



## Schlussbericht

# WarmUp Phase 3

## Optimale Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern





**Datum:** 14.09.2018

**Ort:** Visp

**Subventionsgeberin:**

Schweizerische Eidgenossenschaft, handelnd durch das  
Bundesamt für Energie BFE  
Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprogramm  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Subventionsempfänger:**

Misurio AG  
Bahnhofplatz 1a  
CH-3930 Visp  
[www.misurio.ch](http://www.misurio.ch)

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ewz  
CH-8050 Zürich  
[www.ewz.ch](http://www.ewz.ch)

**Autoren:**

Pascal Imhof, Misurio AG, [pascal.imhof@misurio.ch](mailto:pascal.imhof@misurio.ch)  
Andreas Suter, ewz, [andreas.suter@ewz.ch](mailto:andreas.suter@ewz.ch)

**BFE-Programmleitung:** Dr. Yasmine Calisesi, [yasmine.calisesi@bfe.admin.ch](mailto:yasmine.calisesi@bfe.admin.ch)

**BFE-Projektbegleitung:** Dr. Michael Moser, [michael.moser@bfe.admin.ch](mailto:michael.moser@bfe.admin.ch)

**BFE-Vertragsnummer:** SI/501383-01

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

**Bundesamt für Energie BFE**

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · [contact@bfe.admin.ch](mailto:contact@bfe.admin.ch) · [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)



## Zusammenfassung

Warmwasserspeicher und die thermische Trägheit von Gebäuden bieten ein grosses Potential an Flexibilität. Diese Art von Energiespeicher ist bereits heute in grosser Zahl vorhanden und bietet sich fürs Lastmanagement an. Die thermische Trägheit von Gebäuden erlaubt es, die Wärmeerzeugung zeitlich zu verschieben, ohne dass der Wärmekomfort beeinträchtigt wird. Die flexible Steuerung von Wärmepumpen kann für vielerlei Anwendungen im Stromsystem eingesetzt werden. Mit einem ganzheitlichen Ansatz können Kosten, Effizienz, Ökologie und Komfort optimiert werden.

Das WarmUp Projekt untersucht, wie die Flexibilität von thermischen Speichern wirtschaftlich optimal verwertet werden kann. Basierend auf den Ergebnissen aus WarmUp 1 wurde im Rahmen einer zweiten Phase ein Proof of Concept auf einer Anlage aus dem Contracting-Pool von ewz realisiert. Das Konzept aus Phase 1 konnte umgesetzt werden und die Optimierungskaskade funktioniert über alle Stufen bis hin zur Umrechnung auf Sollwerte für die einzelnen Anlagen. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Flexibilität existiert und genutzt werden kann. Es konnten zahlreiche wertvolle Erfahrungen mit der Anbindung von Wärmepumpen gesammelt werden. Damit zukünftig Anlagen einfacher eingebunden werden können, wurden Empfehlungen erarbeitet (WarmUp-ready Kriterien).

Mit dem Start von WarmUp 3 im Jahr 2016 wurde die dritte Phase des Projektes eingeleitet. Ein Pool bestehend aus 4 Anlagen aus dem ewz Contracting konnte erfolgreich aufgebaut werden. Die Anlagen sind von unterschiedlicher Grösse und unterschiedlicher Komplexität und wurden bis zum 28.02.2018 im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben.

## Résumé

Les réservoirs d'eau chaude et l'inertie thermique des bâtiments présentent un gros potentiel de flexibilité. Ce type de stockage d'énergie est disponible en grande quantité dès à présent et est parfaitement adapté pour la gestion de la demande. L'inertie thermique des bâtiments permet de décaler dans le temps la production de chaleur, et cela sans affecter le confort thermique. Le contrôle flexible des pompes à chaleur peut être utilisé pour de multiples applications dans le système électrique. Une approche globale permet d'optimiser les coûts, l'efficacité, l'écologie et le confort.

Le projet WarmUp cherche à exploiter de manière optimale la flexibilité des réservoirs thermiques. Forte des résultats de WarmUp 1, cette deuxième phase a consisté en la réalisation du Proof-of-Concept sur une installation du Contracting-Pool d'ewz. Le concept de la phase 1 a pu être mis en pratique et la chaîne d'optimisation fonctionne à tous les niveaux, jusqu'au calcul des valeurs de consigne pour les machines. Il a pu être prouvé que la flexibilité existe et peut être exploitée. De nombreuses et précieuses expériences ont été récoltées au niveau du contrôle des pompes à chaleurs. Des recommandations (critères WarmUp-ready) ont été émises pour que les installations futures puissent être intégrées plus facilement.

La troisième phase du projet, intitulée WarmUp 3, a débuté en 2016. Un pool composé de 4 installations sous contrat avec EWZ a pu être constitué avec succès. Ces installations, de tailles et de complexités différentes, ont opéré en mode WarmUp jusqu'au 28.02.2018.



## Abstract

Hot water tanks in and the thermal inertia of buildings offer a great potential in flexibility. This type of energy storages is already largely available and can be utilized for load management. Thermal inertia of buildings enables heat generation to be shifted in time without affecting the heat comfort within the buildings. Flexible control of heat pumps can be used for various application in the power system. With a holistic approach cost, efficiency, ecology and comfort can be optimized simultaneously.

The WarmUp project investigates how the flexibility offered by thermal storages can be used optimally. The second phase of the project is a proof of concept in which the findings of WarmUp 1 are implemented on one of the energy systems in the contracting pool of ewz. The approach of the first phase could be implemented and the optimization sequence works well over all stages up to the conversion to set points for the machines. It is shown that the flexibility exists and can be utilized. Numerous valuable experiences were gathered with the connection of heat pumps. Recommendations are given such that future systems can be connected more easily (WarmUp ready criteria).

With the launch of WarmUp 3 in 2016, the third phase of the project was initiated. A pool of 4 systems from ewz Contracting was successfully set up. The systems are of different size and complexity and were operated in the warm-up mode until 28.02.2018.



# Inhaltsverzeichnis

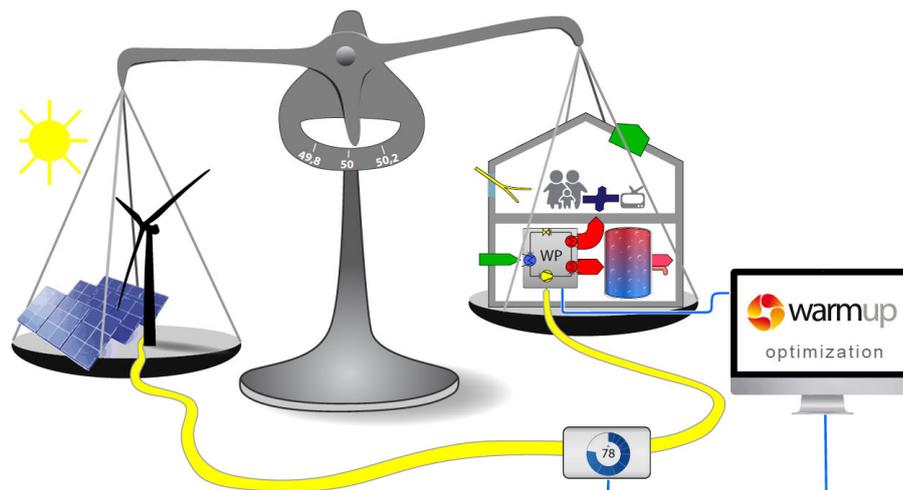
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Ausgangslage</b> .....	<b>6</b>
1.1 Motivation .....	6
1.2 Stakeholder im Projekt.....	7
1.3 Ergebnisse aus WarmUp 1 .....	8
1.4 Ergebnisse aus WarmUp 2 .....	9
<b>2 Ziele der Arbeit</b> .....	<b>10</b>
<b>3 Konzept</b> .....	<b>12</b>
3.1 Ganzheitliche Betrachtung.....	12
3.2 Optimierung.....	13
3.2.1 Modellierung.....	13
3.2.2 Optimierungskaskade .....	14
<b>4 Resultate</b> .....	<b>17</b>
4.1 Auswahl der Anlagen und Planung der Anbindung .....	17
4.2 Schnittstellen Handel, Netz, Leitsystem, Anpassung WebGUI.....	17
4.3 Integration von weiteren Anlagen .....	17
4.4 Betriebsphase inkl. Messung Erfolgskontrolle .....	18
4.4.1 Erste Anlage.....	19
4.4.2 Zweite Anlage .....	26
4.4.3 Dritte Anlage .....	33
4.5 Technologietransfer, Beitrag zur Standardisierung, „WarmUp-Ready“ .....	40
4.5.1 Must have.....	40
4.5.2 Nice to have .....	40
<b>5 Schlussfolgerungen</b> .....	<b>41</b>
<b>6 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>44</b>



# 1 Ausgangslage

## 1.1 Motivation

Die Integration einer grossen Menge an stochastischen Energiequellen im Zuge der Energiewende ist ein anspruchsvolles Ziel. Damit ein elektrisches Energiesystem mit einem hohen Anteil an Wind- und Solarenergie betrieben werden kann, bedarf es zusätzlicher Flexibilität. Eine interessante Option in diesem Zusammenhang sind thermische Speicher. Einerseits sind diese bereits heute in einer grossen Zahl vorhanden (Warmwasserspeicher, Gebäudemasse als thermischer Speicher). Andererseits macht die Erzeugung von Wärme (Raum- und Prozesswärme sowie Warmwasser) einen Anteil von fast 50 % am inländischen Endenergieverbrauch aus [1]. Mit Lastmanagement kann die Flexibilität von thermischen Speichern optimal genutzt werden, um Fluktuationen von neuen erneuerbaren Energien auszugleichen. „Demand Response“ ist in den letzten Jahren zu einem der wichtigsten Themen in der elektrischen Energieversorgung geworden.



**Abbildung 1: Grundidee von WarmUp: Nutzung der Flexibilität von thermischen Speichern zu Gunsten des elektrischen Energiesystems**

Im WarmUp Projekt wird die thermische Speicherkapazität der Gebäudemasse und der Warmwasserspeicher als Puffer genutzt, um Wärmepumpen flexibel zu betreiben. Dank der thermischen Trägheit von Gebäuden kann die Wärmeerzeugung mit den Wärmepumpen zeitlich verschoben werden, ohne dass der Wärme komfort beeinträchtigt wird. Die flexible Steuerung der Wärmepumpen wird für verschiedene Anwendungen genutzt. Beispielsweise kann der Wärmebedarf dann gedeckt werden, wenn die Strompreise tief sind. Den steilen Rampen der PV-Einspeisung kann mit Lastmanagement besser entgegengewirkt werden, als dies fossile Kraftwerke können. In Zeiten hoher Lastspitzen kann die Last durch Ausschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz können durch Zuschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Durch Einbezug von Wetterprognosen und Bedarfsmodellen kann die Wärmeerzeugung vorausschauend agieren und möglicherweise Effizienz sowie Komfort steigern.



WarmUp leistet in mehrerer Hinsicht einen Beitrag zu einem nachhaltigen Energiesystem. Die effiziente Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen wird kombiniert mit einer flexiblen Steuerung. Letzteres unterstützt die Markt- und Netzintegration von fluktuierenden erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik. WarmUp zeichnet sich durch ein mehrstufiges stochastisches Optimierungsmodell aus, welches auf das Schweizerische Marktumfeld zugeschnitten ist. Die Verwertung der Flexibilität ist auf mehreren Ebenen möglich. Einerseits kann die Beschaffung an der Energiebörse optimiert werden und andererseits können Kosten für Ausgleichsenergie und Netznutzung reduziert werden. Oberste Priorität bei der flexiblen Steuerung der Wärmepumpen hat die Gewährleistung des Wärmekomforts der Gebäudenutzer.

Neben den Ertragsmöglichkeiten sind im Rahmen des WarmUp-Projektes auch die Kosten für die Infrastruktur (Kommunikation, Überwachung, Steuerung) sowie die Betriebskosten zu bestimmen. Das Potential der Gebäudeinfrastruktur für die zukünftige dezentrale Energieversorgung ist gross. Die Gebäudeoberfläche absorbiert Sonnenstrahlung. Das Gebäude speichert Wärme. Die Heizungsinfrastruktur kann genutzt werden, um thermische Speicher (technischer Speicher, Gebäudemasse, Verteilsystem, etc.) zu bewirtschaften. Für Energiedienstleister öffnet sich ein breites Feld von neuen Dienstleistungen. Das Projekt soll wertvolle Grundlagen für die Ausgestaltung von Anreizsystemen, um die erforderlichen Massnahmen und Investitionen auszulösen, liefern.

Das Potential von thermischen Speichern kombiniert mit der richtigen Betriebsweise ist für das zukünftige Energiesystem von grosser Bedeutung. Der Bezug von nachhaltig produzierter Wärme und Kälte aus Wärmepumpen mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen leistet einen wertvollen Beitrag zur Energiewende. Dank WarmUp wird Flexibilität für die Integration von neuen erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik nutzbar gemacht.

## 1.2 Stakeholder im Projekt

Das Projekt WarmUp strebt eine ganzheitliche Betrachtung der Optimierungsmöglichkeiten an. Als Folge davon sind zahlreiche Interessengruppen in das Projekt involviert. Zu den involvierten Stakeholdern gehören:

- Energielieferant (z. B. ewz Energielösungen / -dienstleistungen (Anlagenbetreiber), ewz Handel / Energiewirtschaft)
- Netzbetreiber (z. B. ewz Verteilnetz, swissgrid)
- Wärmebezügler
- Entwickler und Betreiber des Energie-Management-Systems (z. B. Misurio, MST)
- Drittfirmen (z. B. Lieferant bisheriges Gebäudeleitsystem, Prognoselieferanten, EPEX Spot)

Die verschiedenen Stakeholder haben unterschiedliche Erwartungshaltungen und Anforderungen an das Projekt. Gleichzeitig ist das Gelingen des Projektes massgeblich vom Mitwirken einiger Stakeholder abhängig. Die wichtigste Rolle nimmt die Abteilung der Energiedienstleistungen ein. Als Eigentümer und Betreiber der Wärmepumpenanlagen verfügen sie über jahrelange Erfahrung im Business und sind bei der Anbindung an das bestehende Gebäudeleitsystem spezialisiert. Der bisherige Lieferant des Gebäudeleitsystems musste einige Anpassungen am System vornehmen. Die Aufträge hierfür werden von ewz vergeben. Verschiedene Prognosen, wie beispielsweise Wetter-, Netzauslastungs-, Strommarkt- und thermische Lastprognosen, werden von bestehenden Lieferanten bezogen. Um Marktdaten empfangen zu können, wird eine Schnittstelle zur EPEX Spot erstellt. Eine Übersicht aller Schnittstellen wird in Kapitel 4.1 präsentiert.



Um die verschiedenen Abhängigkeiten und Zuständigkeiten transparent darzustellen, wurde ein Gesamtkonzept erarbeitet. Darin wurden sämtliche Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Systemen spezifiziert. Neben dem Wissen um die beteiligten Akteure hilft dies auch bezüglich der effizienten Koordination von Aufträgen an externe Dienstleister. Die Ausgangslage in diesem Projekt, dass Contractor, Verteilnetzbetreiber und Handel zur gleichen Firma gehören, ist äusserst wertvoll.

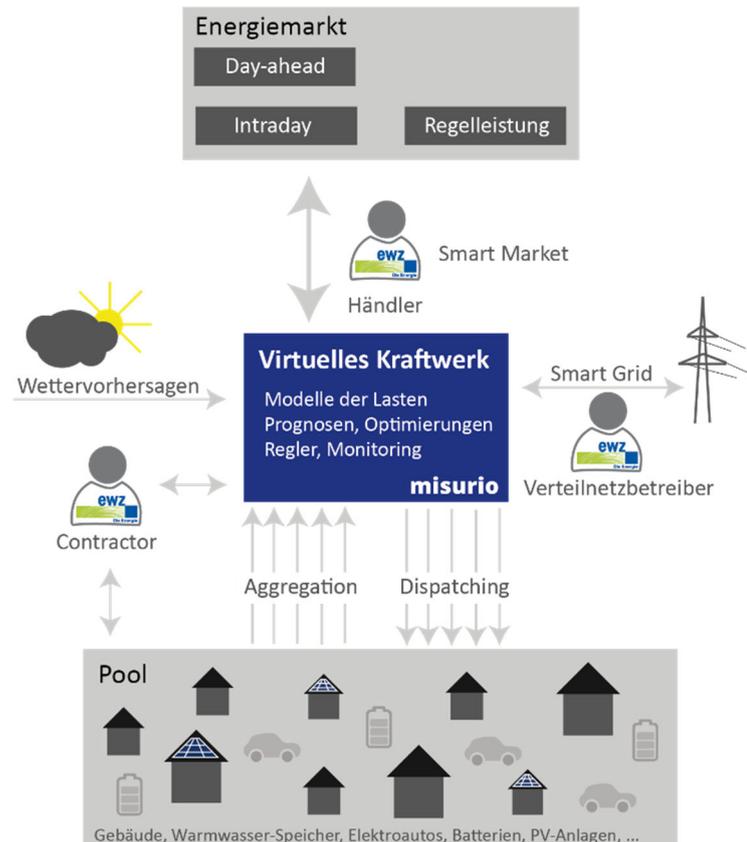


Abbildung 2: Stakeholder im Projekt WarmUp.

### 1.3 Ergebnisse aus WarmUp 1

In WarmUp 1 wurde ein Simulator für Potentialanalysen entwickelt [2]. Der Simulator besteht aus einer Kaskade von Optimierungen, in welcher die optimalen Angebote, das Verhalten des Marktes (Annahme / Ablehnung / Abruf der Angebote), das Kappen der Leistungspeaks (vermeidene Netznutzungskosten), sowie das daraus resultierende Betriebsregime der Wärmeerzeugung berechnet werden. Aus dem Vergleich des optimierten Betriebsregimes mit dem Referenzszenario kann das Wertschöpfungspotential ermittelt werden. Mit Hilfe des hier entwickelten Simulators können Sensitivitäten (z.B. grössere Speichervolumen) berechnet werden.

