiter Optimierungsparameter die Belademenge der enerboxxen[®] adressiert. Zurzeit werden alle enerboxxen[®] in jedem Beladefenster komplett beladen. Durch die Einführung von zwei unterschiedlichen Betriebsmodi wird es dem Nutzer/ der Nutzerin ermöglicht, zwischen dem EGO-Modus und dem ECO-Modus zu wählen. Im EGO-Modus wird die Beladung weiterhin so durchgeführt wie bisher. Es ist also sichergestellt, dass die enerboxx[®] zweimal am Tag komplett beladen wird. Wird der ECO-Modus gewählt, wird ein Teilbereich des Speichers für die Beladung zu „bevorzugten Bedingungen“, wie z.B. zu Zeiten eines PV-Überschusses reserviert.

Die Untersuchung des Optimierungsansatzes erfolgt mit einer Co-Simulation der beiden Simulationsumgebungen simplex (Eigenentwicklung Pink) und MATLAB (MathWorks, 2019).

Während in MATLAB der Optimierer entwickelt wurde, wurde simplex zur Abbildung der Hardwarekomponenten wie der Wärmepumpe, den Rohrleitungen oder der hydraulische Weiche, sowie zur Simulation der aktuellen Regelstrategie genutzt. Außerdem stand in simplex bereits ein detailliertes und validiertes Modell einer enerboxx[®] aus einem früheren Projekt zur Verfügung. Die Simulation der gegenwärtigen Betriebsweise, wie sie bereits in mehreren Haushalten in Anwendung ist, kann also allein mit simplex durchgeführt werden. Um den Einfluss der dezentralen Speicher auf die Rohrleitungsverluste, sowie darüber hinaus die weiteren Verbesserungen, die durch die Optimierung erzielt werden können, unabhängig voneinander beurteilen zu können, wird die Simulation in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wird die aktuelle enerboxxregelung mit einem Zirkulationsleitungssystem verglichen und erst in der zweiten Stufe wird zusätzlich der Optimierungsansatz implementiert.

Für die Optimierung in MATLAB wird eine Wettervorhersage (Globalstrahlung, Außenlufttemperatur), der Ladestand der enerboxxen[®], sowie eine Abschätzung der benötigten Antriebsleistung der Wärmepumpe benötigt. Basierend auf der Wetterprognose wird der zu erwartende PV-Ertrag entsprechend den Inputparameter der PV-Anlage (z.B. Kollektorfläche, Ausrichtung, Neigung, Kollektortyp, etc.) berechnet. Dieser Aufbau ermöglicht die Analyse und Bewertung unterschiedlicher PV-Anlagengrößen. Die benötigte Antriebsleistung der Wärmepumpe wird vom Optimierer über ein hinterlegtes Kennlinienmodell unter Einbezug der prognostizierten Außenlufttemperatur abgeschätzt. Eine nicht modulierende Luft-/Wasserwärmepumpe wurde für die ersten Berechnungen gewählt. Der Ansatz für die Abschätzung des Ladestands der enerboxxen[®] sowie für die Optimierung selbst, wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

3.1 Beladestatus der enerboxxen[®]

Um die Optimierung der Ladefenster durchführen zu können, ist es wichtig die erwartende Laufzeit der Wärmepumpe möglichst genau abschätzen zu können. Diese hängt, neben der Außenlufttemperatur, die über die Wetterprognose bekannt ist, vor allem von dem Beladestatus der enerboxxen[®] ab. Daher ist es notwendig diesen möglichst gut ermitteln zu können. Wie in Abbildung 1a dargestellt sind die enerboxxen[®] mit drei Temperatursensoren im Speicher ausgestattet (bei ca. 75 %, 50 % und 0 % des Volumens). Außerdem verfügen die enerboxxen[®] wie in Abbildung 1b dargestellt über eine sehr gute Schichtung. Aus thermischer Sicht ist das sehr erstrebenswert, allerdings wird dadurch auch die Schwierigkeit der Ladezustandsabschätzung erhöht. Die Unsicherheitsbereiche bei einer quasi optimalen Schichtung, abhängig von den Messwerten (warm / kalt), sind in Tabelle 1 angegeben:

Tabelle 1: Unsicherheitsbereiche des Beladestatus abhängig von den Temperatursensoren

T ₃	T ₂	T ₁	Bereich der Beladung
↑	↑	↑	100 %
↓	↑	↑	50 – 99%
↓	↓	↑	25 – 49 %
↓	↓	↓	< 25 %

