

## Schlussbericht

# WarmUp Phase 2

# Pilotversuch zur optimalen Verwertung der Flexibilität von thermischen Speichern





**Datum:** 31.10.2016

**Ort:** Visp

**Auftraggeberin:**

Bundesamt für Energie BFE  
Forschungsprogramm Netze  
CH-3003 Bern  
[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

**Industriepartner und Kofinanzierung:**

Elektrizitätswerk der Stadt Zürich ewz, CH-8050 Zürich

**Auftragnehmerin:**

Misurio AG  
Bahnhofplatz 1a  
CH-3930 Visp

[www.misurio.ch](http://www.misurio.ch)

**Autoren:**

Samuel Pfaffen, Misurio AG, [samuel.pfaffen@misurio.ch](mailto:samuel.pfaffen@misurio.ch)  
Dr. Karl Werlen, Misurio AG, [karl.werlen@misurio.ch](mailto:karl.werlen@misurio.ch)

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

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

**BFE-Vertragsnummer:** SI/500710-02

**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 optimal verwertet werden kann. Basierend auf den Ergebnissen aus WarmUp1 wurde im Rahmen dieser 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 Maschinen. 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).

Ab dem 01.01.2017 wird eine einjährige Betriebsphase im WarmUp-Modus durchgeführt. Anhand von Key Performance Indikatoren wird der WarmUp-Modus anschliessend mit der klassischen Betriebsweise verglichen. Dadurch wird es möglich sein, den Wert der Flexibilität zu quantifizieren. Die Resultate werden zusammen mit den Erkenntnissen aus der Einbindung von weiteren Anlagen im Schlussbericht von WarmUp3 publiziert.

## Résumée

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 WarmUp1, 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.

A partir du 1<sup>er</sup> janvier 2017 débutera une phase de mise en service durant une année en mode WarmUp. Une comparaison du mode WarmUp avec le mode opérationnel classique sera effectuée à l'aide de Key Performance Indicators. Grâce à cela, il sera possible de quantifier la valeur de la flexibilité. Les résultats seront publiés dans le rapport final de WarmUp3, qui contiendra également les connaissances emmagasinées par l'intégration d'installations supplémentaires.



## 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 WarmUp1 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).

On January 1, 2017, a one year phase starts in which the system is operated in WarmUp mode. Afterwards, using Key Performance Indicators, the WarmUp mode will be compared with the normal operation mode. It will then be possible to quantify the economic value of the flexibility. These results will be published, together with further findings from the integration of other buildings, in the final report of WarmUp3.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>3</b>
<b>Résumée</b> .....	<b>3</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Ausgangslage</b> .....	<b>8</b>
1.1 Motivation .....	8
1.2 Stakeholder im Projekt.....	9
1.3 Ergebnisse aus WarmUp1 .....	10
1.4 Verwandte Projekte.....	11
<b>2 Ziele der Arbeit</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Vorgehen</b> .....	<b>14</b>
3.1 Arbeitspakete .....	14
3.2 Meilensteine .....	16
3.3 Kriterien für die Selektion der Anlagen .....	16
3.4 Prozesse der Implementierung .....	18
<b>4 Grundlagen</b> .....	<b>19</b>
4.1 Vergleich Pumpspeicher und thermische Speicher .....	19
4.2 Vergleich Speicherkapazität.....	20
4.3 Situation in der Energiewirtschaft .....	21
4.3.1 Energy-Only-Markt.....	21
4.3.2 Regelleistung .....	24
4.3.3 Netznutzungskosten .....	24
4.4 Marktpotential.....	25
4.5 Energetisches Potential .....	26
<b>5 Konzept</b> .....	<b>28</b>
5.1 Ganzheitliche Betrachtung .....	28
5.2 Übersicht möglicher Anwendungen .....	29
5.2.1 Handelsgeschäfte vs. (lokale) Energieeffizienz .....	30
5.2.2 Regelleistung vs. (lokale) Energieeffizienz .....	31
5.2.3 Synergien mit anderen Energieträgern vs. Emissionen der Wärmeerzeugung .....	32
5.2.4 Stromhandel vs. Netznutzungskosten .....	33
5.3 Anlagenbeschrieb .....	34
5.3.1 Fussbodenheizung.....	34
5.3.2 Thermoaktiven Bauteilsysteme.....	35
5.3.3 Kühlung .....	35