Im Basisfall (Jahr 2012) wurden mit einer optimalen Bewirtschaftung eine Kostenreduktion sowie zusätzliche Erträge von insgesamt etwa 800 CHF pro Anlage gegenüber der heutigen Betriebsweise erzielt. Bei der Anlage handelte es sich um ein Mehrfamilienhaus mit zwanzig Wohneinheiten und modernem Baustandard. Als Folge der zunehmenden Einspeisung von Sonnen- und Windenergie ist da-



von auszugehen, dass Flexibilität an Wert gewinnen wird. Sowohl örtlich wie auch zeitlich werden vermehrt Diskrepanzen zwischen Erzeugung und Verbrauch auftreten. Dies macht einen Ausbau der Netze und Speicher notwendig. Heute sind die Anreize für Investitionen in dezentrale Speicher eher klein. Es ist aber abzusehen, dass die Attraktivität von Energiespeichern in den kommenden Jahren zunehmen wird. Zudem entstehen im Zusammenhang mit dem „Internet of Things“ Infrastrukturen für die Anbindung von dezentralen Anlagen, welche auch für die Umsetzung von anderen Geschäftsfällen, wie z.B. „Service on Demand“, genutzt werden können. Durch diese Mehrfachnutzung der Kommunikationsinfrastruktur fallen die Kosten für die einzelnen Geschäftsfälle.

Sobald der Bedarf an Flexibilität steigt, dezentrale Speicher wirtschaftlich attraktiver werden und eine Internet of Things Infrastruktur entsteht, die auch für andere Geschäftsfälle mitgenutzt werden kann, werden die Anreize für Investitionen in smarte Systeme zunehmen.

Die Resultate aus WarmUp 1 sind theoretischer Natur und sollen in WarmUp 2 im Feldversuch nachgewiesen werden.

## 1.4 Ergebnisse aus WarmUp 2

Im WarmUp 2 konnte das Konzept aus WarmUp 1 erfolgreich auf einer Pilotanlage realisiert werden. Die übergeordnete, ganzheitliche Optimierung funktioniert über alle Stufen der Kaskade bis hin zur Umrechnung auf Sollwerte für die Maschinen. Das Energiemanagement-System funktioniert automatisch und reagiert so weit wie möglich eigenständig auf abnormale Betriebszustände wie beispielsweise kurze Unterbrüche, oder fehlender Datenimport. Dank der vorausschauenden Betriebsweise ist es dem WarmUp-Optimierungsmodus möglich, frühzeitig präventiv Anpassungen vorzunehmen, so dass Ausfälle bei abnormalen Betriebszuständen möglichst vermieden werden.

Es konnte praktisch nachgewiesen werden, dass die existierende Flexibilität entsprechend genutzt werden kann. Die notwendigen Schnittstellen zu den bereits existierenden Systemen wurden erstellt und funktionieren tadellos. Es konnten zahlreiche wertvolle Erfahrungen mit der Anbindung von Wärmepumpen gesammelt werden.

Dank den WarmUp-Ready Kriterien kann zukünftig beim Bau neuer Anlagen eine einfachere Einbindung der Anlagen in WarmUp erreicht werden.



## 2 Ziele der Arbeit

WarmUp 3 hatte zum Ziel, einen Pool bestehend aus mehreren Anlagen aufzubauen und dadurch mehr Erfahrungen und grössere Handelsvolumen zu erreichen. Es war geplant, insgesamt vier Anlagen aus dem Pool der ewz Contracting Anlagen einzubinden. Die Anlagen sind von unterschiedlicher Grösse und unterschiedlicher Komplexität. Anhand dieser Erfahrungen wurde ersichtlich, wie die Lernkurve bei der Einbindung weiterer Anlagen verläuft.

Während einer einjährigen Betriebsphase im WarmUp-Optimierungsmodus wurde anhand von Key Performance Indikatoren ein Vergleich mit der klassischen Betriebsweise durchgeführt. Dadurch konnte der Wert der Flexibilität besser quantifiziert werden. Basierend auf den Erkenntnissen bezüglich der Lernkurve und dem Wert der Flexibilität konnten Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die Erfolgskriterien für den Optimierungsmodus sind: Ökonomie, Ökologie, Effizienz und Komfort.

Bei den bestehenden Contractinganlagen im „Klassischen Modus“ ist es so, dass Wärme nach Bedarf produziert wird. Unterschreitet ein Temperaturfühler einen Grenzwert startet die Wärmepumpe und schaltet aus, sobald der obere Grenzwert erreicht ist. Die Steuerung kann noch mit PI-Reglern ergänzt sein. Demgegenüber ist die Philosophie im Energiehandel grundsätzlich eine andere: der benötigte Strom muss vorgängig prognostiziert und beschafft werden. Anschliessend ist es wichtig, dass die getätigten Energiedeals eingehalten werden. Abweichungen werden mit Pönalen (Ausgleichsenergiekosten) bestraft. Die Herausforderung von WarmUp 3 bestand darin, den in WarmUp 2 entwickelten WarmUp-Optimierungsmodus auf weitere Anlagen zu skalieren, im Dauerbetrieb (über ein Jahr mit allen Jahreszeiten) anzuwenden und die Flexibilität im Energiehandel über vorgängig simulierte Energiegeschäfte zu nutzen. Gleichzeitig soll der Komfort der Nutzer gewährleistet werden.

Mit WarmUp 3 und dem einjährigen Betrieb konnten die Kernfragen des WarmUp Projekts beantwortet werden:

- 1. Wie viel Flexibilität kann tatsächlich genutzt werden?**  
Komfortgrenzen, Unsicherheiten im Wärmebedarf, Abweichungen des tatsächlichen Wetters gegenüber den Prognosen, abweichendes Verhalten der Maschinen gegenüber der Herstellerangaben, Vereinfachungen in der Modellierung, Latenz in der Regelstrecke und andere Gründe reduzieren das nutzbare Potenzial an Flexibilität. Die einjährige Betriebsphase von WarmUp 3 soll zeigen, wie gross das real existierende Potenzial an Flexibilität im täglichen Betrieb tatsächlich ist.
- 2. Wie können wir mit bestehenden Gebäudeleitsystemen interagieren?**  
Grössere Anlagen verfügen bereits über ein Gebäudeleitsystem. Es stellt sich die Frage, wie der WarmUp-Optimierungsmodus auf weitere Anlagen mit anderen Parametern (Wärmepumpen, Warmwasserspeicher etc.) angewendet werden kann, um WarmUp auf weitere Anlagen zu skalieren.
- 3. Wie kann die Flexibilität auf dem Markt verwertet werden?**  
Es gibt unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten für Flexibilität. Im Projekt wird die Flexibilität des Gesamtsystems verwertet aber insbesondere der Day-Ahead und Intraday-Einsatz monetisiert.
- 4. Welchen Wert hat die Flexibilität?**  
Im Rahmen des Projektes soll der Wert der Flexibilität für jede der vier Anlagen bzw. für WarmUp



insgesamt nachgewiesen werden. Die verschiedenen Anwendungen ökonomisieren die Flexibilität. In der einjährigen Betriebsphase werden einerseits Erfahrungen mit der Abwicklung von Geschäften und andererseits quantitative Aussagen zum Wert der Flexibilität erarbeitet für alle Anlagen erarbeitet

5. **Welchen Einfluss hat WarmUp auf die Effizienz der Anlagen?**

Anhand von Key Performance Indikatoren wird die Effizienz der WarmUp Betriebsoptimierung im Vergleich zu historischen Daten berechnet. Zielsetzung ist, dass die Effizienz mind. gleichbleibend ist und sich nicht verschlechtert

Das Projekt kann auf dem WarmUp Webportal demonstriert werden. Das Webportal erklärt mit einfach verständlichen Grafiken das Prinzip von WarmUp, sowie die Dynamik der flexiblen Steuerung von Wärmepumpen und dem dahinterliegenden ganzheitlichen Ansatz.



## 3 Konzept

### 3.1 Ganzheitliche Betrachtung

WarmUp verfolgt seit Beginn eine ganzheitliche Betrachtung in der Optimierung. Es hat sich gezeigt, dass diese Sichtweise den grössten Gesamtnutzen bringt. Gleichzeitig erlaubt dieser Ansatz eine Diversifizierung in den Anwendungen. Rahmenbedingungen können jederzeit ändern und damit besteht bei einseitiger Fokussierung die Gefahr, dass Business Cases plötzlich wegfallen. Viele Lastmanagement Projekte haben stark auf Regelleistung fokussiert und stehen mittlerweile vor Herausforderungen, da die Preise für Regelleistung stark gesunken sind. Auf der anderen Seite führt eine ganzheitliche Sichtweise zu Herausforderungen in der Implementation, da viele Akteure involviert sind. Die Trennung von Energie und Netz im Zuge der Liberalisierung steht in einigen Bereichen im Widerspruch mit ganzheitlichen Lösungen. Vorteilhaft ist, dass alle involvierten Dimensionen im Projekt WarmUp zur gleichen Unternehmung gehören, so dass der Gesamtnutzen im Vordergrund steht. Das Unbundling wird dabei aber jederzeit respektiert.

Abbildung 3 zeigt eine Visualisierung der drei Dimensionen. Lokal steht der Kundennutzen im Vordergrund. Primär muss der Komfort der Bewohner gewährleistet werden. Sekundär muss die Wärmeversorgung ökologisch und ökonomisch erbracht werden. Auf der Netzebene steht die Reduktion von Lastspitzen im Vordergrund. Im vorliegenden Fall existieren keine Probleme mit Spannungsüberhöhungen, da das Verteilnetz im städtischen Gebiet grosszügig dimensioniert wurde. Zukünftig und vor allem in ländlichen Gebieten ist die Reduktion von Spannungsüberhöhungen durchaus ein interessanter Case. Marktseitig besteht der Nutzen vor allem in einer optimalen strukturierten Beschaffung am Day-Ahead und Intraday-Markt. Die einzelnen Anwendungen werden nachfolgend aufgelistet und untereinander verglichen.

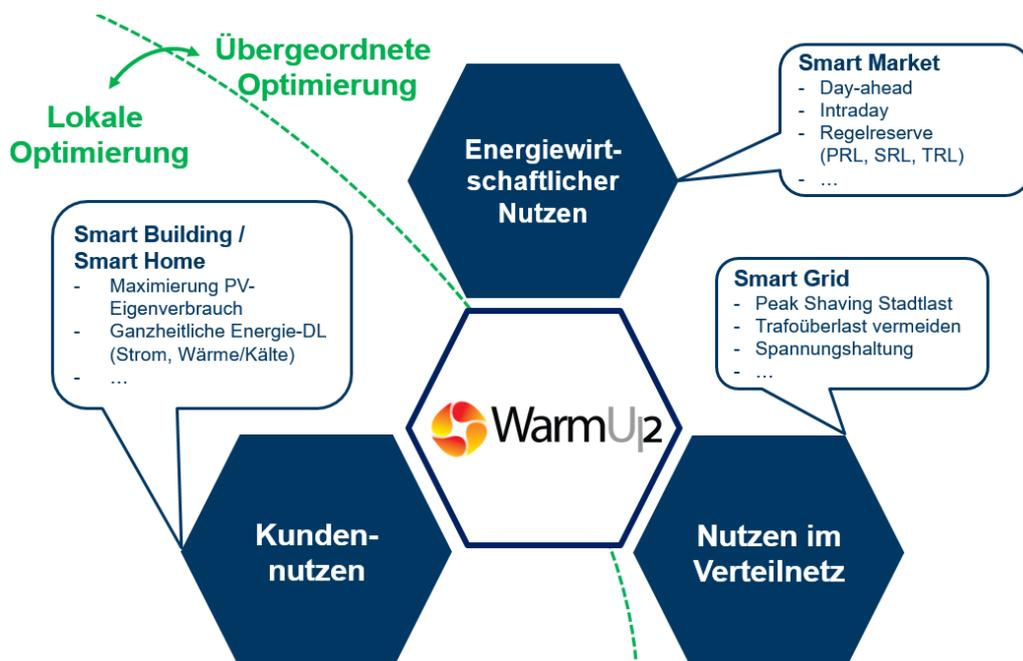


Abbildung 3: Ganzheitliche Optimierung im Spannungsfeld zwischen Smart Building, Smart Grid und Smart Market (Quelle Grafik: ewz)

## 3.2 Optimierung

Der vorausschauende MPC-Regler zur Optimierung des Gesamtsystems kennzeichnet sich dadurch, dass er das voraussichtliche Verhalten des Systems als Folge seiner Entscheidungen kennt. Hierfür muss die Anlage modelliert werden. Zur Optimierung der Betriebsweise wird eine Kosten-Zielfunktion minimiert. Im Optimierungsmodell werden verschiedene Bedingungen (Komfortband, Totzeit von Anlagen, Rampen im Fahrplan, Wiedereinschaltsperrern, etc.) definiert, die bei der Optimierung eingehalten werden müssen.

### 3.2.1 Modellierung

#### 3.2.1.1 Gebäude

Die Abbildung 4 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Anlagemodells. Die verschiedenen Energieflüsse sind farbig dargestellt, wobei deren Grösse und Richtung variabel sind. Das generische Modell lässt sich relativ einfach definieren und in einer Zustandsraumdarstellung formulieren. Die Abbildung 5 zeigt die Zustandsraumdarstellung exemplarisch. Die Zustandsgrößen sind die verschiedenen Temperaturen der Speicher. Die Herausforderung liegt in der Bestimmung der Parameter A, B, C und D. Diese Parameter liessen sich anhand verschiedener Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen. Das kann man für ein Gebäude exemplarisch durchführen. Bei einer Vielzahl von Anlagen braucht es wegen des steigenden Aufwands andere Konzepte. Folglich wurde ein Ansatz entwickelt, mit der man die Parameter mittels Regression, basierend auf historischen Zeitreihen, automatisch berechnen kann.

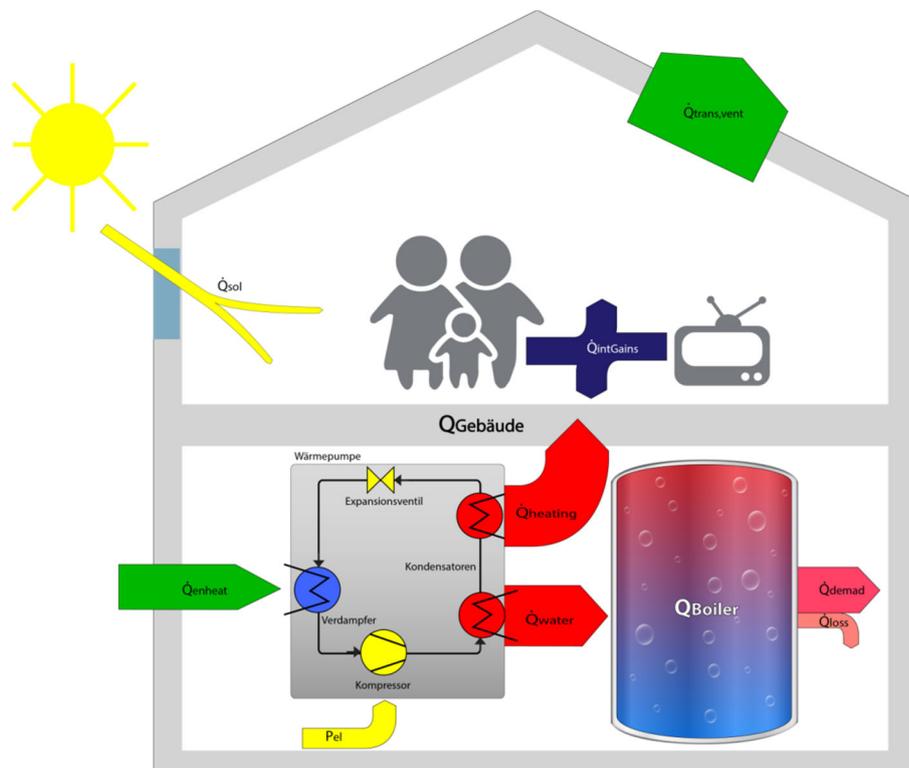


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Gebäudemodells

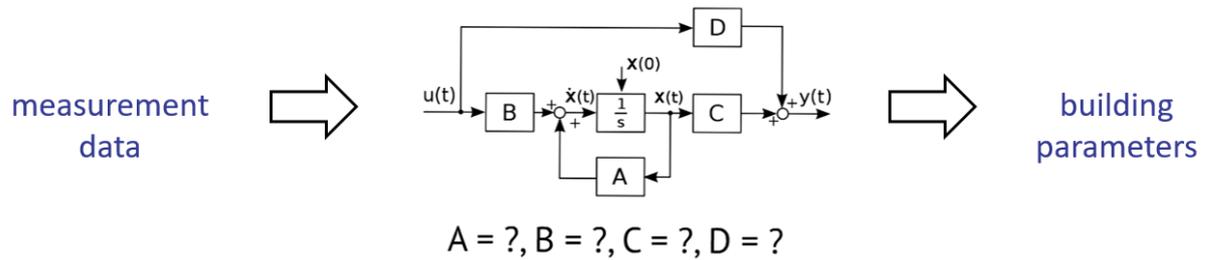


Abbildung 5: Generische Zustandsraumdarstellung für die Modellierung der Anlagen. Mittels Regression werden die Gebäudeparameter bestimmt.

### 3.2.2 Optimierungskaskade

Die Abbildung 6 zeigt die Optimierungskaskade, die in WarmUp zum Einsatz kommt. Das Herzstück der einzelnen Module sind mathematische Optimierungen mit unterschiedlichen Zielfunktionen und Nebenbedingungen. Die Resultate eines Moduls fließen als Inputs in das nächste Modul. In jedem Entscheidungsschritt werden sämtliche Opportunitätskosten, die sich später ergeben können, mitberücksichtigt.