Da die Installation zusätzlicher Sensoren in der enerboxx[®] aus wirtschaftlichen Gründen vermieden werden soll, (Limit der transferierbaren Sensordaten bereits erreicht, etc.) wurde ein Ansatz entwickelt, um die Ladezustandsabschätzung zwischen den Temperatursensoren zu verfeinern. Dafür wird die tatsächliche Beladeenergiemenge eines jeden Beladezyklus nach Formel (1) berechnet. Der Wert wird für jede enerboxx[®], unterteilt nach Wochentag (Arbeitstag, Samstag, Sonntag), Ladefenster (Morgen, Abend) und gewähltem Belademodus (ECO, EGO), separat gespeichert. Daraus wird eine durchschnittliche Lademenge für jede Kombination berechnet. Die Temperatursensoren dienen dabei als „harte“ Grenzen. Wenn beispielsweise $T_2 = T_{ww}$ und $T_3 < T_{ww}$ ist, muss die Schichtungsgrenze zwischen den beiden Sensoren, sprich der Energiegehalt der enerboxx[®] zwischen 50 % und 99 % der maximalen Belademenge liegen. Aufbauend auf den so ermittelten Werten wird die zu erwartende Belademenge je Situation (Wochentag etc.) bestimmt. Eine ständige Anpassung dieser Werte durch tatsächliche Messungen ermöglicht eine immer genauere Abschätzung der Belademenge. Liegt die vermutete Belademenge für den Beladefall innerhalb der Grenzen (in diesem Beispiel zwischen 50 und 99 %), wird diese herangezogen, ansonsten wird der jeweilige Grenzwert (50 % bei einem Erwartungswert < 50 %) für die weitere Berechnung verwendet.

$$Q_{EB} = \dot{m} \cdot c_w \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \cdot t \quad (1)$$

Q_{EB}	Lademenge einer enerboxx [®] in kWh	T_{VL}	Vorlauftemperatur in K
\dot{m}	Massenstrom in kg/s	T_{RL}	Rücklauftemperatur in K
c_w	spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg*K)	t	Beladezeit in h

3.2 Optimierungsansatz

In dem in diesem Beitrag vorgestellten Szenario wird das Ziel verfolgt, die Startzeit des Beladeprozesses (= Zeitpunkt der Aktivierung der Wärmepumpe für die Brauchwassererzeugung) so zu verschieben, dass die Menge an PV-Überschuss der für die Brauchwassererzeugung verwendet wird, maximiert wird. Die Verschiebezeit ist jedoch auf einen bestimmten Zeitbereich limitiert, welcher individuell je nach den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Systems festgelegt werden muss. Die voreingestellten Ladezeiten (= Defaultwerte) entsprechen jenem Zeitpunkt, zu dem der Beladeprozess spätestens gestartet werden muss, um den Komfortansprüchen der NutzerInnen gerecht zu werden. Um das sicher zu stellen, müssen die Defaultwerte sorgfältig gewählt und ein

Verschieben des Beladestarts auf einen späteren Zeitpunkt verhindert werden. Das bedeutet, dass eine Verschiebung nur zu einem früheren Zeitpunkt möglich ist. Für die Optimierung in dem hier behandelten Szenario bedeutet das außerdem, dass eine Verschiebung der Morgenladung vernachlässigt werden kann, da diese nicht zu Zeiten mit einem (höheren) PV-Überschuss verschoben werden kann. In anderen Worten, nur die Abendladung wird in diesem Szenario optimiert. Um zu verhindern, dass die zweite Beladung unmittelbar nach der ersten erfolgt, kann eine Sperrzeit nach Ende einer Ladung definiert werden. Das Hinzufügen eines weiteren (dritten) Ladefensters wurde in dieser Optimierung nicht berücksichtigt, da die Beladung mit zwei Ladefenstern sehr gute Resultate, auch im Praxistest mit den bereits verbauten enerboxxsystemen, gezeigt hat.