5.3.4	Brauchwarmwasser .....	35
5.3.5	Lüftung .....	35
5.4	Optimierung .....	35
5.4.1	Modellierung .....	36
5.4.2	Zielfunktion .....	39
5.4.3	Nebenbedingungen .....	39
5.4.4	Optimierungskaskade .....	40
5.5	Eingriff in das bestehende Gebäudeleitsystem .....	42
5.5.1	Stakeholder bei der Anbindung von Anlagen .....	42
5.5.2	Dynamische Sollwertübersteuerung .....	42
5.6	Exception Handling .....	43
5.6.1	Alarme .....	43
5.6.2	Automatischer Stopp .....	44
5.6.3	Kommunikationsausfall .....	44
5.6.4	Manueller Stopp .....	44
<b>6</b>	<b>Resultate .....</b>	<b>45</b>
6.1	AP1 - Anlagen .....	45
6.1.1	Parameteridentifikation für das Gebäudemodell .....	45
6.1.2	Zustandserfassung in den Boilern .....	45
6.1.3	Anbindung an die bestehende Gebäudeautomation .....	46
6.1.4	Erkenntnisse aus der Anbindung der Pilotanlage .....	47
6.1.5	WarmUp-ready Kriterien .....	47
6.2	AP2 – Kommunikation .....	48
6.2.1	Schnittstelle MST <-> Misurio (1) .....	49
6.2.2	Schnittstelle Misurio <-> ewz-EDL (2) .....	49
6.2.3	Schnittstelle Misurio <-> ewz-Handel (3) .....	50
6.2.4	Schnittstelle Misurio <-> EPEX Spot (5) .....	50
6.3	AP3 - Optimierung und Monitoring .....	50
6.3.1	Geschäftsprozesse .....	50
6.3.2	Optimierung .....	52
6.3.3	Webapplikation .....	52
6.4	AP4 - Test und Inbetriebnahme .....	58
6.5	AP5 – Erfolgskontrolle .....	59
6.5.1	KPI .....	60
6.5.2	Qualitative Einschätzung des Potentials nach aktuellem Stand .....	61
6.6	AP6 - Betriebsphase .....	63
6.7	Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten .....	63
6.7.1	Gesamtkonzept .....	63
6.7.2	Funktionsbeschrieb .....	63
6.7.3	Modelle der thermischen Speicher und Verbraucher .....	64
6.7.4	Installation Webserver .....	64
6.7.5	Webapplikation .....	64



6.7.6	Weiterentwicklung Optimierungen .....	65
6.7.7	Nationale Zusammenarbeit.....	65
6.7.8	Internationale Zusammenarbeit .....	65
6.7.9	Externe Kommunikation.....	65
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>66</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>69</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 (Warmwasserboiler, 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.

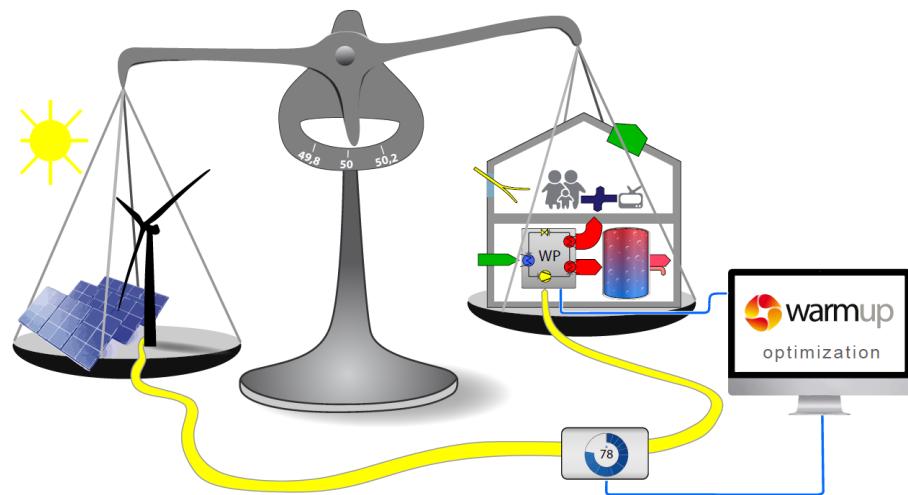


Abbildung 1: Grundidee von WarmUp: Nutzung der Flexibilität von thermischen Speichern zu Gunsten des elektrischen Energiesystems

Im WarmUp Projekt wird die thermische Speicherkapazität der Gebäudemasse und der Boiler 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 Wärmebedarf beeinträchtigt wird. Die flexible Steuerung der Wärmepumpen wird für verschiedene Anwendungen genutzt. Beispielsweise kann der Wärmebedarf dann gedeckt werden, wenn die Strompreise tief sind. In Zeiten hoher Netzspitzen kann die Last durch Ausschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Spannungsüberhöhungen im Verteilnetz können durch Zuschalten von Wärmepumpen reduziert werden. Den steilen Rampen der PV-Einspeisung kann mit Lastmanagement besser entgegengewirkt werden, als dies fossile Kraftwerke können. Durch Einbezug von Wetterprognosen und Bedarfsmodellen kann die Wärmeerzeugung vorausschauend agieren und möglicherweise Effizienz sowie Komfort steigern.



WarmUp leistet in mehrererlei 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 Marktfeld 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.

## 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:

- ewz Energiedienstleistungen (Contractor)
- ewz Verteilnetz
- ewz Handel / Energiewirtschaft
- Endkunden
- Misurio (Entwickler des Energie-Management-Systems)
- Drittfirmen (Lieferant bisheriges Gebäudeleitsystem, Prognoselieferanten, EPEX Spot, ...)