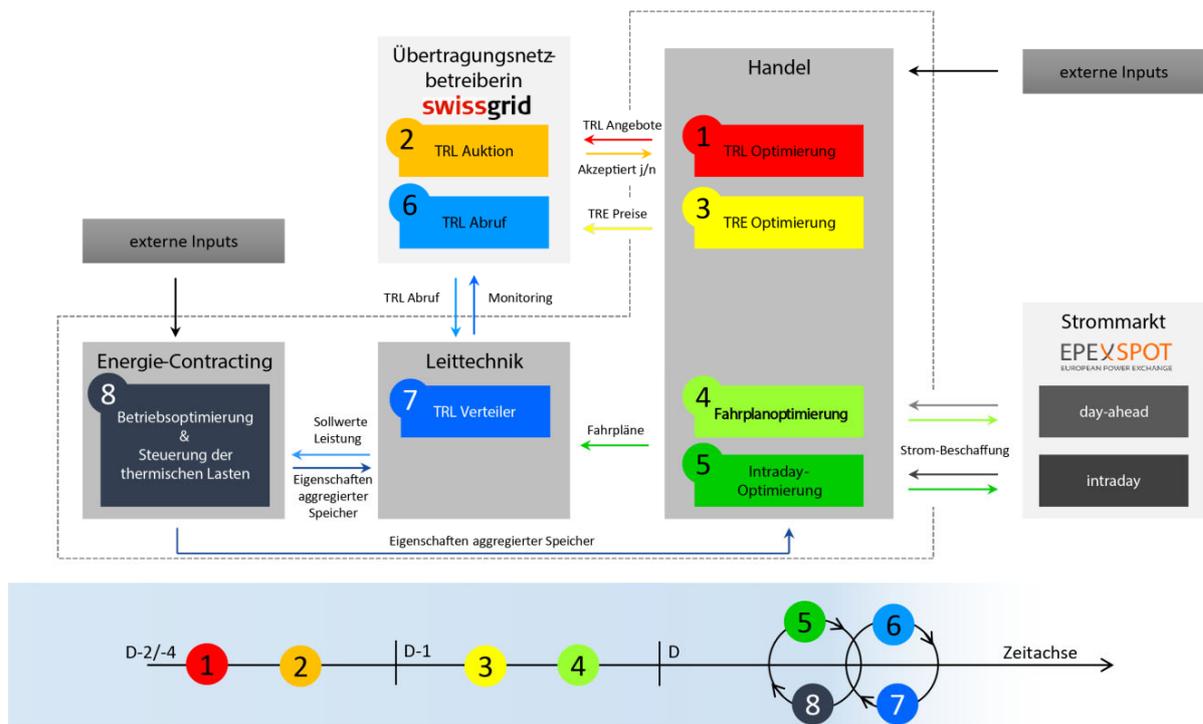


Abbildung 6: Die Optimierungskaskade im WarmUp Projekt. Die jeweiligen Schritte sind nach ihrer zeitlichen Abfolge durchnummeriert.

In der ersten Optimierung werden durch die WarmUp-Software Angebote für Tertiärregelung erzeugt. Es liegt in der Natur der Sache, dass Abrufe von Regelleistung nicht vorhergesehen werden können. Folglich müssen in einer stochastischen Optimierung verschiedene Abrufszszenarien berücksichtigt werden. Je nach Szenario ergeben sich unterschiedliche Kosten und Erträge. Anschliessend



werden die TRL-Angebote an Swissgrid übermittelt, welche die günstigste Angebotsauswahl vornimmt. Die zugesagten Angebote von Regelleistung müssen in der weiteren Planung zwingend berücksichtigt und im Betrieb vorgehalten werden. Im nächsten Schritt werden die Preise für die Regelernergie durch die WarmUp-Software festgelegt, wodurch die Abrufwahrscheinlichkeit beeinflusst werden kann. Wiederum wird eine stochastische Optimierung durchgeführt.

Im Schritt 4 wird der optimale Fahrplan erstellt. Der Fahrplan widerspiegelt die Energie, die am nächsten Tag stündlich verbraucht werden wird und deshalb am Vortag an der Day-Ahead-Börse beschafft wird.

In Schritt 5 wird die Intraday-Optimierung durchgeführt. Im Gegensatz zu den bisherigen Optimierungen handelt es sich bei dieser Optimierung um eine ständig wiederkehrende Aufgabe innerhalb des Tages. Alle 15 Minuten findet eine neue Intraday-Optimierung statt. Damit besteht die Möglichkeit, ständig auf veränderte Markt- und Wettersituationen reagieren zu können. Für jede Optimierung erhält der Simulator neue Prognosedaten. Die Intraday-Optimierung wurde als vorausschauender Regler (MPC-Controller) implementiert. Mit den Modellen der Anlagen und den Prognosedaten kann der Regler für den Vorhersagehorizont die richtigen Entscheidungen treffen und entsprechende Handelsgeschäfte auslösen.

Abbildung 7 zeigt die Funktionsweise des MPC-Controllers anhand eines Beispiels aus WarmUp 1. Die rote Linie widerspiegelt den aktuellen Zeitpunkt. Anhand der aktuellen Speicherzustände und den Prognosen für die nächsten Stunden trifft der MPC-Controller die optimalen Entscheidungen für den Betrieb in den nächsten Stunden. Jede Viertelstunde wird diese Optimierung erneut durchgeführt und erlaubt dadurch ein rasches Reagieren auf neue Ausgangslagen.

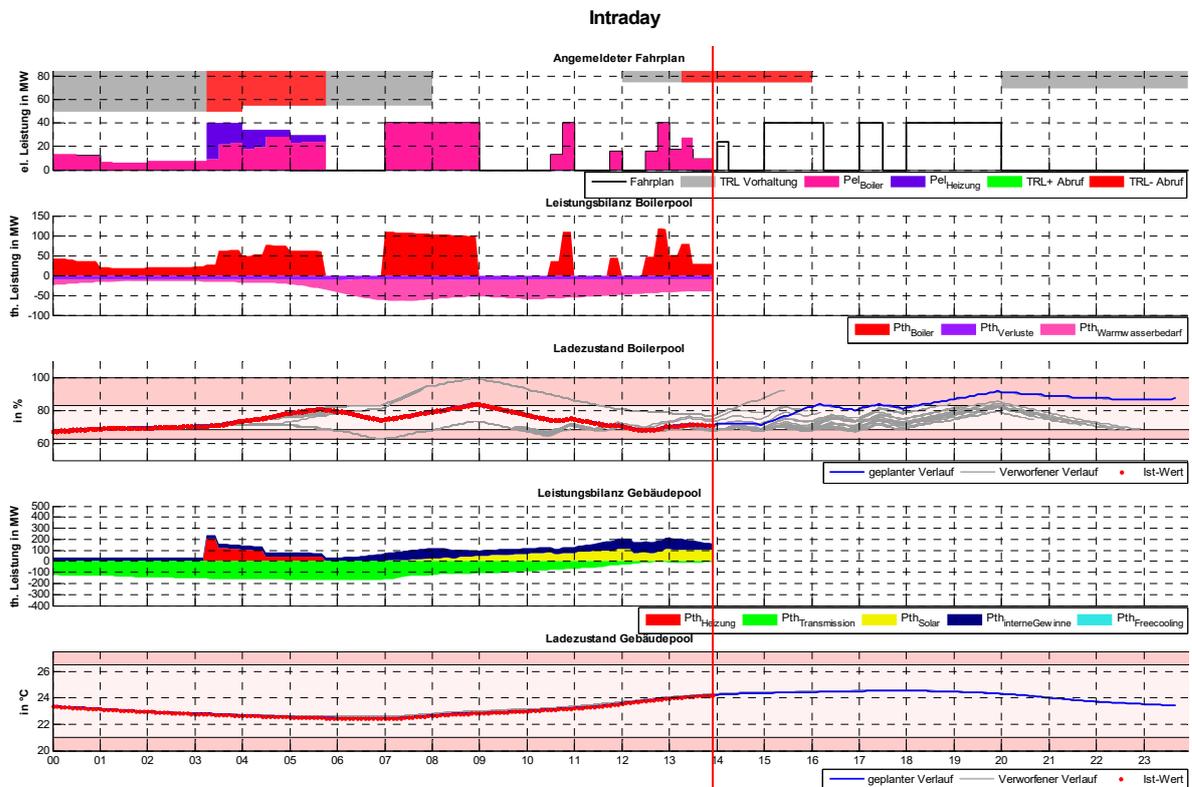


Abbildung 7: Visualisierung der Intraday-Optimierung. In der obersten Zeile ist der Fahrplan dargestellt, Zeile 2 und 3 zeigen den Verlauf der thermischen Leistungsbilanz sowie des Ladezustandes der Warmwasserspeicher, Zeile 4 und 5 zeigen die thermische Leistungsbilanz sowie den Ladezustand des Gebäudepools. Die rote senkrechte Linie markiert den Zeitpunkt, an dem die Simulation im Moment gerade ist. Die blauen Linien in Zeile 3 und 5 stellen die Prognosen über den weiteren Verlauf dar. Ältere verworfene Prognosen sind in grau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Optimierung gelegentlich ihre Strategie ändert, weil marktseitig andere Situationen entstanden sind oder die Prognosen Abweichungen hatten.

Schritt 6 der Optimierungskaskade, der Abruf von Regelleistung, läuft bei Swissgrid. Der Bedarf wird mit der kostenminimalen Kombination gedeckt. Die angebotene Leistung wird entweder ganz oder nicht abgerufen. Neben dem Tertiärregelenergie-Preis spielt deshalb auch die Blockgrösse eine Rolle. In Schritt 7 wird der Tertiärregelenergie-Abruf entgegengenommen und auf die Teilnehmer verteilt. Ein Abruf von Regelleistung entspricht einer Korrektur des Fahrplans.

Im letzten Schritt, der Betriebsoptimierung (kurzfristige Einsatzplanung), geht es um das optimale Verteilen der Sollleistung auf die einzelnen Anlagen. Einerseits soll der Wärmebedarfsfahrplan möglichst eingehalten werden und andererseits soll die Speichertemperatur jeder einzelnen Last innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten werden. Diese Betriebsoptimierung wird wiederum als MPC-Regler implementiert. In jedem Entscheidungsschritt wird ein Zeithorizont in der Zukunft betrachtet und daraus die adäquate Entscheidung für den aktuellen Zeitschritt berechnet.



## 4 Resultate

### 4.1 Auswahl der Anlagen und Planung der Anbindung

Sämtliche Anlagen aus dem Contracting Pool von ewz wurden anhand der WarmUp Ready Kriterien bewertet. Die vier geeignetsten Anlagen wurden selektioniert und konnten erfolgreich modelliert werden. Die wichtigsten Daten sind in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt:

	<i>Anzahl Gebäude</i>	<i>Anzahl Warmwasserspeicher</i>	<i>Gesamtvolumen der Warmwasserspeicher [l]</i>	<i>Anzahl Wärmepumpen</i>	<i>Elektrische Leistung [kW]</i>
Erste Anlage	4	7	19'920	6	227
Zweite Anlage	5	7	11'800	1	71
Dritte Anlage	2	2	2'220	1	29
Vierte Anlage	4	6	15'310	1	78
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>22</b>	<b>49'250</b>	<b>9</b>	<b>405</b>

### 4.2 Schnittstellen Handel, Netz, Leitsystem, Anpassung WebGUI

Sämtliche Schnittstellen zu Handel, Netz, Leitsystem, Börse etc. sind abgeschlossen worden. Die API zur Börse wurde von EPEX SPOT zertifiziert und ist im Einsatz. Die API muss gemäss Vorgaben von EPEX gelegentlich angepasst werden (Änderung der Spezifikationen, neue Produkte). Jede Änderung bedarf einer erneuten Zertifizierung.

Die Arbeiten an der Webapplikation wurden erfolgreich abgeschlossen. Zahlreiche Charts mit historischen Messdaten, Marktdaten, Prognosedaten und der Visualisierung der getroffenen Entscheidungen wurden implementiert.

### 4.3 Integration von weiteren Anlagen

Die Tests und die Inbetriebnahme der vier Anlagen wurden erfolgreich abgeschlossen. Der WarmUp-Optimierungsmodus funktioniert einwandfrei. Die Fahrpläne und die tatsächliche Leistung stimmen sehr gut überein. Drei von vier Anlagen konnten mehrheitlich erfolgreich online betrieben werden und einen stabilen Betrieb über längere Zeiten nachweisen. Bei der vierten Anlage musste im November 2017 ein Heizungsventil auf einen Mindestwert von 18% fixiert werden, um dem erhöhten Wärmebedarf Rechnung zu tragen. Aufgrund dieser Anpassung entsprach die Modellierung nicht mehr dem realen Model, so dass der WarmUp-Optimierungsmodus deaktiviert werden musste. Auf die Auswertung der vierten Anlage wurde verzichtet, da während den Wintermonaten diese Anlage im klassischen Betrieb betrieben wurde.



## 4.4 Betriebsphase inkl. Messung Erfolgskontrolle

Von den vier integrierten Anlagen konnten drei Anlagen über einen längeren Zeitraum zu mindestens 80% der Zeit im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben werden:

- Die erste Anlage vom 01.01.17 – 28.02.18 mit 82% aktiv im WarmUp-Optimierungsmodus;
- Die zweite Anlage vom 01.01.17 – 28.02.18 mit 80% aktiv im WarmUp-Optimierungsmodus;
- Die dritte Anlage vom 01.06.17 – 28.02.18 mit 82% aktiv im WarmUp-Optimierungsmodus.

Insgesamt ist für die erfolgreiche Aufrechterhaltung des WarmUp-Optimierungsmodus eine stabile Umgebung erforderlich, in welcher die aktuellen Daten für den Datenimport permanent zur Verfügung stehen, sowie die erforderliche Performance seitens Systemprovider sichergestellt ist. Falls es zu lokalen Eingriffen an der Wärmepumpen-Steuerung kommt oder die in der Modellierung gesetzten Grenzwerte nicht eingehalten werden, wird der WarmUp-Optimierungsmodus automatisch deaktiviert. In Abbildung 8 wird am Beispiel der ersten Anlage kurz auf die längeren Einbrüche, in welcher WarmUp nicht im Optimierungsmodus war, eingegangen.

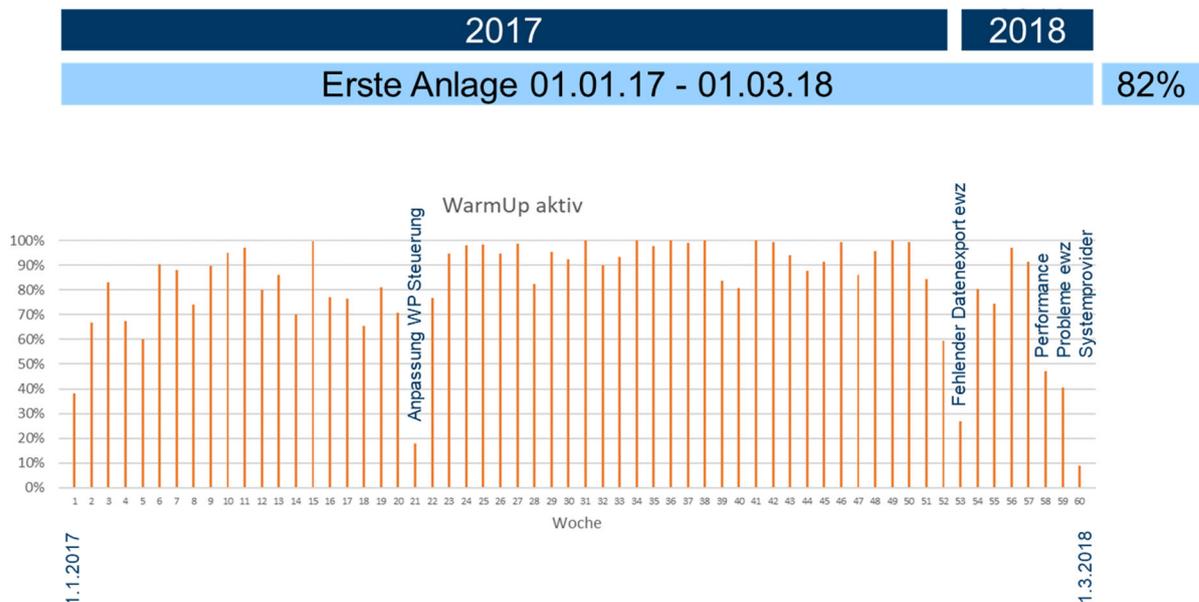


Abbildung 8: Visualisierung wie oft Warmup im Zeitraum vom 01.01.17 bis 01.03.18 auf der ersten Anlage aktiv war.

Die längeren Unterbrüche in KW21, KW33 sowie KW58 – KW 60 sind aus nachfolgenden Gründen entstanden:

- Anpassungen an der Wärmepumpen-Steuerung;
- Fehlender Datenexport zu Beginn des neuen Jahres 2018;
- Performance Probleme bei ewz Systemprovider.