Neben der Beladezeit wird die Belademenge als zweiter Parameter im Zuge der Optimierung adressiert. Über die zwei definierten Lademodi (ECO & EGO) kann eingestellt werden, ob die enerboxx® bei jeder Beladung vollständig beladen wird, oder ob ein Teilbereich (Bereich unter T_2) der enerboxxen® zur Optimierung zur Verfügung steht. In diesem Fall erfolgt die Beladung nur bei genügend großem PV-Überschuss. Mit diesem Ansatz kann die PV-Eigendeckung zusätzlich zur Verschiebung der Ladefenster noch weiter erhöht werden. Um ungewünschte Komforteinbußen durch nur halb geladene enerboxxen® zu vermeiden, wird die Auswahl des Betriebsmodus den NutzerInnen überlassen. Somit obliegt es ihnen, ob zeitweise ein halb geladener Speicher in Kauf genommen werden soll oder nicht. Eine enerboxx® hat ein Speichervolumen von ca. 140 l, was bedeutet, dass für die Morgen und Abendspitzen zumindest 70 l an Warmwasser zur Verfügung stehen.

Zur Maximierung der Eigendeckung wird der Start der Wärmepumpe für die Brauchwassererzeugung auf den „optimalen“ Zeitpunkt verschoben. Dazu wird anhand der ermittelten Belademenge der enerboxxen® und der Prognose der Außenlufttemperatur unter Verwendung des hinterlegten Kennlinienmodells ein sogenanntes „Profil“ der elektrischen Antriebsleistung der Wärmepumpe berechnet. Dieses Profil gibt die Laufzeit sowie die benötigte Antriebsleistung in jedem Zeitpunkt wieder und dient als Ausgangsbasis für die Optimierung. Die maximale Verschiebezeit wird durch die Sperrzeit nach der Morgenladung definiert. Der Optimierer verschiebt das Profil (und damit die Betriebszeit) der Wärmepumpe auf jenen Zeitbereich, bei dem die größte Menge an PV-Überschuss für den Betrieb der Wärmepumpe zur Verfügung steht ($Q_{cov} = \max$). Dieser Vorgang wird zweimal durchgeführt. Zuerst mit dem Profil der elektrischen Antriebsleistung der Wärmepumpe welches sich ergeben würde, wenn jede enerboxx® komplett beladen wird (länger Laufzeit). Wird ein definierter Anteil an Eigendeckung erreicht, wird die Optimierung mit diesem Betriebsprofil durchgeführt und auch die enerboxxen® im ECO-Modus werden vollständig beladen. Wird der gewünschte Anteil an Eigendeckung in diesem Beladefenster nicht erreicht, wird das zweite Betriebsprofil der Wärmepumpe für die Optimierung des Ladezeitpunktes herangezogen, bei dem die enerboxxen® im ECO-Modus nur halb beladen werden (kürzere Laufzeit). Der verwendete Optimierungsalgorithmus ist in Formel (2) angegeben:

$$\max_{t_{start_WP}} Q_{PV_i} = \sum_{t=i}^{t=i+t_{WP}} \min(\dot{Q}_{t_{PV}}, \dot{Q}_{t_{WP}}) \quad \text{mit } i \text{ von } t_{start_WP} - t_{max_shifting} \text{ to } t_{start_WP} \quad (2)$$

Q_{PV}

Anteil der Energie aus PV in kWh

t

Zeitschritt

$\dot{Q}_{t_{PV}}$	elektrische Leistung der PV-Anlage kW	t_{WP}	Laufzeit der Wärmepumpe in min
$\dot{Q}_{t_{WP}}$	elektrische Leistung der Wärmepumpe in kW	$t_{start_{WP}}$	Defaultwert Startzeit Wärmepumpe
$t_{max_shifting}$	maximale Verschiebezeit in min		