Die verschiedenen Gruppen 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 zentral bei der Spezifikation der Anbindung an das bestehende Gebäudeleitsystem. Der bisherige Lieferant des Gebäudeleitsystems muss einige Anpassungen am System vornehmen. Die Aufträge hierfür werden von ewz vergeben. Die Prognosen werden von bestehenden Lieferanten bezogen. Um Marktdaten empfangen zu können, wird eine Schnittstelle zur EPEX Spot erstellt. Eine Übersicht aller Schnittstellen wird in Kapitel 6.1 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 bzgl. der effizienten Koordination von Aufträgen an externe Dienstleister. Die Ausgangslage, dass Contractor, Verteilnetztreiber und Handel zur gleichen Firma gehören, ist äusserst wertvoll.

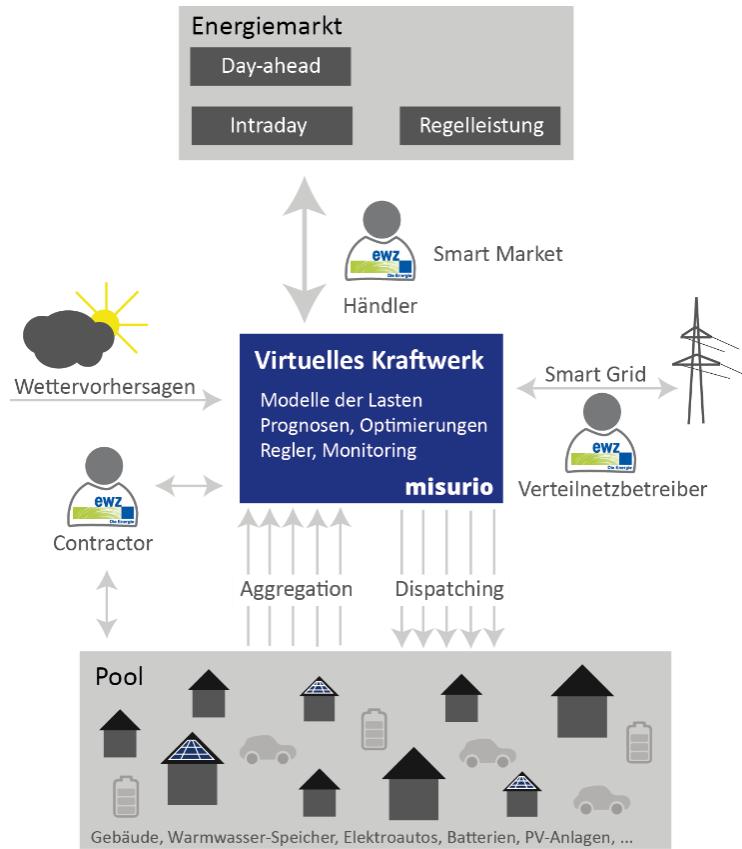


Abbildung 2: Stakeholder im Projekt WarmUp.

### 1.3 Ergebnisse aus WarmUp1

In WarmUp1 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 Leistungsspitzen (vermiedene 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 davon 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 WarmUp1 sind theoretischer Natur und sollen in WarmUp2 im Feldversuch nachgewiesen werden.

## 1.4 Verwandte Projekte

Im Zusammenhang mit der Energiewende und der zunehmenden Konvergenz der IT- und Energiebranche entstehen mannigfaltige Dienstleistungsangebote von unterschiedlichen Anbietern. Sie alle haben zum Ziel, mehr Intelligenz in das System der Stromversorgung zu bringen, damit Produktion, Verbrauch und Netzkapazität effizienter aufeinander abgestimmt werden.

In den USA gibt es mehrere Firmen die „Demand Response“ bereits auf kommerzieller Basis anbieten. Diese umfassen teilweise mehrere 1'000 MW Leistung. Sie fokussieren auf institutionelle Organisationen und Industriekunden, z.B. EnerNOC. In Europa – vor allem in Deutschland, UK und den skandinavischen Ländern gibt es ebenfalls bereits Projekte und Anwendungen im Bereich „Demand Response“. Im Folgenden werden einige Firmen und deren Produkte beschrieben, die sich im gleichen Markt wie das Projekt WarmUp bewegen. Der Fokus liegt dabei auf Anbietern in der Schweiz.

Alpiq bietet mit Xamax ein Produkt zur Spitzenlast-Kappung an. Die meisten Netztarife für Industriekunden verrechnen nicht nur den Strombezug (kWh), sondern auch die höchste Leistung (kW), die monatlich bezogen wird. Typischerweise treten diese Lastspitzen nur für ganz kurze Zeit auf und verursachen hohe Kosten. Die Optimierung des Bezugsprofils ist der Hauptfokus von Alpiq/Xamax. Das System kann auch für die Bereitstellung von Regelleistung genutzt werden. Ein anderes Produkt von Alpiq ist «GridSense». GridSense ist eine Komponente, die in andere Geräte integriert werden kann und autonom Lasten zugunsten des Verteilnetzes steuert.

BKW versucht mit Powerflex flexible Lasten bei Industriekunden zu akquirieren. Diese erhalten einen Anteil am Erlös für die zur Verfügung gestellte Flexibilität. BKW kann mit eigenen Kraftwerken Back-up Kapazitäten stellen bzw. ist mit diesen traditionell am Regelenergiemarkt tätig. Das Potential flexibler Lasten für Sekundärregelleistung bei Industrie und Dienstleistungen wird auf 215 MW geschätzt. Die Hard- & Software stammen von Entelios, seit einigen Jahren ein Tochterunternehmen von EnerNOC.