Für die einheitliche Auswertung dieser Anlagen wurden folgende vier Key Performance Indikatoren bestimmt, um die Kernfragen von WarmUp zu beantworten (gemäss Abbildung 3):



- **Effizienz:** Hier handelt es sich um die Effizienzsteigerung der Wärmepumpen. Dies ist mittels Überwachung der Quelltemperaturen sowie das Verhindern von unnötigem Takten der Wärmepumpe möglich. Die Effizienzsteigerung wird mit der Auswertung der Jahresarbeitszahl (JAZ) ersichtlich. Eine Erhöhung der Effizienz bewirkt eine tiefere Energiemenge, welche die Kosten von ewz Energielösungen verringert.
- **Energiekosten:** Mit der EPEX API-Anbindung konnten fiktive Angebote an der Strombörse gehandelt werden. Für die Auswertung wurden die durch WarmUp gehandelten Produkte mit denjenigen der durchschnittlichen Marktpreise verglichen. Die Abweichung ergibt die Einsparung an Energiekosten. Eine Reduktion der EPEX-Energiekosten verringert die einzukaufende Energiemenge.
- **Leistungspeaks aus ewz Sicht:** Die Leistungspeaks aus ewz Sicht werden zwischen dem klassischen Modus und dem WarmUp-Optimierungsmodus verglichen. Während dem erwarteten Leistungspeak aller ewz Verbraucher im Verteilnetz der Stadt Zürich wurde der Energiebezug der WarmUp Anlagen minimiert. Eine Reduktion dieser Leistungspeaks reduziert die Netzkosten von ewz gegenüber Swissgrid.
- **Leistungspeaks aus Kundensicht:** Die Leistungspeaks aus Kundensicht werden zwischen dem klassischen Modus und dem WarmUp-Optimierungsmodus verglichen. Der Leistungspeak entspricht dem Monatspeak der jeweiligen Anlage, für die ein Leistungspreis seitens ewz Energielösungen entrichtet werden muss. Eine Reduktion dieses Leistungspeaks reduziert die intern verrechneten Kosten von ewz Energielösungen an ewz.

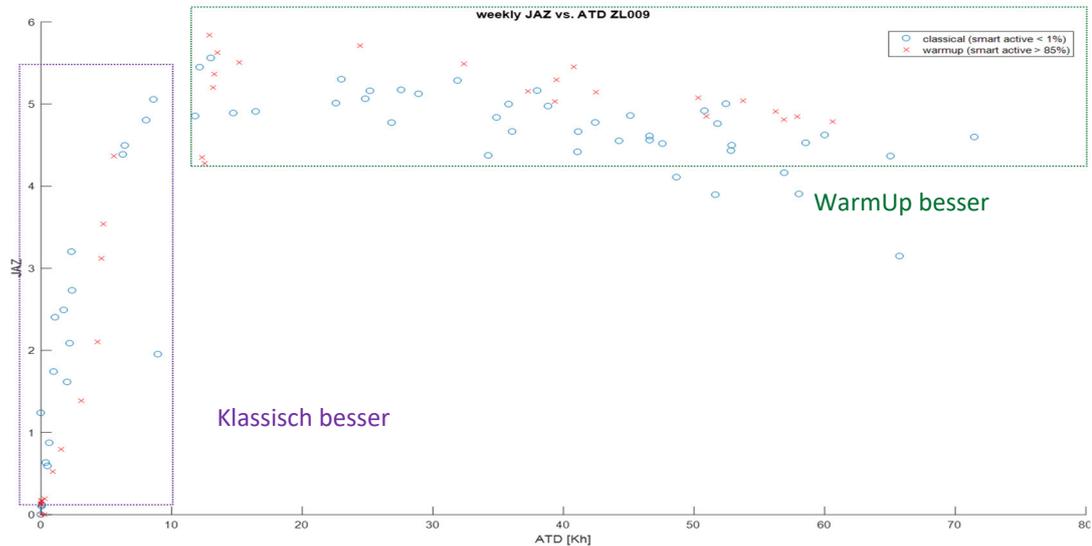
Die folgenden Abschnitte illustrieren die Auswertungen dieser einzelnen drei Anlagen.

#### **4.4.1 Erste Anlage**

Die erste Anlage entspricht der Pilotanlage aus Phase 2 von WarmUp. Für die dritte Phase wurde diese Anlage während dem Zeitraum vom 01.01.2017 bis zum 01.03.2018 betrieben. In dieser Zeitspanne konnte die erste Anlage während 82% erfolgreich im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben werden.

##### **4.4.1.1 Effizienz**

Im Auswertungszeitraum vom 01.01.2015 bis 01.03.2018 wurde die Effizienz in den klassischen Wochen mit denjenigen der WarmUp Wochen verglichen. Insgesamt standen 60 klassische Wochen gegenüber 36 WarmUp-Optimierungsmodus Wochen zur Verfügung. In Abbildung 9 sind die Resultate ersichtlich.

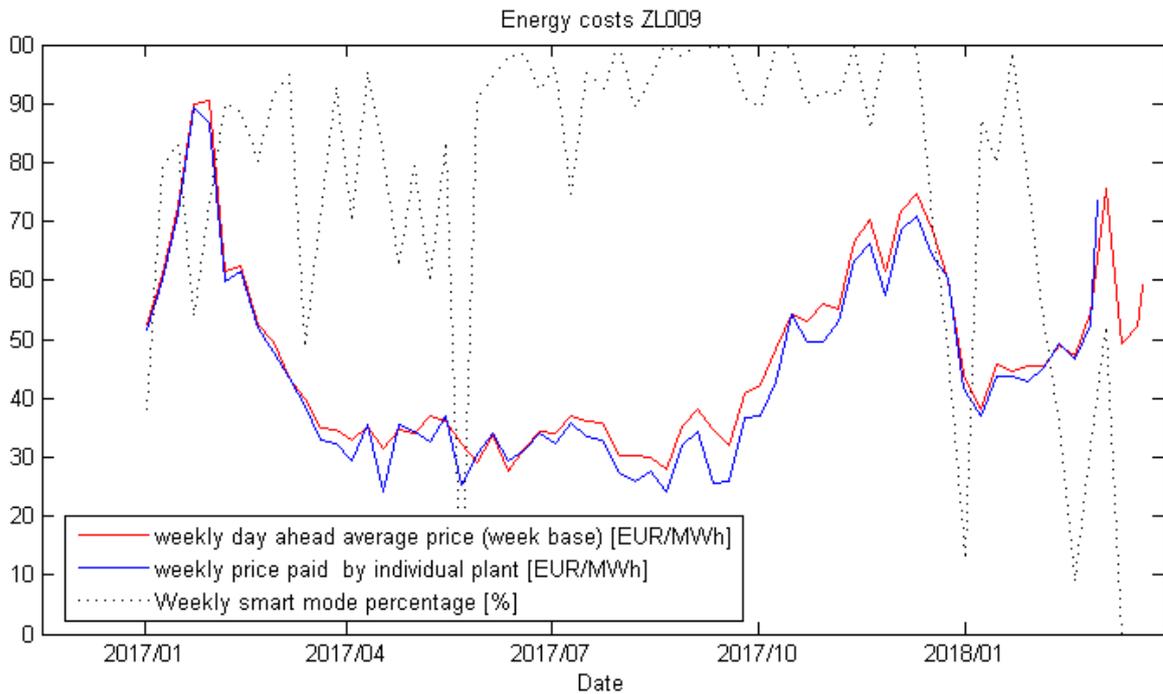


**Abbildung 9: Effizienzvergleich mittels Jahresarbeitszahl (JAZ) im klassischen wie im WarmUp-Optimierungsmodus. Die Gradtage werden in Form von sogenannten Akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) definiert.**

Besonders an kalten Tagen ist der WarmUp-Optimierungsmodus wesentlich effizienter. Die Auswertung weist für den WarmUp-Optimierungsmodus Energiemengen-gewichtet eine bessere Effizienz von 9,2 % aus. Im Übergangsbetrieb sinkt die Effizienz zu Lasten der guten Preise am Markt.

#### 4.4.1.2 Energiekosten

Die Energiekosten werden in den Abbildungen 10 und 11 ausgewertet. In Abbildung 10 sieht man den direkten Vergleich innerhalb der Auswertungsperiode. In der Zwischensaison und im Sommer ist der WarmUp-Optimierungsmodus wesentlich kostengünstiger, da der Energiebedarf kleiner ist und folglich ein grösserer Handlungsspielraum entsteht. Hingegen besteht in den kalten Wintermonaten wenig Spielraum, da der Energiebedarf wesentlich höher ist.



**Abbildung 10:** Die entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus werden mit den durchschnittlichen Energiekosten verglichen.

In Abbildung 11 wird das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten und den durchschnittlichen Marktpreisen aufgezeigt. Dabei wird in roter Linie der Durchschnitt angezeigt und auf 100% WarmUp-Optimierungsmodus postuliert, wobei eine Reduktion der Energiekosten von 7.6 % ersichtlich ist.

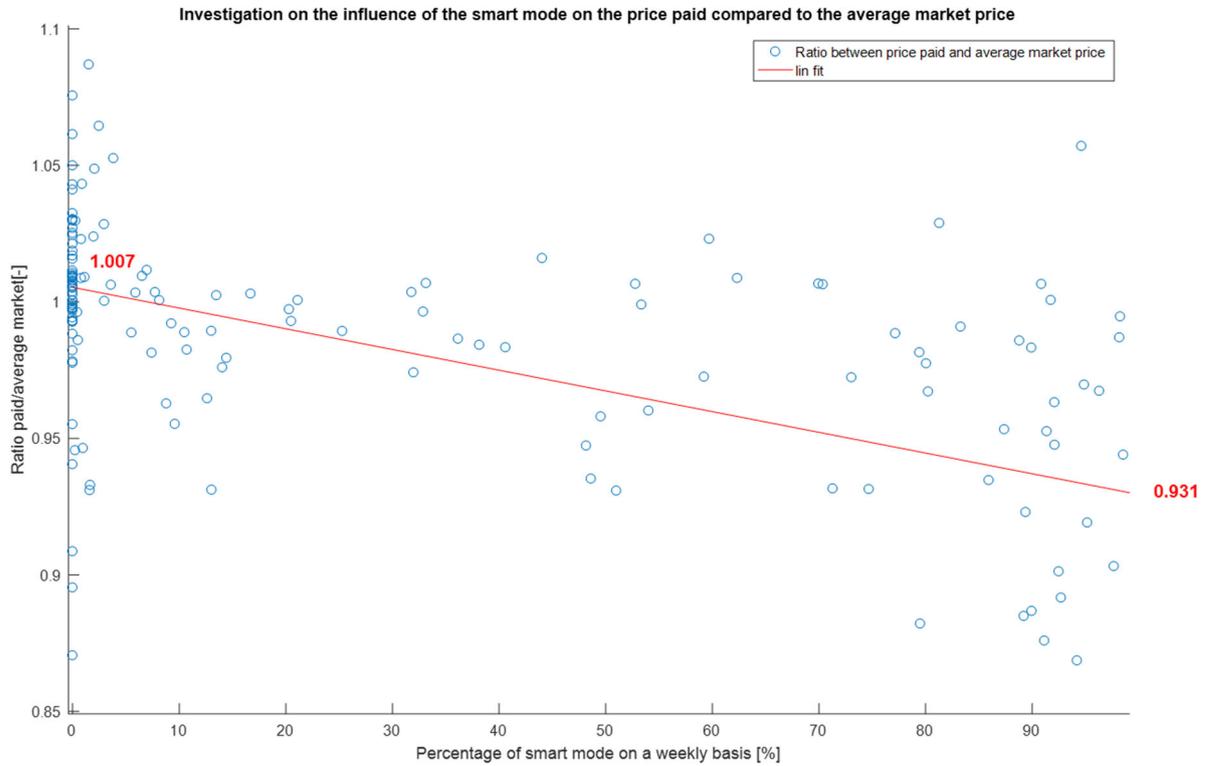
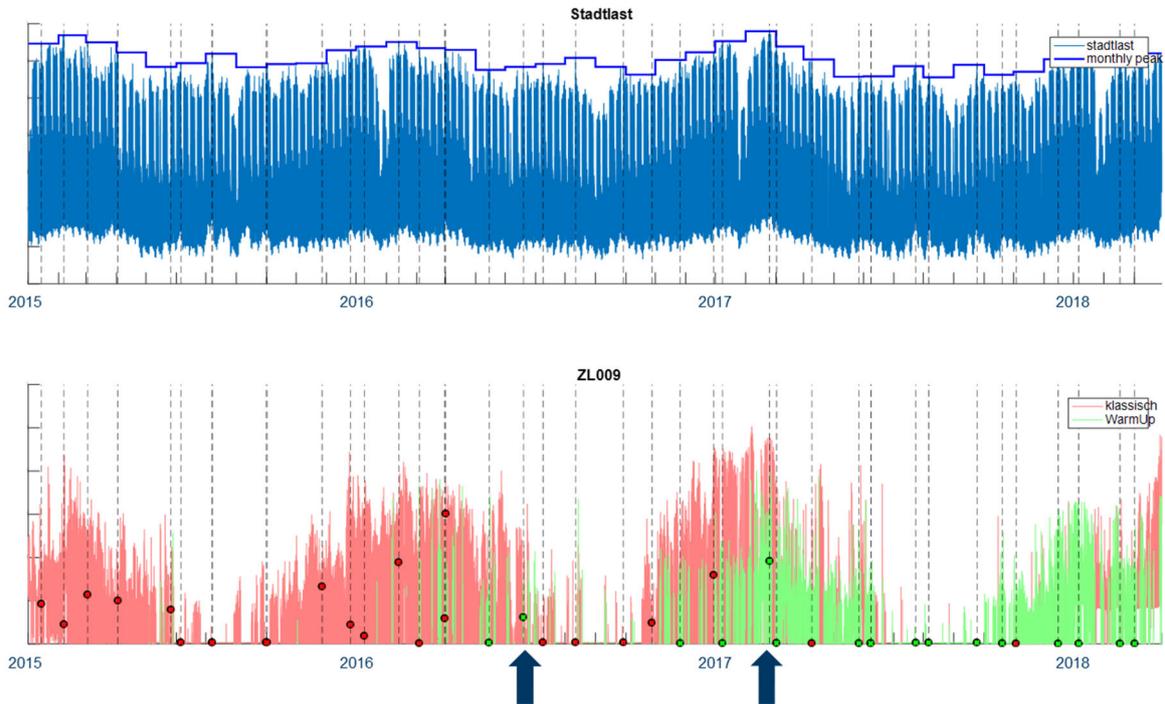


Abbildung 11: Das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus im Vergleich zu den durchschnittlichen Marktpreisen.

#### 4.4.1.3 Leistungspeaks aus ewz Sicht

In Abbildung 12 werden die entstandenen Netzkosten aufgrund von Leistungspeaks aus Sicht ewz illustriert. Während der Auswertungsperiode entstanden lediglich zwei Events welche in Abbildung 12 mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet sind. Beide Events traten beim Einschalten in den WarmUp-Optimierungsmodus (vom klassischen Betrieb) auf und könnten künftig ganz vermieden werden.



**Abbildung 12:** Die obere Grafik illustriert die Stadtlast mit den monatlichen Maximalwerten. Die untere Grafik zeigt zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für diese Anlage bezogen wurden, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus.

Wie in Abbildung 13 ersichtlich ist, konnten im Auswertungszeitraum 72 % der Netzkosten aufgrund von Leistungspeaks eingespart werden. Falls der WarmUp-Optimierungsmodus durchgehend aktiviert ist, könnten sogar 100% der Netzkosten aufgrund Leistungspeaks eingespart werden.

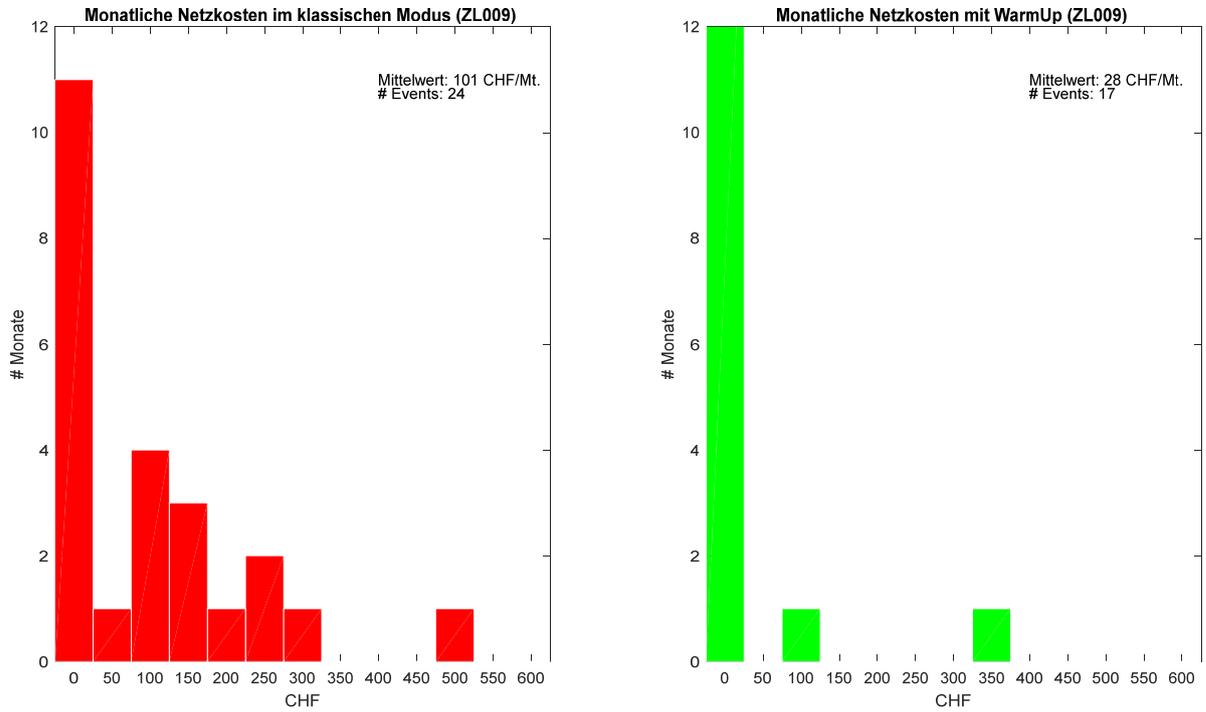


Abbildung 13: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)

#### 4.4.1.4 Leistungspeaks aus Kundensicht

In den kalten Wintermonaten konnten erhebliche Leistungspeaks vermieden werden. In Abbildung 14 ist der Unterschied zwischen WarmUp-Optimierungsmodus und dem klassischen Modus anhand der Monatspeaks gut ersichtlich.