Die Variable $t_{start_{WP}}$ entspricht dem Defaultwert der Startzeit der Wärmepumpe bei dem der Beladeprozess spätestens gestartet werden muss und t_{HP} der erwarteten Laufzeit der Wärmepumpe, um die benötigte Warmwassermenge aufzubereiten. Wenn es mehrere Zeitpunkte gibt, an denen die gleiche Eigendeckung erzielt wird, was beispielsweise bei großen Überschüssen der Fall ist, wenn der gesamte Beladezyklus mit PV-Überschuss gedeckt werden kann, dann wird die Leistungsspitzenminimierung als zweites Kriterium herangezogen. In Abbildung 3a ist ein Beispiel für eine solche Optimierung dargestellt. Die ursprünglichen Ladefenster sind in diesem Beispiel um 5 Uhr in der Früh bzw. um 17 Uhr am Nachmittag, um rechtzeitig das benötigte Warmwasser für die erwarteten Morgen bzw. Abendspitzen bereitstellen zu können. Eine Verschiebung zu einem späteren Zeitpunkt ist nicht erlaubt, und eine Verschiebung der Morgenspitze zu einem früheren Zeitpunkt macht hinsichtlich des prognostizierten PV-Überschusses keinen Sinn. Daher ist die einzige Flexibilität, die vom Optimierer adressiert werden kann, die Abendladung, welche in diesem Beispiel auf 13 Uhr zu Mittag verschoben werden würde, was einer Verschiebezeit von 240 min entspricht. Die maximale Verschiebezeit wurde durch die gewählte Sperrzeit nach dem ersten Beladezyklus mit 360 min festgelegt. Der Algorithmus optimiert als erste Priorität die Eigendeckung der Antriebsenergie der Wärmepumpe mit PV-Strom. In diesem Fall gibt es mehrere mögliche Startpunkte mit der gleichen Eigendeckung (= 100 %). Daher wird also zweite Priorität die Spitzenlastreduktion angewandt, welche die Verschiebung auf 13 Uhr zur erwarteten Mittagsspitze und nicht beispielsweise auf 15 Uhr bestimmt. Die Abbildung 3b zeigt ein Beispiel für eine Szenario mit geringeren PV-Überschüssen. Während in Abbildung 3a jede enerboxx[®] komplett beladen wird (zusätzlich notwendige Energie dafür ist mit „ECO“ markiert) werden im Szenario in Abbildung 3b die enerboxxen[®] welche sich im ECO-Modus befinden nur teilweise beladen, was in eine geringere notwendige Energiemenge bzw. in eine kürzere Beladezeit resultiert. Wenn über den gesamten Verschiebezeitraum kein PV-Überschuss erwartet wird, werden die enerboxxen[®] zu den eingestellten Defaultzeit beladen.

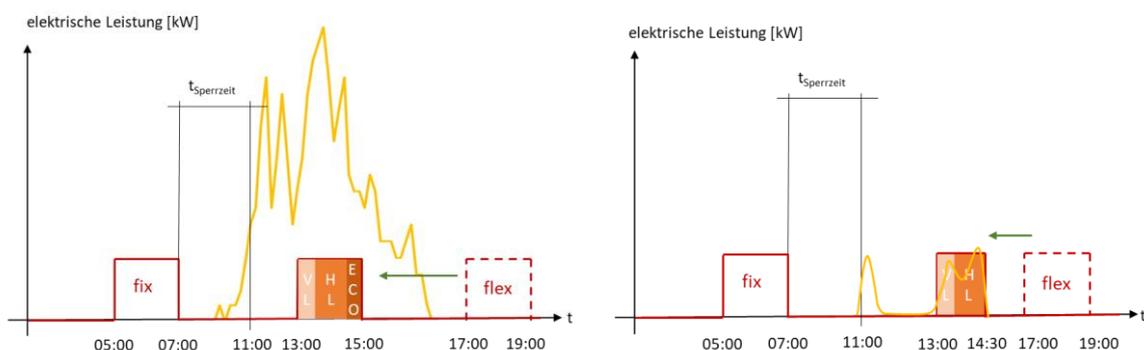


Abbildung 3: Beispiel für die Optimierung an einem Tag mit hohem PV-Überschuss (a) und einem Tag mit geringem PV-Überschuss (b)

4 Simulationsergebnisse

4.1 Ergebnisse des Beladestatus

Für die erste Bewertung des in Kapitel 3.1 beschriebenen Ansatzes zur Kapazitätsbestimmung der enerboxx[®] wurde ein Gebäude mit drei Wohneinheiten, die jeweils mit einer enerboxx[®] ausgestattet sind, angenommen. Weiters wurde ein Zapfprofil hinterlegt, welches jeden Tag ein sehr ähnliches Zapfverhalten aufweist. Abbildung 4 zeigt, den Vergleich zwischen tatsächlichem Speicherinhalt (nur in der Simulation ermittelbar) und dem Schätzwert gemäß dem hier präsentierten Ansatz bezogen auf den maximalen Energiegehalt der enerboxx[®] laut Formel (3). Es ist ersichtlich, dass nach einer anfänglichen Einschwingdauer die Abweichungen deutlich reduziert werden und ein guter Schätzwert für den Energieinhalt des Speichers vorliegt.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{SW} - Q_{tat}}{n * Q_{max}} \quad (3)$$