Unter dem Namen Flexpool bietet CKW Besitzern von flexiblen Anlagen (Stromproduzenten oder -verbrauchern) die Möglichkeit, Primär- und Sekundärregelreserve in Nicht-Standardgrössen asymmetrisch, unterwöchentlich oder sogar nur zu bestimmten Zeiten zu vermarkten. CKW ist mit eigenen Wasserkraftwerken traditionellerweise bereits in diesen Märkten präsent.

EBL bietet unter dem Label "Schweizstrom" Endverbrauchern die Möglichkeit an, mit unterbrechbaren Lasten Zusatzerlöse am Regelenergiemarkt zu erzielen.

Swisscom Energy Solutions bietet mit tiko eine Lösung für Lastmanagement von kleinen Verbrauchern an. Die Flexibilität wir am Regelenergiemarkt verkauft (Sekundärregelleistung). Swisscom hat in der ersten Phase v.a. Kapazitäten bei Haushalten (Wärmepumpen, Boiler) adressiert. Privatkunden erhalten eine App, mit der sie ihren Stromverbrauch und den Funktionszustand ihrer Heizung (mit



Alarmfunktion) sehen. Mittlerweile werden auch grössere Verbraucher akquiriert. Das Projekt wurde vom BFE als Leuchtturmprojekt ausgezeichnet.

Die Firma Virtual Global Systems AG (VGLS) ist seit kurzem im Regelenergiemarkt aktiv. Unter anderem bietet sie Lastmanagement mit gleichzeitiger Teilnahme am Tertiärmarkt und Zugang zu Energiemarkt. Es wurde ein eigenes Security Data Gateway entwickelt.

EnerNOC ist ein grosses international tätiges Unternehmen aus den USA, das u.a. in der Schweiz Fuss fassen will. Gemäss eigenen Aussagen gibt es bereits tausende Kunden, die ihre «cloud based energy intelligence software» nutzen. Das Angebot umfasst die Beschaffung, Nutzung von Flexibilität, Rechnungsstellung, Optimierungen und die Berichterstattung. EnerNOC und Tesla haben im Mai 2015 eine Partnerschaft angekündigt, um Energiespeicher in kommerziellen und industriellen Gebäuden zu installieren und zu betreiben. In der Schweiz kooperiert EnerNOC mit BKW, scheint aber auch eine eigene Akquisitionsstrategie zu verfolgen.

Die Firma Ompex ist ein auf die Strom- und Gasbeschaffung fokussiertes Unternehmen mit Zugang zu verschiedenen Märkten. Notstromaggregate werden gepoolt um Regelleistung anzubieten.

Bosch Software Innovations bietet mit dem «Virtual Power Plant Manager» eine Plattform für die intelligente Steuerung von dezentralen Anlagen. Die Flexibilität wird gebündelt und bezüglich Netzstabilität und Energiehandel optimiert.

Kiwigrid propagiert sein Produkt als «die führende Energy-IOT-Plattform in Europa». Das Energiemanagementsystem von Kiwigrid verbindet regenerative Erzeuger, Verbraucher, Speicher, Elektromobilität und das Netz in Microgrids. Damit will Kiwigrid die dezentrale Speicherung und Nutzung von dezentral produzierter Energie optimieren.

LichtBlick ist ein bekannter Vermarkter von Wasserkraft in Deutschland. LichtBlick propagiert ein virtuelles Kraftwerk, mit dem Ziel, durch intelligente Vernetzung auf einer IT-Plattform unregelmässig produzierten Ökostrom und unregelmässigen Verbrauch besser aufeinander abzustimmen.

Next Kraftwerke ist ein deutsches Unternehmen, welches diverse Services im Bereich Virtuelle Kraftwerke, Direktvermarktung, Stromhandel und Demand Side Management anbietet. 2009 gegründet, gehören bereits mehr als 3500 Anlagen dem virtuellen Kraftwerk mit einer Erzeugungsleistung von rund 2000 MW an. Die Einbindung von Lasten richtet sich vor allem an Unternehmen und Industrie.

Nach unserem Kenntnisstand nutzt keines dieser Angebote die verschiedenen Opportunitäten in ihrer Gesamtheit wie das unsere Optimierung vorsieht. Bei den bekannten Regelenergieloads gibt es keine Verbindung zwischen Regelenergiemarkt, Spotmarkt und Netzbereich. WarmUp hingegen bündelt die Flexibilität von Energiesystemen um mit einem integralen Ansatz verschiedene Märkte zu nutzen. Dabei werden auch die Kosten für Ausgleichsenergie und Netznutzungsentgelte mitberücksichtigt.



## 2 Ziele der Arbeit

WarmUp2 hat zum Ziel, das Konzept aus der Phase 1 praktisch umzusetzen und weiterzuentwickeln und die Möglichkeiten eines intelligenten Energiemanagement-Systems im Feldversuch auszuloten. Die Erfolgskriterien sind: Ökonomie, Ökologie, Effizienz und Komfort.