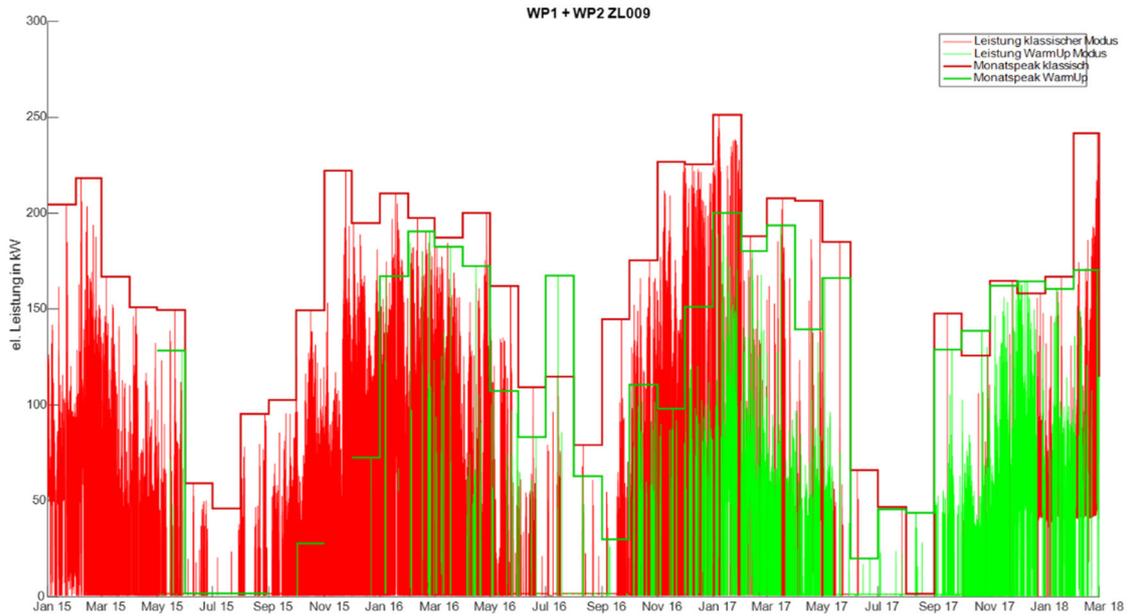


Abbildung 14: Illustration zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für diese Anlage bezogen wurden, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus. Zusätzlich sind die monatlichen Peaks ersichtliche.

Im Auswertungszeitraum konnten 21% der Netzkosten aufgrund Reduktion der Leistungspeaks eingespart werden.

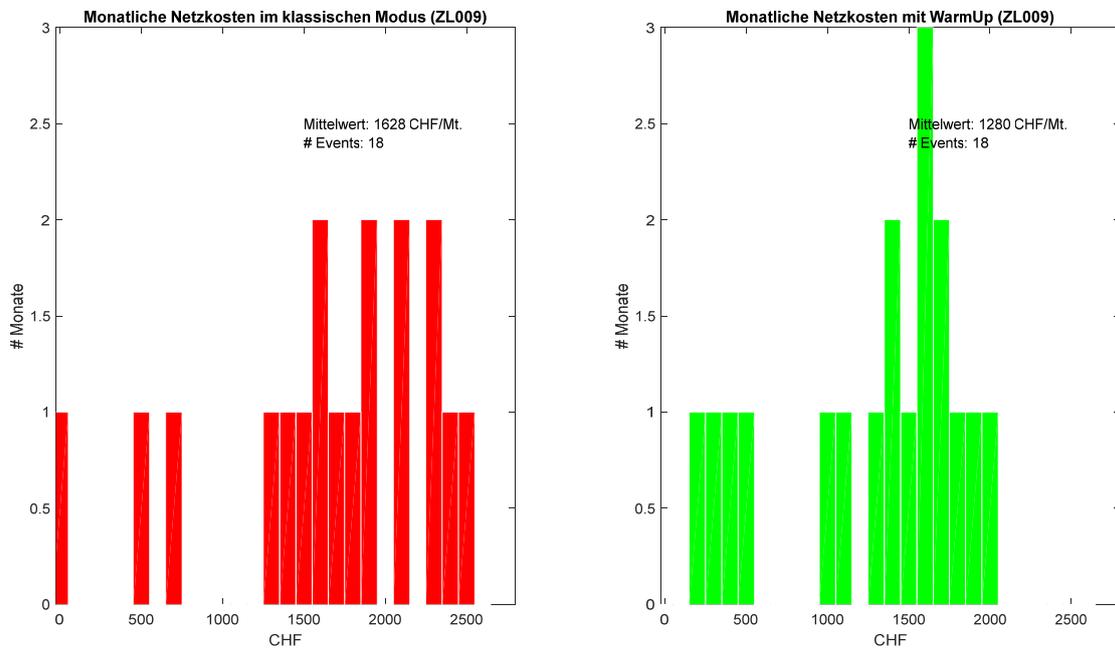


Abbildung 15: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)



#### 4.4.1.5 Gesamtergebnis

Die erste Anlage konnte insgesamt folgende Resultate erzielen (gemäss Abbildung 3):

- Effizienz: ca. 9 % Verbesserung der Jahresarbeitszahl der WarmUp Anlage
- Energiekosten bei ewz Energiedienstleistungen: ca. 8 % Energiekosteneinsparung
- Leistungspeaks aus ewz Sicht: ca. 72 % Reduktion des Leistungspeaks der WarmUp Anlage bei der ewz Stadtlast
- Leistungspeaks aus Kundensicht: ca. 21 % Einsparung von Leistungspeaks von ewz Energielösungen gegenüber dem Verteilnetz von ewz

#### 4.4.2 Zweite Anlage

Die zweite Anlage besteht aus der Anlage Ost und der Anlage West. Die Anlage Ost wurde im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben und die Anlage West im klassischen Modus, so dass diese zwei Anlagen unter sich verglichen werden konnten. Die Anlage Ost konnte in der Zeitspanne vom 01.01.2017 bis 01.03.2018 während 80% erfolgreich im WarmUp Modus betrieben werden.

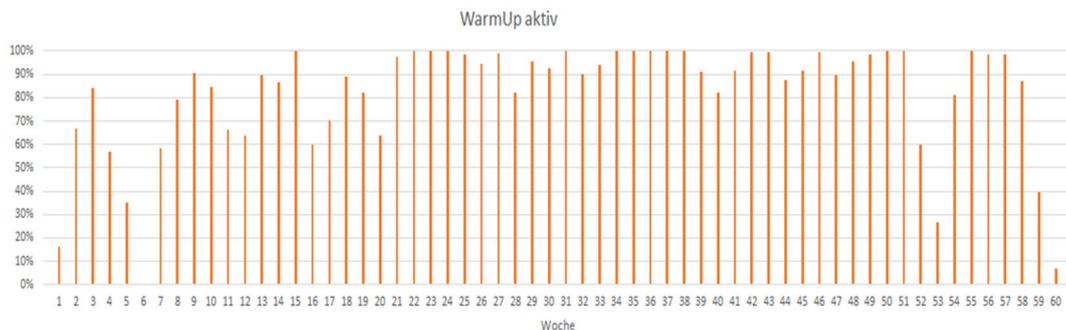
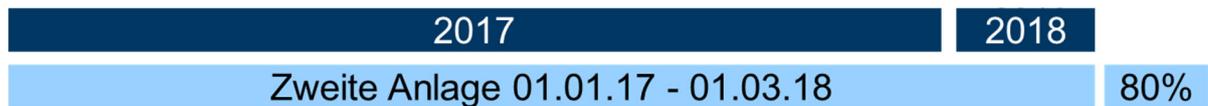


Abbildung 16: Visualisierung wie oft der WarmUp-Optimierungsmodus im Zeitraum vom 01.01.17 bis 01.03.18 aktiv war

#### 4.4.2.1 Effizienz

Im Auswertungszeitraum vom 01.01.2015 bis 01.03.2018 wurde die Effizienz in den klassischen Wochen (WarmUp deaktiviert) mit denjenigen der WarmUp Wochen verglichen. Insgesamt standen 33 klassische Wochen gegenüber 39 WarmUp-Optimierungsmodus Wochen zur Verfügung. In Abbildung 17 sind die Resultate ersichtlich. Ein Punkt beziehungsweise Kreuz entspricht jeweils einer Woche. Besonders an kalten Tagen ist der WarmUp Optimierungsmodus wesentlich effizienter. Die Auswertung weist für den WarmUp-Optimierungsmodus Energiemengen-gewichtet eine bessere Effizienz von 2,4 % aus.

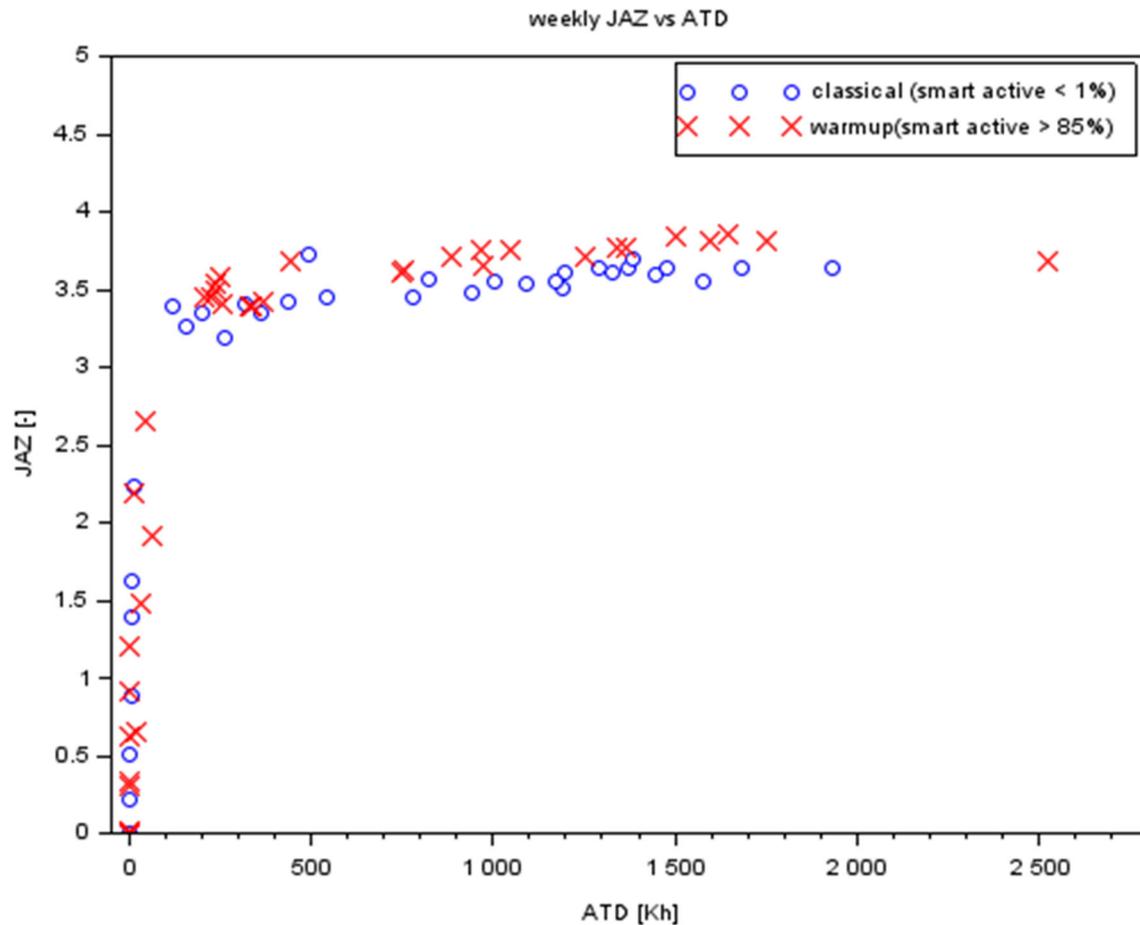


Abbildung 17: Effizienzvergleich mittels Jahresarbeitszahl (JAZ) im klassischen wie im WarmUp-Optimierungsmodus. Die Gradtage werden in Form von sogenannten Akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) definiert.

In Abbildung 18 ist der Energieverbrauch zwischen den Anlagen Ost (WarmUp Optimierungsmodus) und West (klassischer Modus) dargestellt. Hierfür wird das Verhältnis des Energieverbrauchs der WP im Verhältnis Ost zu West illustriert. Im klassischen Modus liegt das Verhältnis des Energieverbrauchs zwischen den Anlagen Ost und West bei ca. 1.14. Das heisst, dass die Anlage Ost im klassischen Modus einen Energieverbrauch der Wärmepumpe (WP) von ca. 114% im Verhältnis zur Anlage West aufweist. In der Zeit, in der die Anlage Ost im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben wird, sind der Energieverbrauch der WP im Verhältnis zur Anlage West, welche permanent im klassischen Modus betrieben wird, auf ca. 104 %. Folglich ist eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs der WP im WarmUp-Optimierungsmodus von rund 10% erreicht worden.

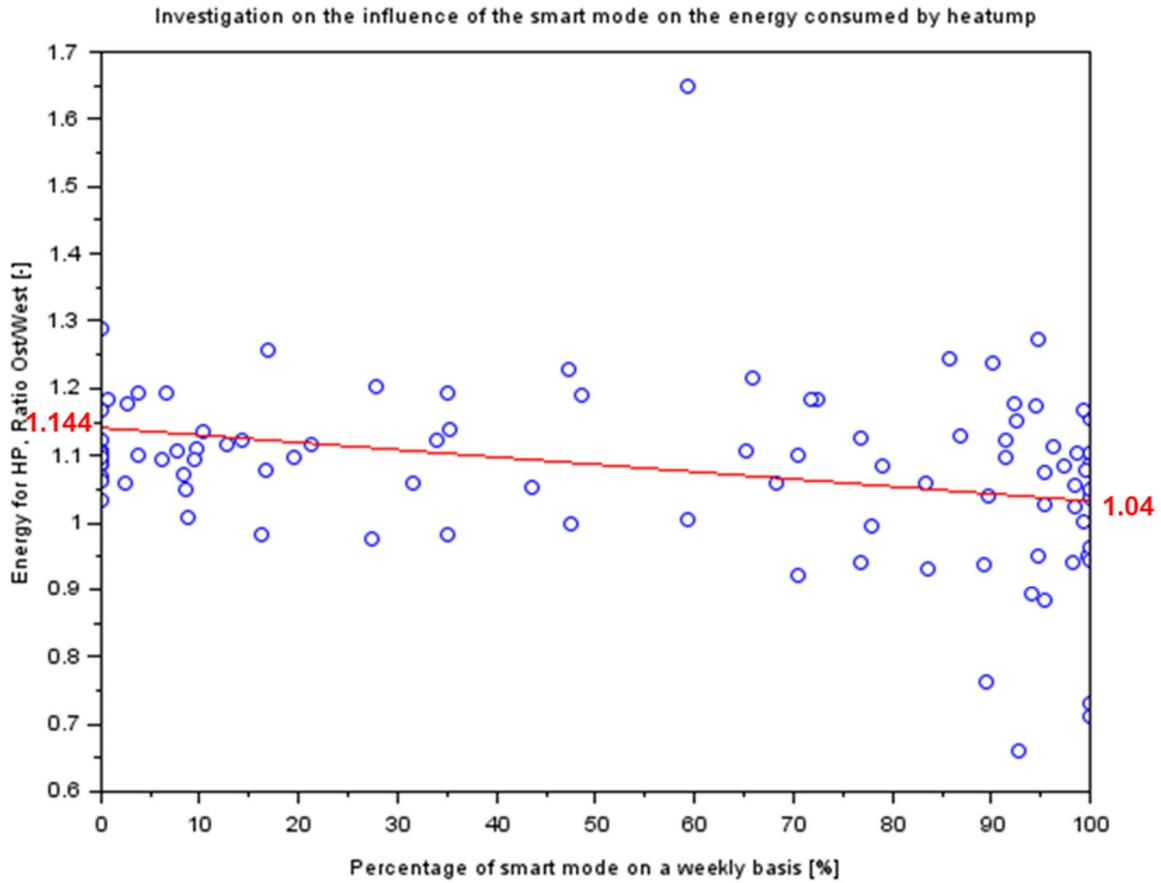


Abbildung 18: Vergleich des Energieverbrauchs der Wärmepumpe zwischen Ost (WarmUp-Optimierungsmodus) und West (klassischer Modus)

#### 4.4.2.2 Energiekosten

Die Energiekosten werden in den Abbildungen 19 und 20 ausgewertet. In Abbildung 19 sieht man den direkten Vergleich innerhalb der Auswertungsperiode. Auch hier ist insbesondere in den kalten Wintermonaten wenig Spielraum erkennbar, da der Energiebedarf in dieser Zeit wesentlich höher ist.

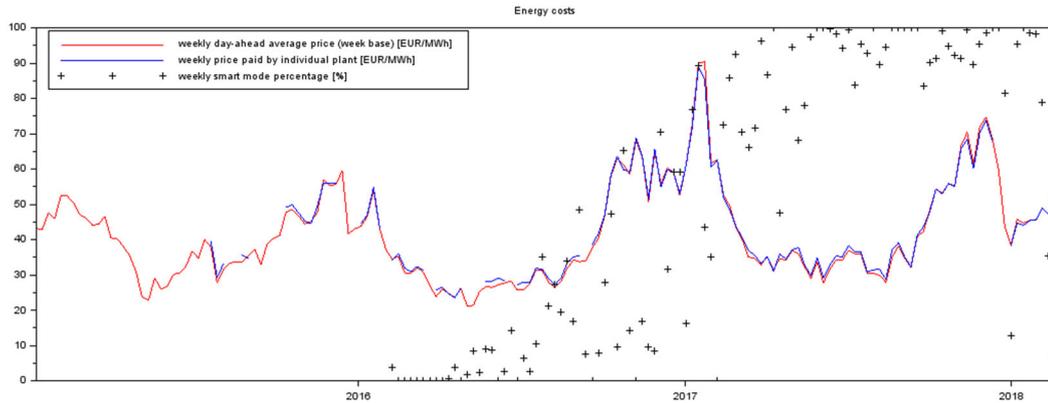


Abbildung 19: Die entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus werden mit den durchschnittlichen Energiekosten verglichen

In Abbildung 20 wird das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten und den durchschnittlichen Marktpreisen aufgezeigt. Im klassischen Modus sind die entstandenen Energiekosten um ca. 2.5% höher als die durchschnittlichen Marktpreise. Im Optimierungsmodus liegt das Verhältnis bei ca. 0.8%, so dass im WarmUp-Optimierungsmodus eine Reduktion der Energiekosten von 1.7 % erzielt wird.