Q_{SW}	Schätzwert des Speicherinhalts einer enerboxx mit gewähltem Ansatz in kWh	n	Anzahl enerboxxen
Q_{tat}	tatsächlicher Speicherinhalt einer enerboxx in kWh	Q_{max}	maximaler Speicherinhalt einer enerboxx in kWh

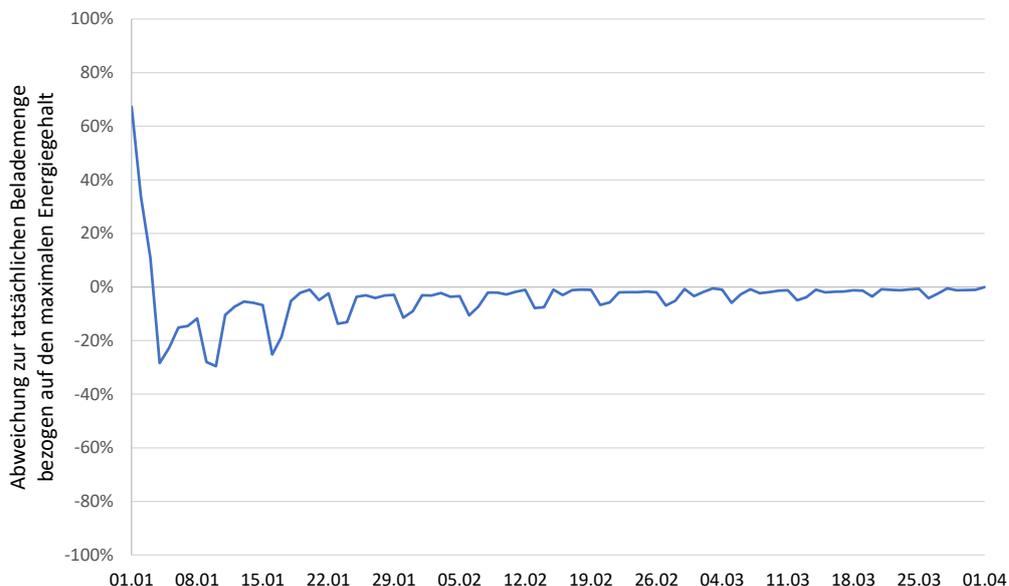


Abbildung 4: Abweichung zwischen der berechneten Lademenge und der tatsächlichen Lademenge zum Zeitpunkt des Beladestarts bei einem Zapfprofil mit einem wiederkehrenden Muster

Wird ein zufälliges Zapfprofil angenommen, zeigt sich, dass der Ansatz an seine Grenzen stößt und keine belastbare Schätzung für den Energieinhalt gemacht werden kann. Ein solches Beispiel ist in Abbildung 5 dargestellt. In diesem Fall würde die Annahme einer durchmischten enerboxx[®] und eine Kapazitätsabschätzung basierend rein auf den drei Sensorwerten der Temperatursensoren im Speicher eine ähnliche Genauigkeit aufweisen.