Heute ist es die Regel, 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 Pönen (Ausgleichsenergiokosten) bestraft. Die Herausforderung von WarmUp2 besteht darin, diese zwei Welten zusammenzubringen. Einerseits muss der Komfort weiterhin gewährt werden, andererseits müssen vorgängig getätigte Energiegeschäfte eingehalten werden. Daraus entsteht eine ganze Kette von Fragestellungen die beantwortet werden müssen. Beispielsweise stellt sich die Frage, wie eine Wärmepumpe dazu gebracht werden kann, einen elektrischen Fahrplan einzuhalten und wie gut das funktioniert. Im Zentrum von WarmUp steht ein übergeordnetes intelligentes System als Bindeglied zwischen Markt und flexiblen Lasten. Die Koordination der beiden Welten wird automatisch durch das WarmUp Energiemanagementsystem erledigt. Um solch ein System erstellen zu können, braucht es ein gutes Verständnis von beiden Welten.

Im Rahmen des Projektes sollen nachfolgende Kernfragen 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 Spezifikation, Vereinfachungen in der Modellierung, Latenz in der Regelstrecke und andere Gründe reduzieren das nutzbare Potential an Flexibilität. Die Erfahrungen aus WarmUp2 sollen zeigen, wie gross das real existierende Potential an Flexibilität tatsächlich ist.

**2. Wie können wir mit bestehenden Gebäudeleitsystemen interagieren?**

Grössere Anlagen verfügen bereits über ein Gebäudeleitsystem. Es stellt sich die Frage, wie ein übergeordnetes Energiemanagement-System mit den bestehenden Systemen interagieren kann. Im Rahmen von WarmUp2 sollen, in Zusammenarbeit mit den bisherigen Akteuren, geeignete Möglichkeiten evaluiert und implementiert werden. Es wird sich zeigen, welche Möglichkeiten funktionieren und ob sich diese auch für eine spätere Skalierung eignen.

**3. Wie kann die Flexibilität auf dem Markt verwertet werden?**

Es gibt unterschiedliche Verwertungsmöglichkeiten für Flexibilität. Einzelne Optimierungsziele sind gegenläufig (siehe Kapitel 5.2). Die verschiedenen Anwendungen werden in einer ganzheitlichen Optimierung abgebildet. Das System soll so gestaltet werden, dass neue Opportunitäten rasch ergänzt werden können.

**4. Welchen Wert hat die Flexibilität?**

Im Rahmen des Projektes soll der Wert der Flexibilität im Feldversuch nachgewiesen werden. Die verschiedenen Anwendungen ökonomisieren die Flexibilität. In einem einjährigen Testbetrieb werden einerseits Erfahrungen mit der Abwicklung von Geschäften und andererseits quantitative Aussagen zum Wert der Flexibilität erarbeitet.



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

Anhand von Key Performance Indikatoren wird im Vergleich zu historischen Daten berechnet, welchen Einfluss WarmUp auf die Effizienz der Anlagen hat. Die Aussage wird abhängig von den Strompreisen sein. In Zeiten negativer Strompreise beispielsweise verliert die Effizienz der Wärmepumpen an Gewicht. Mit grösseren Systemgrenzen betrachtet (Europäisches Verbundnetz), wird es aber effizienter sein, eine Wärmepumpe mit einem schlechteren COP zu betreiben (aufgrund hoher Austrittstemperaturen) anstatt bei negativen Strompreisen irgendwo Energie «zu vernichten», in dem beispielsweise Wasser in einem Laufwasserkraftwerk über das Wehr geleitet wird, anstatt es zu turbinieren.

Das Projekt liefert Erfahrungen mit der bidirektionalen Anbindung von bestehenden Anlagen an ein marktorientiertes System und der damit verbundenen Abwicklung von Energiegeschäften. Während im WarmUp1 Projekt das theoretische Gesamtpotential dargestellt wurde, geht es in der Phase 2 um die konkrete Ausgestaltung der Geschäftsabläufe und der Quantifizierung des realisierbaren Potentials. Im Rahmen des Projekts sollen die Kosten für die Infrastruktur und den Betrieb evaluiert werden. Das Resultat von WarmUp ist nicht ein fertiges Produkt. Vielmehr ist WarmUp Teil des «ewz Smart Grid Real Lab». Dank einer realen Testumgebung und einem flexiblen System können unterschiedliche Szenarien real getestet werden. Das Pilotprojekt liefert wertvolle Erkenntnisse, welche in die Gestaltung neuer Produkte und Dienstleistungen einfließen.

## 3 Vorgehen

Das Projekt wurde in sechs Arbeitspakete gegliedert. Es wurden mehrere Meilensteine definiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Kriterien für die Auswahl von Anlagen erarbeitet.

### 3.1 Arbeitspakete

Die Umsetzung des Pilotprojektes besteht aus nachfolgenden Arbeitspaketen:

#### AP1: Anlagen:

Das Arbeitspaket beschreibt die Modelle der steuerbaren Anlagen. Konkret sind dies die Wärmepumpen, sowie die angeschlossenen thermischen Speicher und Verbraucher. Bei den thermischen Speichern unterscheidet das Projekt zwischen Warmwasserspeicher, technischen Speichern und Gebäudespeichern. Die aus WarmUp1 vorhandenen Ansätze müssen für WarmUp2 verallgemeinert und weiterentwickelt werden.