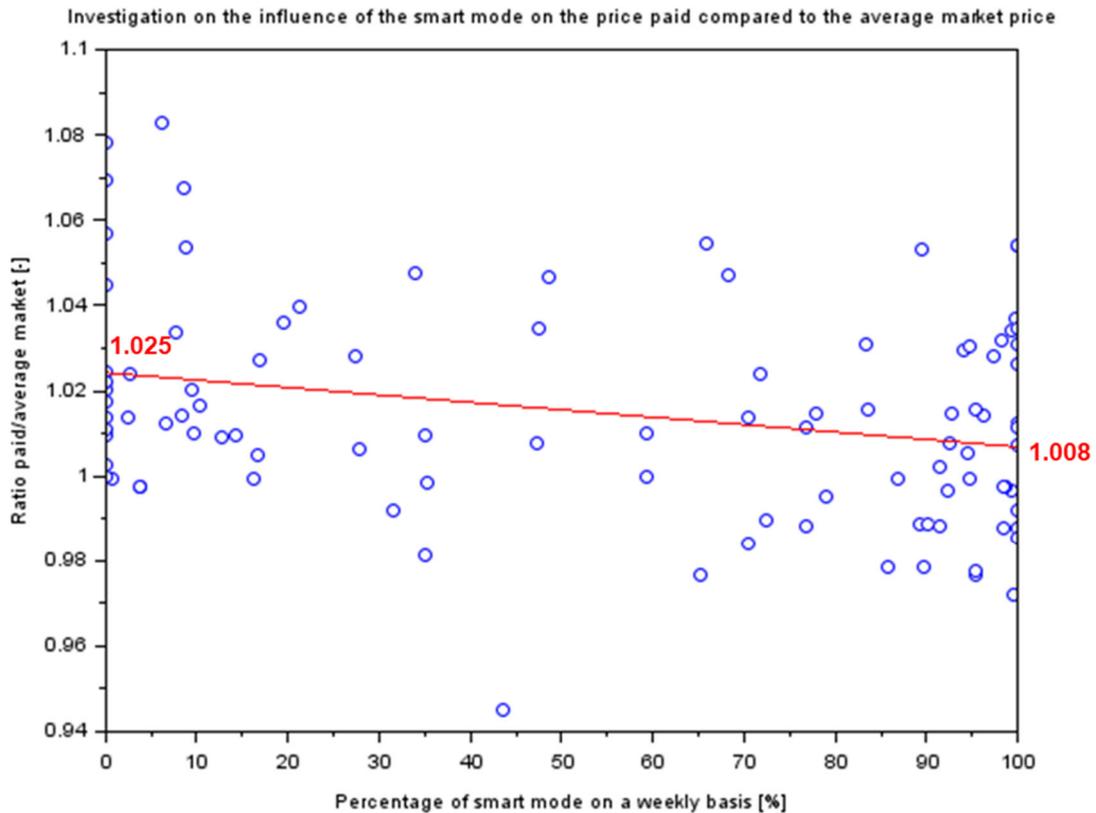
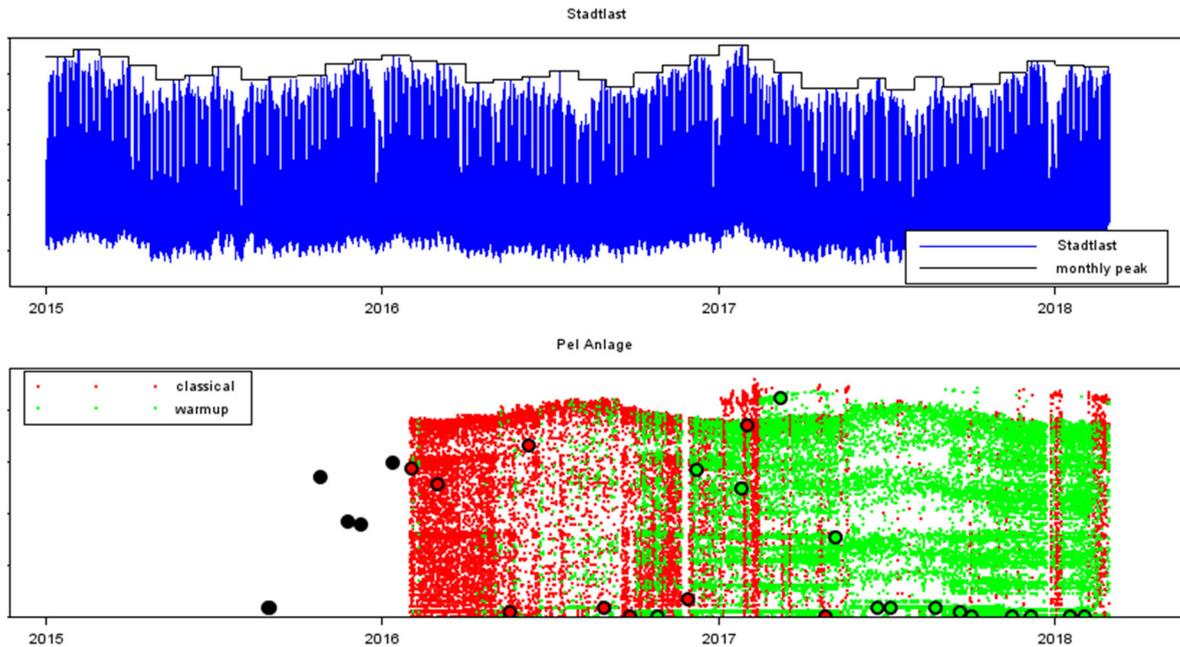


Abbildung 20: Das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus im Vergleich zu den durchschnittlichen Marktpreisen.



#### 4.4.2.3 Leistungspeaks aus ewz Sicht

In Abbildung 21 werden die entstandenen Netzkosten aufgrund Leistungspeaks aus Sicht ewz illustriert.



**Abbildung 21:** Die obere Grafik illustriert die Stadtlast mit den monatlichen Maximalwerten. Die untere Grafik zeigt zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für die Anlage bezogen wurde, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus.

Insgesamt sind vier Leistungspeaks (siehe obere grüne Punkte in Abbildung 21 unten) entstanden, wovon zwei, nämlich am 25.01.2017 um 11h30 mit 12 kW und am 03.09.2017 mit 21 kW, kurz nach Aktivierung des WarmUp-Optimierungsmodus entstanden sind. Diese zwei Leistungspeaks hätten bei konstantem WarmUp-Optimierungsmodus vermieden werden können. Die restlichen zwei Leistungspeaks (08.12.2016 um 11h00 mit 14 kW und 08.05.2017 mit 8 kW) sind zugunsten von tieferen Marktpreisen entstanden.

Wie in Abbildung 22 ersichtlich ist, konnten im Auswertungszeitraum die gemittelten monatlichen Kosten von ca. 25 CHF/Mt auf ca. 14 CHF/Mt reduziert werden. Dies entspricht einer Netzkosteneinsparung von 42 %.

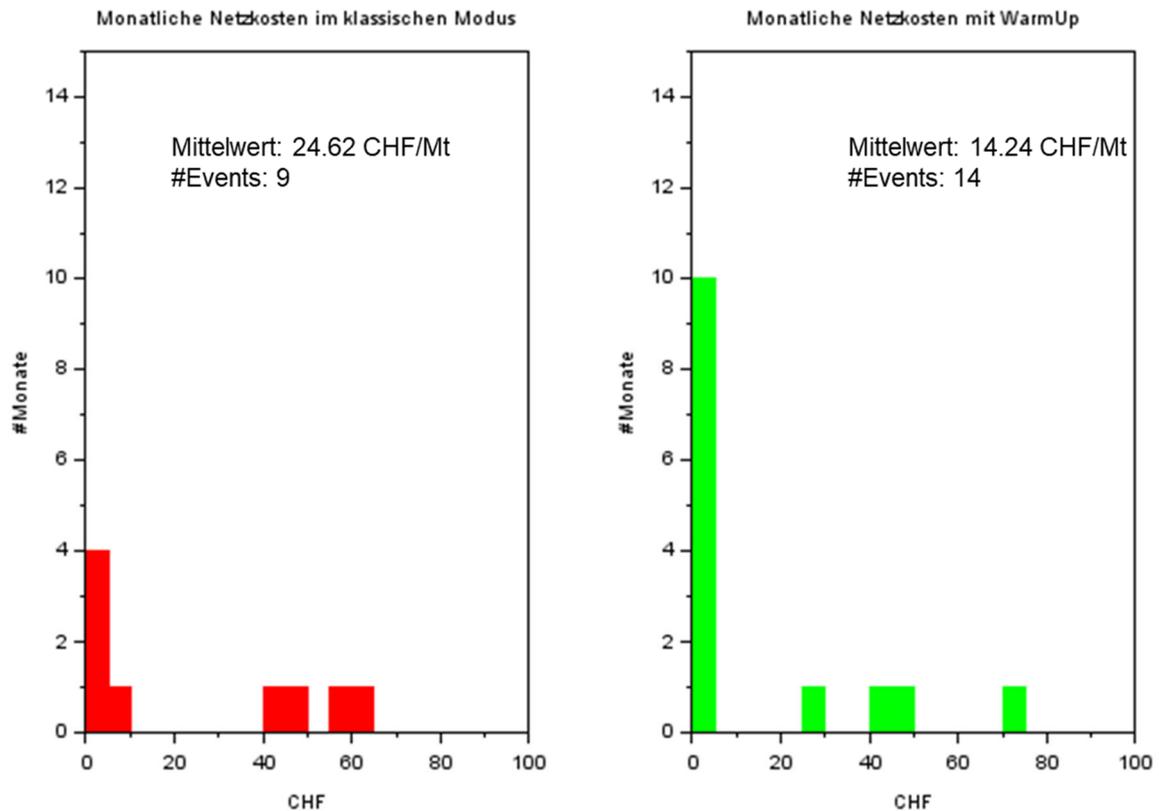


Abbildung 22: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)

#### 4.4.2.4 Leistungspeaks aus Kundensicht

In Abbildung 23 sind die Leistungspeaks im WarmUp-Optimierungsmodus sowie im klassischen Modus anhand der Monatspeaks gut ersichtlich. Während den kalten Wintermonaten konnten die Monatspeaks leicht reduziert werden. Da die zweite Anlage wenig Flexibilität aufweist, sprich Leistung der WP und Volumen des Warmwasserspeichers sind knapp bemessen, ist eine signifikante Reduktion der Leistungspeaks kaum möglich.

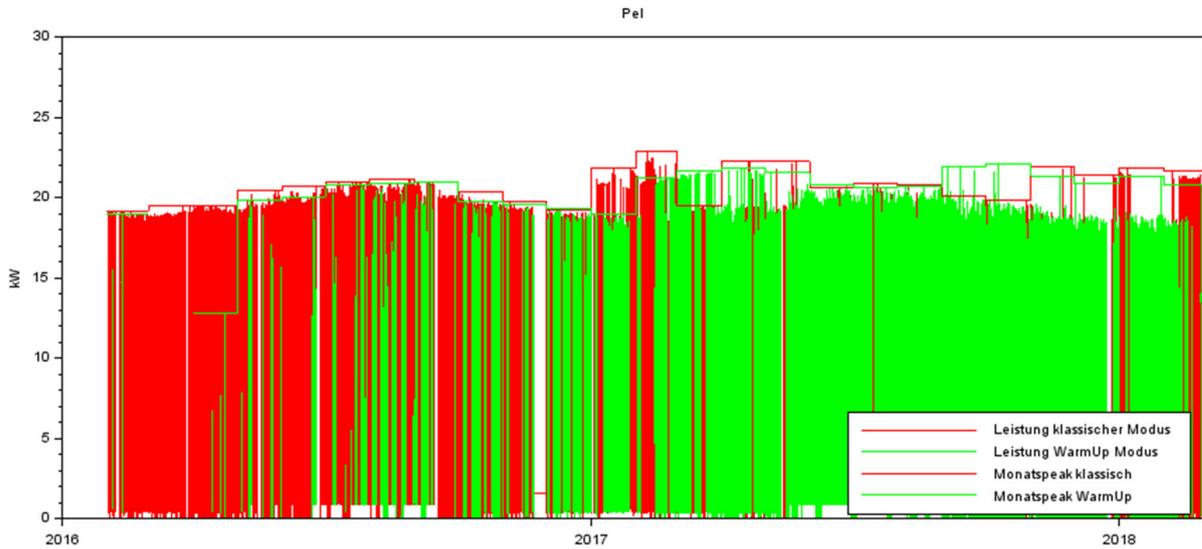


Abbildung 23: Illustration zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für diese Anlage bezogen wurden, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus. Zusätzlich sind die monatlichen Peaks ersichtlich.

Somit konnte im Auswertungszeitraum lediglich 2% Netzkosteneinsparung, aufgrund Reduktion eines Leistungspeaks von 150 CHF auf 100 CHF, erzielt werden.

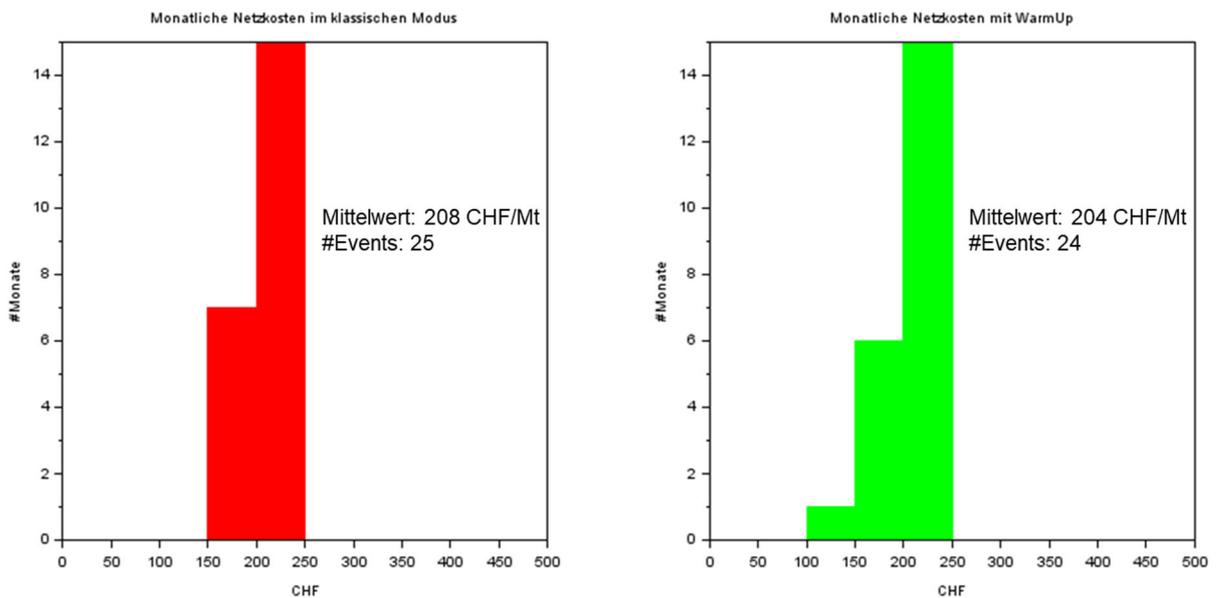


Abbildung 24: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)

#### 4.4.2.5 Gesamtergebnis

Die zweite Anlage konnte insgesamt folgende Resultate erzielen:

- Effizienz: ca. 2.4 % Verbesserung der Jahresarbeitszahl der WarmUp Anlage
- Energiekosten: ca. 2 % Energiekosteneinsparung
- Leistungspeaks aus ewz Sicht: ca. 42 % Einsparung des Leistungspeaks der WarmUp Anlage bei der ewz Stadtlast
- Leistungspeaks aus Kundensicht: ca. 2 % Einsparung von Leistungspeaks von ewz Energielösungen gegenüber dem Verteilnetz von ewz

#### 4.4.3 Dritte Anlage

Die dritte Anlage wurde am 01.06.2017 erfolgreich in Betrieb genommen. In der Zeitspanne vom 01.06.17 bis 01.03.18 konnte diese Anlage insgesamt während 82% im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben werden.