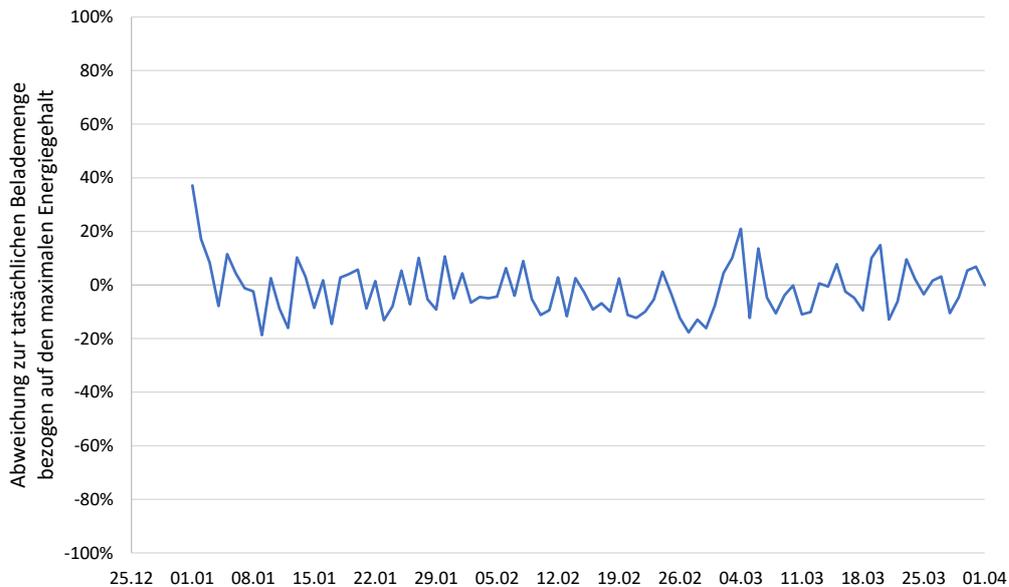


Abbildung 5: Abweichung zwischen der berechneten Lademenge und der tatsächlichen Lademenge zum Zeitpunkt des Beladestarts bei einem zufälligen Zapfprofil

Die Grenzen dieses Ansatzes müssen im Hinterkopf behalten werden. Da für die Optimierung jedoch eine Abschätzung ausreichend ist und mit den zur Verfügung stehenden Zapfprofilen in vielen Fällen gute Resultate erzielt wurden, wird dieser Ansatz weiterverfolgt.

4.2 Ergebnisse des Gesamtsystems

Die ersten Simulationsergebnisse der PV-Eigenbedarfsoptimierung zeigen, dass mit dem enerboxxsystem die Verluste in den Verteilrohrleitungen im Vergleich zu einem Zirkulationssystem ohne Wohnungsspeicher deutlich gesenkt werden können. Der Vergleich wurde zur besseren Veranschaulichung in zwei Stufen durchgeführt. In der ersten Stufe wird das Zirkulationssystem mit der herkömmlichen enerboxxregelung verglichen, wie sie aktuell bereits Anwendung findet. Erst im zweiten Schritt wurde der Optimierer implementiert, um dessen Einfluss besser ersichtlich zu machen. Für die Simulation wurde ein Mehrparteienhaushalt mit drei enerboxxen[®] und einer angenommenen Rohrlänge von 66 m gewählt. Die wichtigsten Simulationsergebnisse für alle drei Fälle sind in Tabelle 2 dargestellt. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Fälle zu gewährleisten wurde die PV-Anlage (3 kWp) sowie die Wärmepumpe (5 kW_{th}) in allen drei Fällen gleich gewählt. Im Referenzfall würde die Wärmepumpe eine elektrische Antriebsenergiemenge von 8,2 MWh benötigen, wobei 13 % davon von der PV-Anlage gedeckt werden. Außerdem wird eine Jahresarbeitszahl von ca. 2 erreicht. Die Rohrverluste betragen in diesem Fall 5,8 MWh im Jahr, wobei der Großteil davon auf die Rohrverluste (77 %) zurückzuführen ist. Außerdem bedeutet das, dass 36 % der von der Wärmepumpe bereitgestellten Wärmemenge als Verluste zu verbuchen sind.

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Simulationsergebnisse

	Zirkulationssystem	enerboxxen ohne Optimierung	enerboxxen mit Optimierung
Netzbezug [MWh/a]	7,11	5,07	4,74
elektrische Antriebsenergie [MWh/a]	8,20	5,52	5,54
Anteil PV-Energie an der Antriebsenergie [%]	13	8	14
Jahresarbeitszahl	1,98	2,61	2,60
Wärmemenge der Wärmepumpe (Sekundärseite) [MWh/a]	16,25	14,40	14,38
Rohrverluste [MWh/a]	4,52	2,91	2,91
Gesamtverluste [MWh/a]	5,84	4,02	4,02

Vergleicht man das mit den Simulationsergebnissen der enerboxxlösung ohne Optimierung, sieht man, dass die Rohrverluste deutlich niedriger sind. Das ist auf die Ladestrategie der enerboxxen[®] zurückzuführen, durch die die Rohrleitungen nur zweimal am Tag für einen kurzen Zeitraum erwärmt werden müssen. Da die enerboxxen[®] selbst nur sehr geringe Verluste aufweisen kann somit der Gesamtverlust deutlich reduziert werden. Wie in Tabelle 2 angeführt können die Verluste um 31 % auf ca. 4 MWh reduziert werden. Außerdem wird die Jahresarbeitszahl der Wärme-pumpe signifikant von 1.98 auf 2.6 erhöht, wodurch der Strombedarf der Wärmepumpe von 8,2 MWh auf 5,5 MWh sinkt. Bei einem größeren Wohnhaus schlagen sich diese Vorteile noch deutlicher zu buche.