#### AP2: Kommunikation:

Die Kommunikationsinfrastruktur für den Datenaustausch beinhaltet auf der einen Seite die Schnittstelle zur Leittechnik des Gebäudes. Die gemessenen Daten der Anlagen müssen auf den Server übertragen und dort mit den Prognosen und Optimierungen verarbeitet werden. Die berechneten Sollwerte müssen vom Server auf die Anlagen zurückübertragen werden. Auf der anderen Seite benötigt das System Schnittstellen zum Energiedatenmanagement, den Austausch von Prognosen und den Zugang zur Energiebörse.



### **AP3: Optimierung und Monitoring:**

Aus der Phase 1 des WarmUp-Projektes steht ein erster Entwurf der Optimierungskaskade zur Verfügung. Die Optimierung muss auf die Bedürfnisse des Pilotversuchs angepasst werden. Zudem muss eine kurzfristige Einsatzoptimierung entwickelt werden. Beide Module müssen in die bestehenden Geschäftsprozesse integriert werden.

Zudem wird ein Monitoring für die Visualisierung der Messdaten und Resultate der Optimierung erstellt. Für das Monitoring wird eine Webapplikation erstellt. Diese zeigt im Wesentlichen alle Entscheidungsgrundlagen sowie die getroffenen Entscheidungen für die Zukunft.

### **AP4: Test und Inbetriebnahme:**

In einer ersten Phase wird das WarmUp-System im Parallelbetrieb getestet. In dieser Phase ist weiterhin das klassische System aktiv und WarmUp läuft parallel in deaktiviertem Modus. Daraus lässt sich erkennen, was WarmUp gemacht hätte. Sobald WarmUp die notwendige Reife erreicht hat, wird es in allmählich in Betrieb genommen. Auf einige kurze Tests folgend längere Testphasen, bis es schliesslich ständig aktiv sein soll.

### **AP5: Erfolgskontrolle:**

In diesem Arbeitspaket geht es um den Vergleich des WarmUp-Betriebs mit dem klassischen Betrieb. Für den Vergleich werden Key Performance Indikatoren erarbeitet (siehe Kapitel 6.5.1). Ziel ist es, den Mehrwert von WarmUp in unterschiedlichen Dimensionen identifizieren zu können.

Parallel mit dem Betrieb des Pilotprojekts wird die Marktentwicklung laufend beobachtet und es werden neue Anwendungen evaluiert, mit denen die Flexibilität gewinnbringend genutzt werden kann.

### **AP6: Betriebsphase:**

Das sechste Arbeitspaket umfasst eine 12-monatige Testphase. In dieser Phase soll WarmUp ständig aktiv sein. Nach einem Jahr werden die Messdaten mit dem klassischen Betrieb verglichen und eine Erfolgskontrolle, anhand der in AP5 definierten Kriterien, durchgeführt.

Die Arbeitspakete AP1 und AP2 starten parallel zu Beginn des Projekts. Sie können entkoppelt implementiert werden. AP3 startet ebenfalls in einer frühen Phase und beinhaltet im zweiten Teil die Integration der Resultate von AP1 und AP2.

Nach etwa der Hälfte der Projektdauer startet mit AP4 die Testphase damit der Pilot rechtzeitig in Betrieb genommen werden kann.



## 3.2 Meilensteine

Im Rahmen von WarmUp2 gilt es nachfolgende Meilensteine zu erreichen:

- MS 1:** Anlagemodele validiert (Übereinstimmung Simulationsresultate Messdaten)
- MS 2a:** Alle Datenpunkte getestet, bidirektionale Kommunikation funktioniert
- MS 2b:** Datenaustausch/Schnittstellen mit Drittsystemen sind getestet und funktionieren
- MS 3a:** Optimierungsmodell funktioniert im Simulationsmodus (Parallelbetrieb)
- MS 3b:** Monitoring funktioniert
- MS 4:** Testphase abgeschlossen und bereit für Inbetriebnahme (IBN) Pilotphase
- MS 5:** Auswertung der Ergebnisse nach einjähriger Betriebsphase
- MS 6:** Fazit aus Auswertung/Controlling Betriebsphase

Der Steuerungsausschuss der Projektbeteiligten treffen sich 2 Mal pro Jahr zu einem Workshop. Dort wird über den Stand der Arbeiten und die Erreichung der Meilensteine orientiert. Es werden strategische Entscheide gefällt. Zudem wird die organisatorische Abwicklung mit Dritten und anderen Abteilungen diskutiert.

## 3.3 Kriterien für die Selektion der Anlagen

Der ewz Contracting-Pool umfasst etwa 200 Anlagen. Aus dieser Vielzahl muss eine Selektion getroffen werden. In WarmUp2 wird eine Liegenschaft mit 4 Gebäuden eingebunden. Falls sich das Konzept bewährt und weitere Anlagen angeschlossen werden sollen, braucht es Kriterien für die Anlagenselektion. Nachfolgend werden die wichtigsten Kriterien aufgelistet und erläutert.