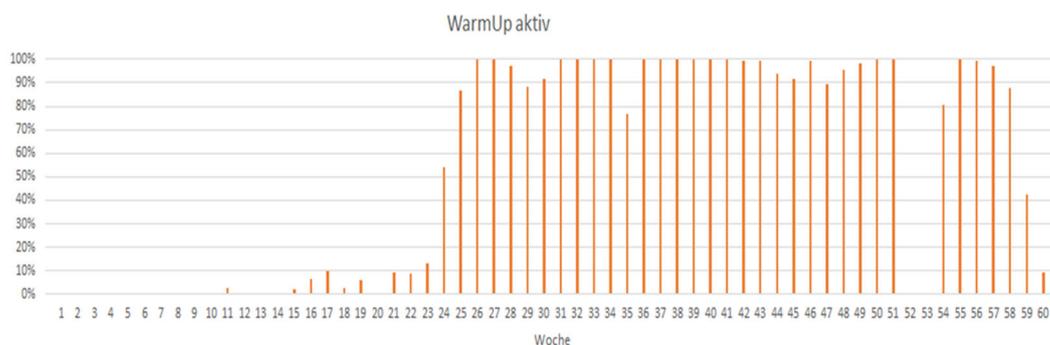
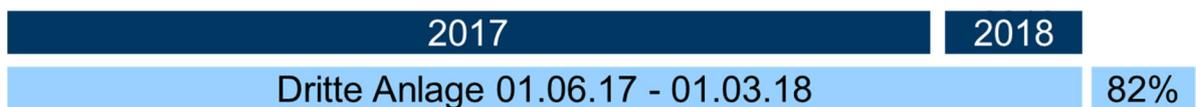
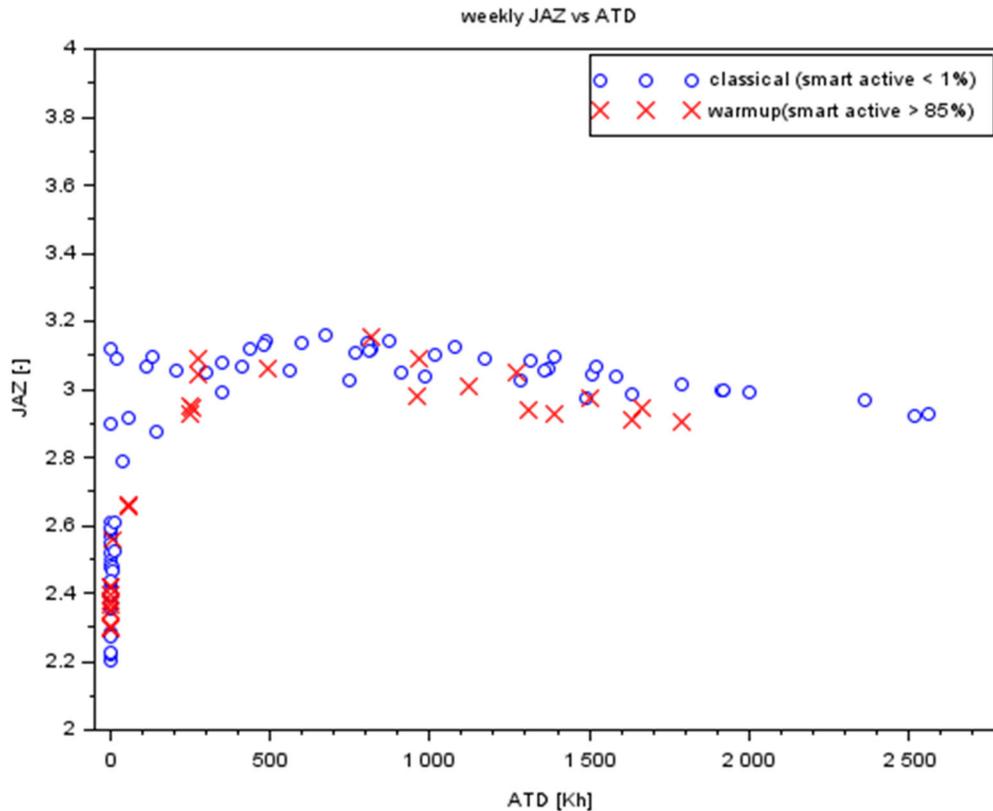


Abbildung 25: Visualisierung wie oft Warmup im Zeitraum vom 01.01.17 bis 01.03.18 aktiv war

##### 4.4.3.1 Effizienz

Im Auswertungszeitraum vom 01.01.2015 bis 01.03.2018 wurde die Effizienz in den klassischen Wochen (WarmUp deaktiviert) mit denjenigen der WarmUp Wochen verglichen. Insgesamt standen 74 klassische Wochen gegenüber 29 WarmUp-Optimierungsmodus Wochen zur Verfügung. In Abbildung 26 sind die Resultate ersichtlich.

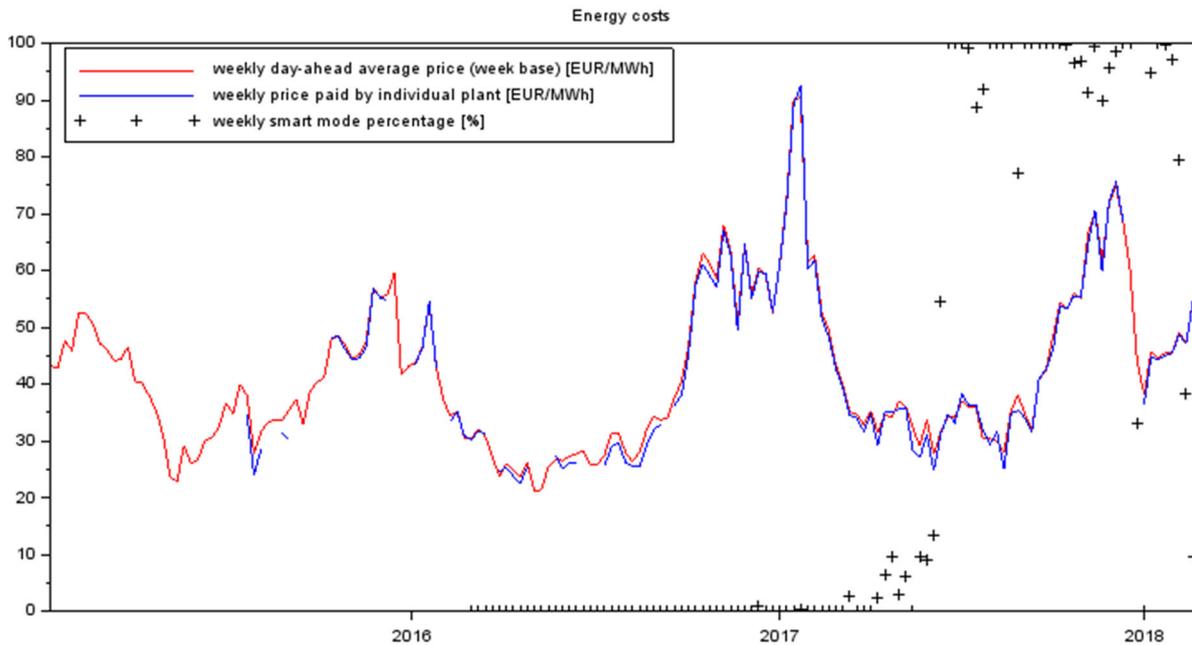


**Abbildung 26:** Effizienzvergleich mittels Jahresarbeitszahl (JAZ) im klassischen wie im WarmUp-Optimierungsmodus. Die Gradtage werden in Form von sogenannten Akkumulierten Temperaturdifferenzen (ATD) definiert.

Auf den ersten Blick, weist die Abbildung 26 eine Effizienzmindering im WarmUp-Optimierungsmodus auf. Dem ist lediglich in den kalten Wintermonaten so. Während dem Übergangsbetrieb ist der WarmUp-Optimierungsmodus effizienter, so dass in der Gesamtauswertung der WarmUp-Optimierungsmodus Energiemengen-gewichtet eine bessere Effizienz von 0,4 % ausweist.

#### 4.4.3.2 Energiekosten

Die Energiekosten werden in den Abbildungen 27 und 28 ausgewertet. In Abbildung 27 sieht man den direkten Vergleich innerhalb der Auswertungsperiode.



**Abbildung 27: Die entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus werden mit den durchschnittlichen Energiekosten verglichen**

In Abbildung 28 wird das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten und den durchschnittlichen Marktpreisen aufgezeigt. Dabei wird in roter Linie der Durchschnitt angezeigt. Im WarmUp-Optimierungsmodus ist eine Erhöhung der Energiekosten von 2.4 % ersichtlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei der gesamtheitlichen Optimierung mehr Potential bei der Senkung von Leistungspeaks erkannt wurde. Folglich wurde die elektrische Energie zwar nicht günstiger eingekauft, jedoch zum Zeitpunkt, an welchen das Netz weniger ausgelastet war.

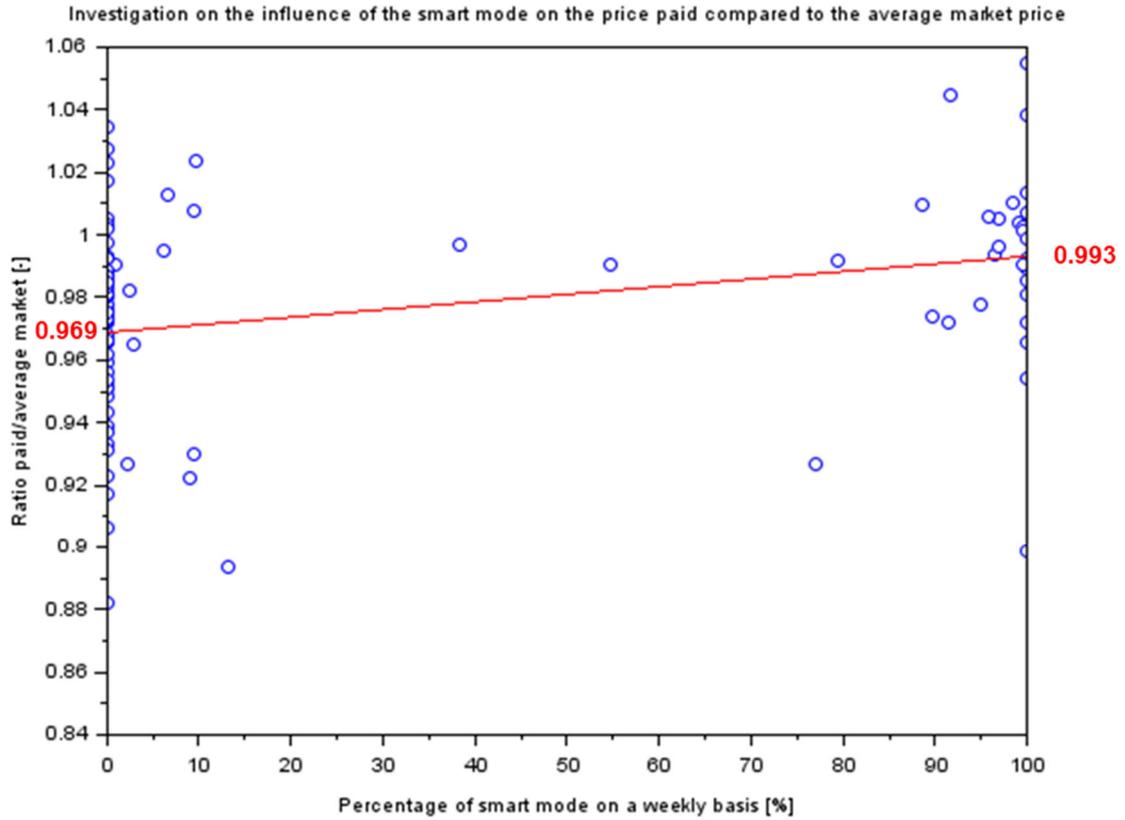


Abbildung 28: Das Verhältnis zwischen den entstandenen Energiekosten im WarmUp-Optimierungsmodus im Vergleich zu den durchschnittlichen Marktpreisen.

#### 4.4.3.3 Leistungspeaks aus ewz Sicht

In Abbildung 29 werden die entstandenen Netzkosten aufgrund Leistungspeaks aus Sicht ewz illustriert. Während dem Beobachtungszeitraum sind wie Netzpeaks entstanden. Diese sind, identisch wie bei der ersten Anlage, kurz nach dem Einschalten von WarmUp entstanden und könnten somit vollumfänglich vermieden werden.

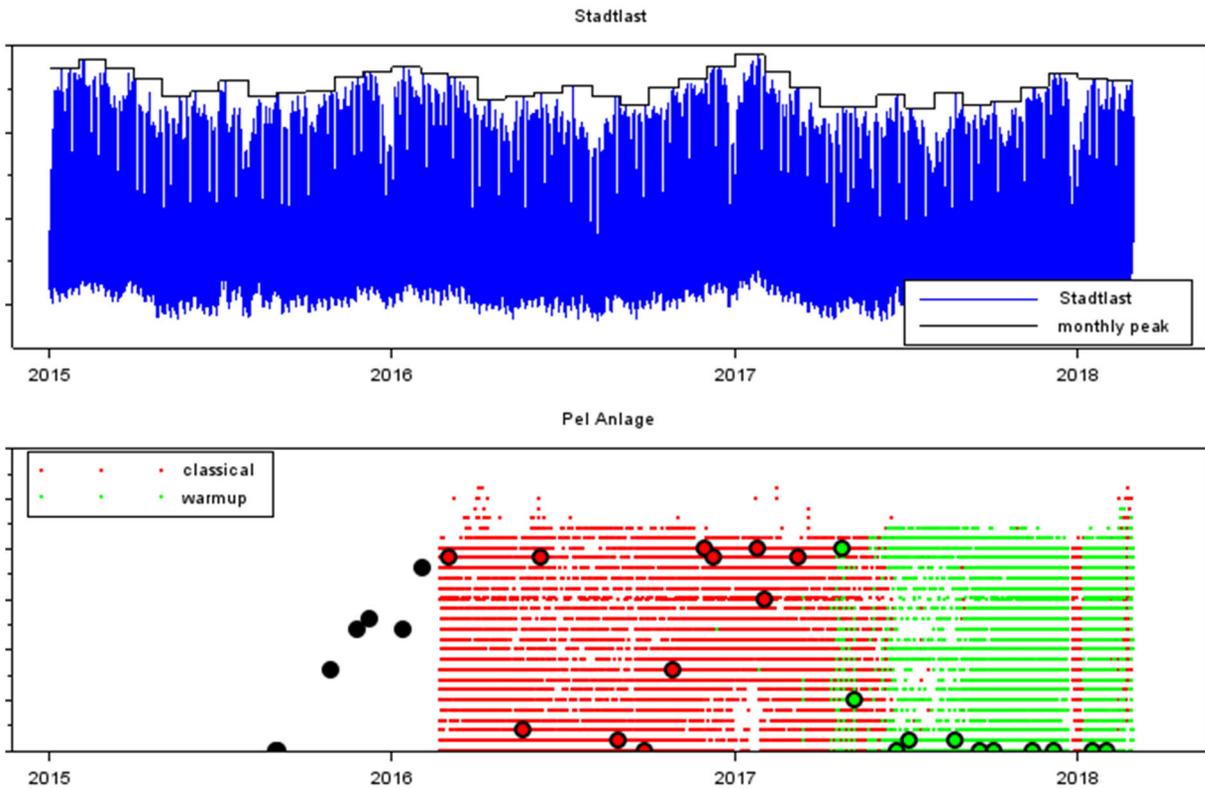


Abbildung 29: Die obere Grafik illustriert die Stadtlast mit den monatlichen Maximalwerten. Die untere Grafik zeigt zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für die Anlage bezogen wurden, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus.

Wie in Abbildung 30 ersichtlich ist, konnten im Auswertungszeitraum 81 % der Netzkosten eingespart werden. Diese könnten bei permanentem Betrieb im WarmUp – Optimierungsmodus zu 100 % reduziert werden.

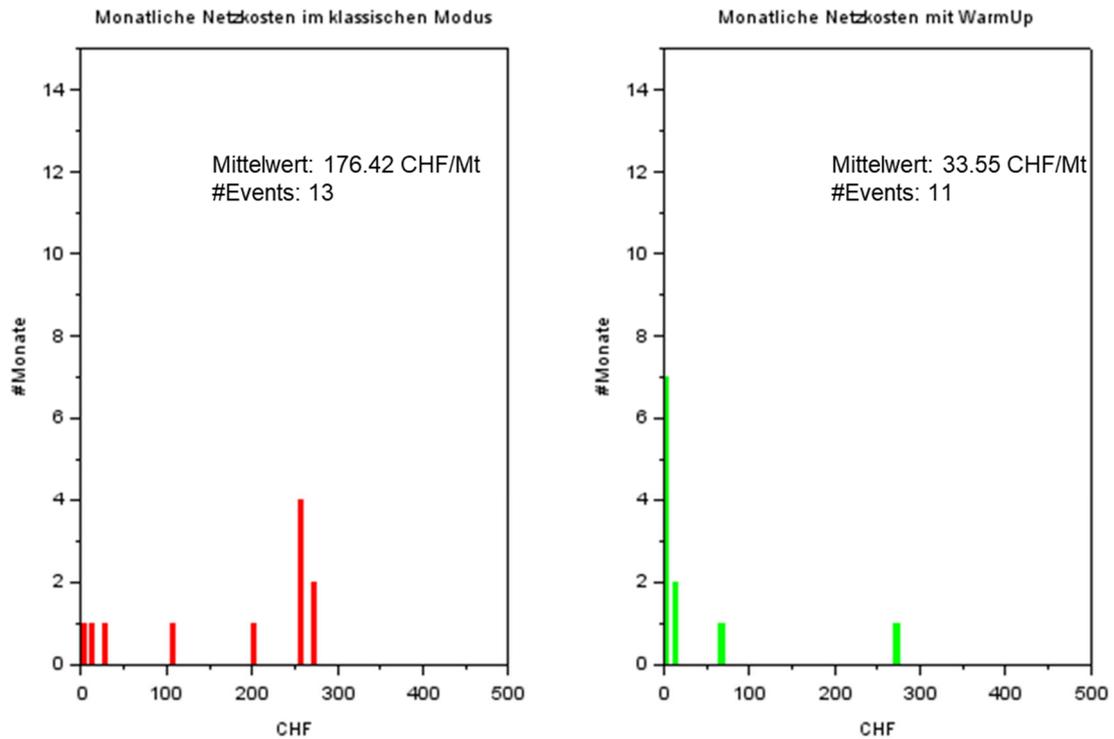


Abbildung 30: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)

#### 4.4.3.4 Leistungspeaks aus Kundensicht

In Abbildung 31 ist der Unterschied zwischen WarmUp-Optimierungsmodus und dem klassischen Modus anhand der Monatspeaks gut ersichtlich.