In Abbildung 6 ist schlussendlich das Ergebnis der optimierten enerboxxregelung zu sehen. Es zeigt sich, dass die Optimierung keinen weiteren Einfluss auf die Rohrverluste hat, jedoch den Anteil an Erneuerbaren deutlich erhöht wird. Durch die Optimierung der Beladungszeit, kann der Eigenverbrauch der PV-Erzeugung um 10 % gesteigert werden, was zeitgleich einer Steigerung des PV-Anteils der elektrischen Energie der Wärmepumpe um 6 % entspricht.

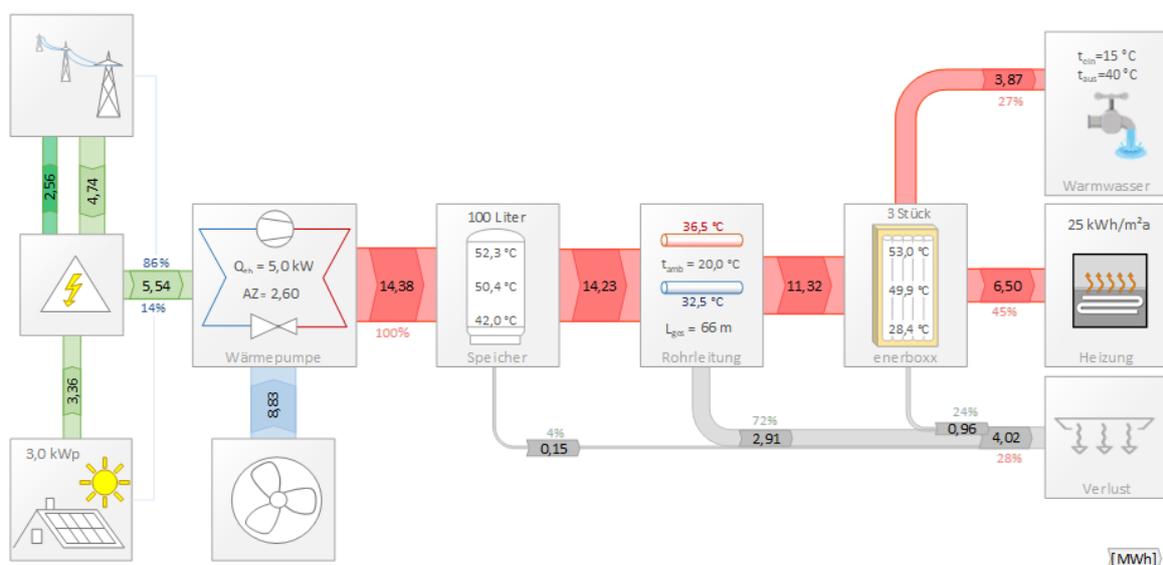


Abbildung 6 Ergebnisse bei dem Einsatz der optimierten enerboxxen[®]

In Summe lassen sich also durch die Installation der enerboxxen® und durch den Einsatz des Optimierers bereits bei einem kleinen Mehrparteienwohnhaus mit nur 3 enerboxxeinheiten wesentlich Verbesserungen erzielen. So können die Rohrverluste um 31 % von 5,8 MWh auf 4,0 MWh sowie der Strombedarf um 32 % von 8,2 MWh auf 5,5 MWh gesenkt werden. Darüber hinaus erhöht sich die Jahresarbeitszahl von ca. 2 auf 2,6. Diese Resultate sind in Abbildung 7 veranschaulicht. Die ebenfalls dargestellte Steigerung des Eigenverbrauchs bezieht sich auf die beiden enerboxxfälle. Der Referenzfall mit Zirkulationsleitung weist einen höheren Eigenverbrauch als die enerboxxen® ohne Optimierung auf, jedoch zum Preis eines weit höheren Energiebedarfs (vgl. Tabelle 2).