- **Standort Stadt Zürich (ewz als Netzbetreiber & Stromlieferant)**

Damit der Mehrwert dem Auftraggeber zugutekommt, sollte die Anlage innerhalb der Stadt Zürich liegen. Je nach Optimierungszielen (z.B. Optimierung gegen Verbrauchertarife, Eigenstromoptimierung) spielt dieses Kriterium aber keine Rolle, d.h. falls der Mehrwert ausschliesslich beim Kunden liegt.

- **Alter der Anlagen**

Getreu dem Motto «Never touch a running system» besteht eine gewisse Hürde, an bestehenden Anlagen, die stabil laufen, etwas zu verändern. Ältere Anlagen beruhen auf technischen Ansätzen, die mittlerweile überholt sind. Neue Anlagen brauchen eine gewisse Zeit, bis sie optimal eingestellt sind. Ist dieser Zustand erreicht, möchte man nicht schon wieder etwas anpassen. Insofern liegt die Präferenz auf einem relativ engen Zeitfenster, was das Alter der Anlagen betrifft. Optimal im Rahmen des Pilotprojektes sind Anlagen im Alter von etwa fünf Jahren.

Wie sich in der Diskussion am Schluss dieses Berichtes zeigen wird, ist es grundsätzlich nicht notwendig, etwas am bestehenden System zu verändern. Damit ergibt sich eine Relativierung dieses Kriteriums.



Grundsätzlich ist eine nachträgliche Modifikation immer nachteilig gegenüber einer Integration bereits beim Bau der Anlage. Der beste Case sind also neue Anlagen, die erst noch gebaut werden. Aufgrund des Timings hat sich diese Option im Pilotprojekt aber nicht geboten.

- **Speicherkapazität Gebäude und Boiler**

Je mehr Speicherkapazität vorhanden ist, desto mehr Flexibilität kann genutzt werden, desto mehr Mehrwert liefert WarmUp. Die Erfahrungen zeigen, dass bei bestehenden Anlagen die Speicher meist knapp dimensioniert wurden. Neben der Speicherkapazität ist der Verbrauch/Wärmebedarf relevant für eine Aussage über die Flexibilität. Bei mittleren Außentemperaturen von 8 Grad unter null bietet auch ein grosses Gebäude mit viel Betonmasse kaum noch Flexibilität. Die meiste Flexibilität resultiert an Tagen etwas unter der Heizgrenze.

Ein modernes Gebäude mit viel Beton hat eine grosse thermische Trägheit. Aufgrund des limitierenden Wärmeübergangs kann die Wärme aber nicht beliebig erzeugt werden. Grosse Leistungen innerhalb kleiner Zeitperioden haben zudem hohe Austrittstemperaturen und damit einen schlechteren COP der Wärmepumpe zur Folge.

Bei Warmwasserspeichern ist es ideal, wenn diese nur etwa 1-2 Mal pro Tag geladen werden müssen. In diesem Fall steht genug Flexibilität zur Verfügung.

- **Leistung Wärmepumpe**

Primär wird auf grössere Anlagen fokussiert. Diese sind zwar wesentlich komplizierter, bedürfen aber eher eines ausgeklügelten Energiemanagement-System als kleine Anlagen. Zudem sind die Initialkosten für die Anbindung bei grossen Anlagen relativ kleiner als bei kleinen Anlagen.

- **Regelbarkeit**

WarmUp muss in das bestehende Regelsystem eingreifen können. Hierzu werden im Rahmen dieses Projektes unterschiedliche Möglichkeiten erarbeitet. Es eignen sich nicht alle Ansätze gleich gut. Die Eingriffsmöglichkeit in das bestehende Regelsystem ist ein wichtiges Selektionskriterium.

- **Flexibilität**

Anlagen im Dauerbetrieb bieten kaum Flexibilität. Diese Anlagen eignen sich nicht. Ideal sind also Anlagen, die meist in einigen kurzen Perioden laufen und sonst stillstehen. In grossen Wärmeverbünden entstehen Verschachtelungseffekte im Wärmebedarf wodurch die Wärmeerzeugung eher im Dauerbetrieb erfolgt. In kleinen Einfamilienhäusern laufen Wärmepumpen in der Regel nur in kurzen Zeiten. Dieses Kriterium widerspricht der Anlagengrösse. Es muss ein Trade-Off gefunden werden.

Denkbar ist, dass zukünftig die Grundlast von der flexiblen Last im hydraulischen System getrennt wird. Daraus entsteht ein neues Designkriterium für die HLK-Planung. Damit wird es möglich, dass ein Teil der Wärmepumpen im Dauerbetrieb und andere flexibel laufen können.

- **Vergleichbarkeit**

Um herausfinden zu können, wie gross der Mehrwert von WarmUp ist, existiert idealerweise ein baugleiches Vergleichsobjekt. Dieser Fall ist aber äusserst selten und kann zurzeit aufgrund eines anderen Pilotprojektes nicht genutzt werden. In einer späteren Phase wird dies aber möglich sein.