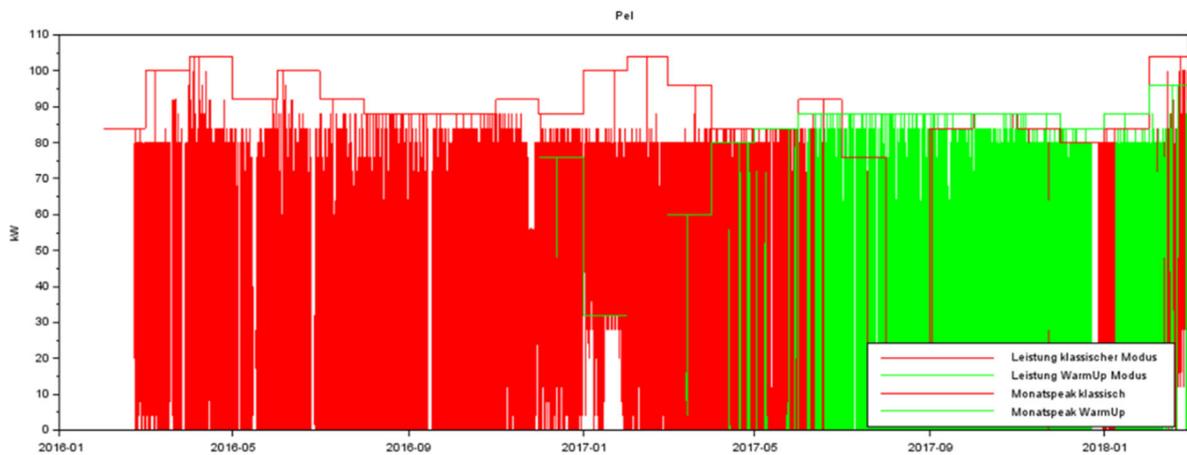


Abbildung 31: Illustration zu welchem Zeitpunkt welche Leistung für diese Anlage bezogen wurden, sowohl im klassischen Modus wie auch im WarmUp-Optimierungsmodus. Zusätzlich sind die monatlichen Peaks ersichtlich.

Im Auswertungszeitraum konnten 7.6 % der Netzkosten aufgrund Reduktion der Leistungspeaks eingespart werden.

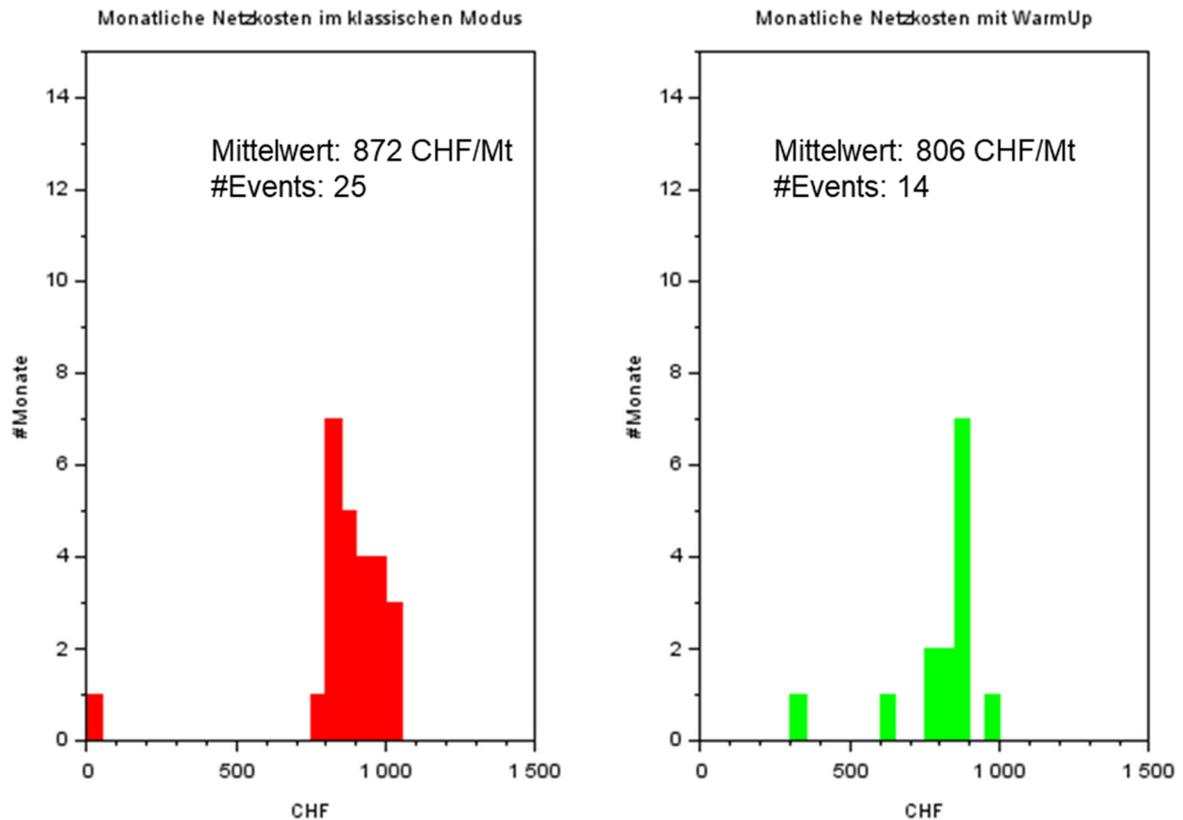


Abbildung 32: die monatlichen Netzkosten im klassischen Modus (links) sowie im WarmUp-Optimierungsmodus (rechts)

#### 4.4.3.5 Gesamtergebnis

Die dritte Anlage konnte insgesamt folgende Resultate erzielen:

- Effizienz: ca. 0.4 % Verbesserung der Jahresarbeitszahl der WarmUp Anlage
- Energiekosten: ca. 2 % Energiekostenerhöhung
- Leistungspeaks aus ewz Sicht: ca. 81 % Einsparung des Leistungspeaks der WarmUp Anlage bei der ewz Stadtlast
- Leistungspeaks aus Kundensicht: ca. 7.6 % Einsparung von Leistungspeaks von ewz Energielösungen gegenüber dem Verteilnetz von ewz

Die enormen Einsparungen bei den Netzkosten aus Kundensicht wurden in dieser ganzheitlichen Optimierung zu Lasten der Energiekosten optimiert.



## 4.5 Technologietransfer, Beitrag zur Standardisierung, „WarmUp-Ready“

In diesem Unterkapitel werden die WarmUp-Ready Kriterien beschrieben. Diese Vorgaben vereinfachen eine standardisierte Einbindung von Anlagen und werden unter «Must have» und «Nice to have» Kriterien unterschieden.

### 4.5.1 Must have

Zu Beginn der Planungsphase sollte sichergestellt werden, dass nachfolgende Bedingungen berücksichtigt werden:

- Mind. Fussbodenheizung, idealerweise noch trägere Systeme wie TABS (thermoaktive Bauelemente)
- Speicherkapazität Warmwasserspeicher so gross dimensionieren, dass 1-2 Ladungen pro Tag genügen
- Möglichkeit, Sollwerte (Heizkurve, Heizgrenze, Warmwasserspeicher Ein- und Ausschalttemperaturen, Sollwerte Hochhaltung etc.) von übergeordneter Regelung zu übersteuern
- Rücklauftemperatur Wohnungen messen (1 Fühler pro Haus)
- Temperaturfühler in der Abluft
- 3 Temperaturfühler pro Warmwasserspeicher
- Online Zugriff auf sämtliche Zählerdaten, Temperaturmessungen, etc.
- Überwachung von Grenzwerten mit Rückmeldung bei Alarm

### 4.5.2 Nice to have

- Separate Wärmezähler für Brauchwarmwasser und Heizung pro Gebäude
- Leistung Wärmepumpe etwas grösser als Standardauslegung
- Bei mehrstufigen WPs oder kontinuierlich geregelten WPs muss Leistungssollwert oder Grenze für Stufen beeinflusst werden können
- Vereinzelt Raumtemperaturfühler (v.a. in kritischen Räumen)
- Flexibilität: bewusstes Einbauen von zusätzlicher Speicherkapazität, soweit sinnvoll
- Zuschaltbare Speicherkapazität
- Temperaturfühler in der Gebäudemasse
- Vorausschauendes Heizen ermöglichen (keine/übersteuerbare Raumthermostaten)



## 5 Schlussfolgerungen

In WarmUp Phase 3 konnten vier verschiedene Anlagen erfolgreich eingebunden werden, wovon zwei Anlagen während 14 Monaten im WarmUp-Optimierungsmodus betrieben wurden. Die restlichen zwei Anlagen wurden ab Juni 2017 erfolgreich in den WarmUp-Optimierungsmodus aktiviert. Die vierte Anlage wurde ab November 2017 bewusst in den klassischen Modus versetzt. Das Konzept konnte umgesetzt werden und die übergeordnete, ganzheitliche Optimierung funktioniert bei allen vier Anlagen über alle Stufen der Kaskade bis hin zur Umrechnung auf Sollwerte für die Maschinen. Das Energiemanagement-System funktioniert automatisch und reagiert so weit wie möglich eigenständig auf bevorstehende Probleme. Dank der vorausschauenden Betriebsweise ist es dem WarmUp System möglich, frühzeitig präventiv Anpassungen vorzunehmen, so dass Probleme möglichst vermieden werden. Mit dem Projekt WarmUp konnte an konkreten Anlagen nachgewiesen werden, dass eine gewisse Flexibilität existiert und entsprechend genutzt werden kann. Insgesamt konnten folgende Resultate erzielt werden:

	<i>Effizienz</i>	<i>Energiekosten</i>	<i>Leistungspeaks aus ewz Sicht</i>	<i>Leistungspeaks aus Kundensicht</i>
Erste Anlage	+ 9 %	-8 %	-72 %	-21 %
Zweite Anlage	+ 2.4 %	-2 %	-42 %	-2 %
Dritte Anlage	+ 0.4 %	+2 %	-81 %	- 7.6 %

Bis auf die höheren Energiekosten der dritten Anlage, konnten die restlichen Aspekte erfolgreich optimiert werden und teilweise signifikante monetäre Einsparungen erzielt werden.

Die notwendigen Schnittstellen zu den bereits existierenden Systemen wurden erstellt und funktionieren tadellos. Es konnten zahlreiche wertvolle Erfahrungen mit der Anbindung von Wärmepumpen gesammelt werden.

Die Kernfragen dieses Projekts können wie folgt beantwortet werden:

- **Wie viel Flexibilität** kann tatsächlich genutzt werden?  
Die verwertbare Flexibilität ist abhängig von der thermischen Trägheit des Gebäudes. Dieser Wert kann empirisch evaluiert werden, indem beispielsweise ermittelt wird, wie lange die Heizung aussetzen darf, bis sich das Gebäude z. B. bei einer Aussentemperatur von 0 °C um 1 K abkühlt. Anschliessend kann ermittelt werden wie lange die Aufheizphase um 1 K andauert. Zudem ist der Wert der Flexibilität stark von der Dimensionierung der Wärmepumpe abhängig. Wenn an kalten Wintertagen die WP durchgehend läuft, liegt keine Flexibilität vor.
- Wie können wir **mit bestehenden Gebäudeleitsystemen interagieren**?  
Technisch machbar, allerdings je komplexer und grösser bestehende Anlagen sind, desto aufwändiger ist die Anbindung. Für die Vereinfachung der Neuanbindung von Anlagen wurden WarmUp-Ready Kriterien (siehe Unterkapitel 4.5) definiert.



- Wie kann die **Flexibilität auf dem Markt verwertet** werden?  
Je mehr Reserve in der Dimensionierung der Anlage vorhanden ist, desto mehr hat die Flexibilität an der EPEX wert. Generell treten die positiven Effekte eher im Frühling und Herbst als im Winter auf, wenn die Anlagen durchlaufen.
- **Welcher Wert** hat diese Flexibilität?  
Insbesondere bei den Netzkosten von ewz gegenüber Swissgrid kann eingespart werden. Aufgrund der Zahlen konnte ein Flex-Index von ca. 35 CHF/kW/Jahr ausgemacht werden. Der Flex-Index entspricht dem Wert, der eine kW installierte Leistung pro Jahr aufweist.
- Welchen Einfluss haben wir auf die **Energieeffizienz der Anlagen**?  
Die Effizienz konnte bei allen Anlagen gesteigert werden. Der maximale Wert lag bei 9,2% Effizienzsteigerung. Man kann die vorhandene Flexibilität der Anlagen nutzen, ohne dass die Effizienz schlechter wird oder es negative Effekte auf den Komfort hätte.

Hinsichtlich der Weiterentwicklung von WarmUp wurde bei der Anbindung dieser vier Anlagen die Skalierbarkeit thematisiert. Hierzu wird in Abbildung 33 WarmUp modular dargestellt, so dass bei den einzelnen Modulen auf die Skalierbarkeit eingegangen werden kann.

Zwecks vereinfachter Einbindung neuer Anlagen wurden die WarmUp-Ready Kriterien (siehe Unterkapitel 4.5) definiert. Falls diese gewährleistet sind, ist die Anbindung relativ einfach zu erreichen. Hierbei sollte darauf geachtet werden, dass die lokale Steuerung keine speziellen Regeln enthält.

Eine Herausforderung bleibt nach wie vor die Modellierung dieser Anlagen, da die Anlagen jeweils spezifisch sind und keine Standards vorliegen. Zudem sind die Verbrauchsprofile jeweils individuell und müssen vorgängig ermittelt werden. Dies wurde im Projekt WarmUp leicht unterschätzt. Um diese Herausforderung zu meistern, könnte beispielsweise mittels Machine Learning eine Skalierfähigkeit erreicht werden. Je mehr Daten der Anlagen vorgängig zur Verfügung stehen, desto einfacher ist deren Einbindung.

Die Optimierungskaskaden mussten für die vier Anlagen jeweils unterschiedlich ausgelegt werden. Im Gegenzug sind die restlichen Module relativ einfach skalierbar.

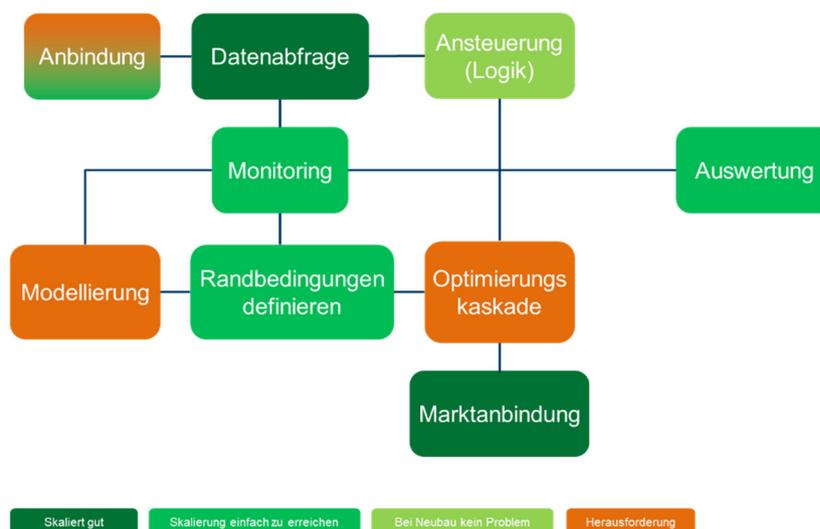


Abbildung 33: Modulare Bauweise von WarmUp



Das Projekt WarmUp hat gezeigt, dass die Einbindung verschiedener Anlagen aufgrund deren Vielfalt herausfordernd ist. Ein einfacheres Model für die Sicherstellung von Lastmanagement ist beispielsweise die Einbindung von Warmwasserspeichern. Die Warmwasseraufbereitung ist einfacher anzusteuern und entsprechend skalierbar. Diese Flexibilität könnte folglich einfacher für die Integration von neuen erneuerbaren Energien wie Wind und Photovoltaik genutzt werden. In einem nächsten Schritt werden das Potential sowie die Skalierbarkeit dieses Konzepts geprüft.



## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Prognos AG, Infrac AG, TEP Energy GmbH, „Analyse des schweizerischen Energieverbrauchs 2000 - 2014 nach Verwendungszwecken,“ Bundesamt für Energie Bern, Oktober 2015.
- [2] Samuel Pfaffen, Karl Werlen, „WARMup - Optimale Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern; Schlussbericht BFE Forschungsprojekt Vertrag Nr. SI/500710-01,“ Visp, 29. November 2013.
- [3] Pkh, „Wikipedia,“ 04 11 2007. [Online]. Available: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typical\\_State\\_space\\_model.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Typical_State_space_model.svg). [Zugriff am 21 11 2013].
- [4] EEX, „European Energy Exchange,“ [Online]. Available: <http://www.eex.com/en/>.
- [5] EPEX, „European Power Exchange,“ [Online]. Available: <http://www.epexspot.com/en/>.
- [6] M. Räsänen et al., „Identification of consumers' price responses in the dynamic pricing of electricity,“ Otakaari 1, FIN-02150 Espoo, 1995.
- [7] Öko-Institut e.V., Dr. F. Ch. Matthes, „Jahresdauerlinien PowerFlex“.
- [8] EPEX SPOT, „Kontinuierlicher Intraday-Handel,“ [Online]. Available: [https://www.epexspot.com/de/produkte/intradaycontinuous/intraday\\_vorlaufzeit](https://www.epexspot.com/de/produkte/intradaycontinuous/intraday_vorlaufzeit). [Zugriff am 18.10.2016].
- [9] Samuel Pfaffen, Florian Kienzle, „Gebäude als Energiespeicher,“ 50,2 - das Magazin für intelligente Stromnetze; 1/2014.
- [10] ewz, „WarmUp2 - Intelligente Vernetzung und Steuerung von Wärmepumpenanlagen; Projektflyer,“ Juli 2014.
- [11] S. Pfaffen, „Tertiärregelenergie im Wärmepool für den Schweizer Markt, Master's thesis PSL 1221, Power Systems Laboratory, ETH Zürich,“ August 2012.