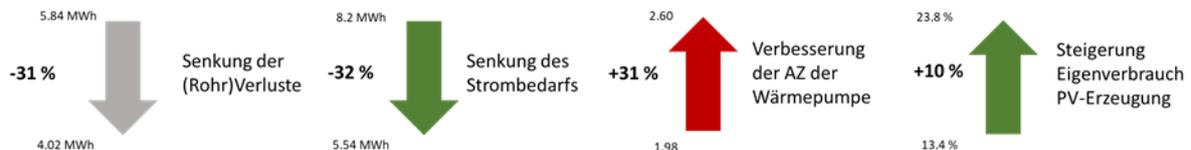


Abbildung 7: Verbesserung ausgewählter Kennzahlen durch den Einsatz der optimierten enerboxxen®

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Wie sich anhand der Simulationsergebnisse zeigt, lassen sich durch den Einsatz der enerboxxen® die Rohrleitungsverluste deutlich reduzieren. Bei einer angenommenen Rohrleitungslänge von 66 m verringern sich diese um 31 % von 5,8 MWh auf 4 MWh pro Jahr. Durch die zusätzliche Implementierung des Optimierers, wird darüber hinaus der Anteil an Erneuerbaren wesentlich gesteigert (+10 %). Diese Resultate beziehen sich auf ein Gebäude in dem drei enerboxxen® verbaut sind. Da der Einsatz der enerboxxen® auch in weit größeren Gebäuden möglich ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Vorteile dieses Systems dort noch deutlicher zum Tragen kommen. Im Zuge des Projekts Hybrid-Flex sollen daher in den nächsten Monaten einige Variantenrechnungen durchgeführt werden, die die Auswirkungen der enerboxxen® auf verschiedene Gebäude, Nutzer und PV-Anlagen Kombinationen aufzeigen. Darüber hinaus soll die Auswirkung der Integration der enerboxxen® gemeinsam mit einem Mieterstrommodell untersucht werden, da sich gezeigt hat, dass aktuell der Großteil des PV-Ertrags in das öffentliche Netz eingespeist wird, wenn damit nur die Antriebsleistung der Wärmepumpe sowie der Allgemeinstrom gedeckt werden.

Außerdem soll der Optimierungsalgorithmus für die beiden anderen Szenarien (1) Großstädtische Wärmeversorgung sowie (3) Flexibilitätsnutzung für den optimierten Stromeinkauf bei variablen Tarifen adoptiert werden. In beiden Fällen wird angenommen, dass einmal täglich ein Preissignal für die nächsten 24 h übermittelt wird, welches als Grundlage für die Optimierung dient. Die Verschiebung der Beladefenster erfolgt hin zu den niedrigsten Preisen. Die Aktivierung des ECO-Modus wird von einer Preisgrenze abhängig gemacht werden. Neben der Bewertung der Kosteneinsparungen und der Verringerung der Rohrleitungsverluste werden darüber hinaus vor allem für der großstädtischen Wärmeversorgung die technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen untersucht, um Aufzuzeigen, welche neuen Möglichkeiten sich durch einen solchen flexiblen Tarif für die Fernwärmeversorger ergeben könnten.

6 Literaturverzeichnis

BMNT & BMVIT. 2018. *#mission2030*. Wien : Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus & Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2018.

Europäische Kommission. 2018. 2030 climate & energy framework. [Online] 2018. [Zitat vom: 28. 01 2020.] https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en.

Europäische Kommission. 2019. Den Weg für eine klimaneutrale EU bis 2050 ebnen. [Online] 2019. [Zitat vom: 28. 01 2020.] https://ec.europa.eu/environment/efe/news/leading-way-climate-neutral-eu-2050-2019-08-26_de.

Hübner, Michael, Wedler, Michael und Ganglberger, Erika. 2017. *Betrachtung von Flexibilitätspotenzialen für die Umsetzung von Smart Grids in Österreich*. s.l. : BMVIT, 2017.

LEVION Technologies GmbH. 2020. SEMS Smart Energy Management System. [Online] 2020. [Zitat vom: 28. 01 2020.] <https://www.sems.energy/>.

MathWorks. 2019. *Matlab* . Boston : s.n., 2019.

Neunteufel, Roman, Laurent, Richard und Perfler, Reinhard. 2010. *Studie Wasserverbrauch und Wasserbedarf* . Wien : Lebensministerium, 2010.

Parlamentsskorrespondenz. 2018. *Klimaziele: Österreich muss noch mehr tun* (Parlamentsskorrespondenz Nr. 912). https://www.parlament.gv.at/PAKT/PR/JAHR_2018/PK0912/ : s.n., 2018.

Pink GmbH. 2020. enerboxx - Wandspeichersystem. [Online] 2020. [Zitat vom: 28. 01 2020.] <http://www.pink.co.at/enerboxx.htm>.

Zucha, Vlasta, et al. 2017. *WOHNEN Zahlen, Daten und Indikatoren der Wohnstatistik*. Wien : Statistik Austria, 2017.