- **Komplexität der Anlage**

Grössere Anlagen sind in der Regel komplizierter und damit aufwendiger zu erschliessen. Mit der richtigen Planung der Wärmeversorgung könnten auch grössere Anlagen unkompliziert gebaut werden. Die Fortschritte in der HLK-Planung werden es zukünftig einfacher machen, Anlagen in WarmUp einzubinden.



- **Bivalenz**

Bei bivalenten Anlagen kann WarmUp unterschiedliche Energieträger gegeneinander optimieren. Gerade bei grösseren Anlagen wird die Spitzendeckung oft mit anderen Energieträgern realisiert. Dieses Kriterium ist nicht zwingend, ist für Pilotanlagen aber sehr interessant. Beispielsweise stellt sich die Frage, ob der fossile Betrieb reduziert werden kann, wenn die Wärmepumpen vorausschauend betrieben werden.

- **Ansteuerbarkeit der Wärmepumpe**

Es gibt unterschiedliche Methoden, wie Wärmepumpen angesteuert werden können. Idealerweise könnte der Wärmepumpe ein elektrischer Fahrplan vorgegeben werden. Heute werden die Wärmepumpen aber nach Wärmebedarf betrieben. Hier muss die Herausforderung, die elektrische und die thermische Welt vereinen zu können, gemeistert werden. Es gibt erste Ansätze wie «Smart-Grid-ready»-Labels für Wärmepumpen. Daneben müssen andere, vermutlich besser geeignete Ansätze, diskutiert werden.

- **Wärmepumpe sollte hohe Temperaturen fahren können**

Wärmepumpen mit hohen Austrittstemperaturen können die Legionellenschaltung durchführen. Als willkommener Nebeneffekt erlauben sie es, einen grösseren Temperaturbereich in den Wasserspeichern zu fahren, womit die Flexibilität grösser wird. In zukünftigen Anlagen werden Wärmepumpen weniger hohe Austrittstemperaturen haben, dafür sind die Speichervolumen aber grösser, damit der Spitzenbedarf gedeckt werden kann. Denkbar ist auch, dass zukünftig bewusst grössere Speichervolumen gebaut werden, damit mehr Flexibilität zur Verfügung steht.

- **Komfortansprüche der Bewohner sollte genügend Flexibilität zulassen**

Eines der wichtigsten Kriterien für die Flexibilität sind die Komfortansprüche der Bewohner. Je höher diese Ansprüche sind, desto kleiner wird die Flexibilität. Komfortansprüche geniessen die oberste Priorität bei der Optimierung in WarmUp.

Basierend auf diesen Kriterien wurden die Anlagen aus dem Pool von ewz bewertet und eine Selektion von möglichen Kandidaten vorgenommen.

## 3.4 Prozesse der Implementierung

Der Prozess von der Selektion einer Anlage bis zur Inbetriebnahme sieht folgendermassen aus:

1. Die Anlage wird gemäss den Selektionskriterien bewertet und selektiert.
2. Es wird ein Konzept für die Anbindung an das bestehende Regelsystem und den Eingriffsmöglichkeiten erstellt.
3. In Absprache mit dem Lieferanten der Gebäudeautomation wird eine Schnittstelle zum bestehenden System implementiert und in Betrieb genommen (in der Regel einmalige Sache).
4. Sobald der Zugriff auf die Datenpunkte funktioniert wird das Monitoring erstellt.
5. Falls notwendig, werden Anpassungen in der bisherigen Gebäudeautomation vorgenommen. Grundsätzlich würde WarmUp auch direkt bestehende Sollwerte überschreiben können. Aus Gründen der Redundanz kann das bestehende System aber in seiner ursprünglichen Version bestehen bleiben, so dass im Fehlerfall sofort wieder auf das alte System umgeschaltet werden kann.



6. Das thermische Verhalten der Anlage wird modelliert. Hierfür werden historische Messdaten exportiert und mit einem eigens entwickelten Tool für die Parameteridentifikation verarbeitet.
7. Basierend auf dem Anlagenmodell, den Vermarktungsmöglichkeiten und den Randbedingungen wird das Optimierungsmodell erstellt.
8. Die verschiedenen Geschäftsprozesse werden modelliert und online implementiert.
9. Es werden einige kurze Inbetriebnahme-Tests durchgeführt. In dieser Phase wird getestet, ob die Anlage auf die neuen Sollwerte von WarmUp korrekt reagiert.
10. In längeren Tests wird der WarmUp-Betrieb getestet.
11. Sobald die Tests erfolgreich abgeschlossen sind, wird die Anlage in Betrieb genommen.
12. Nach einer gewissen Zeit (z.B. 12 Monaten) im WarmUp Betrieb werden die Resultate mit der historischen Betriebsweise verglichen. Daraus kann der Mehrwert von WarmUp quantifiziert werden.

## 4 Grundlagen

### 4.1 Vergleich Pumpspeicher und thermische Speicher

Bereits mehrfach wurde in diesem Bericht erwähnt, dass das Denken in der elektrischen Welt und der thermischen Welt sehr unterschiedlich sind. Während elektrische Energie heute vorwiegend in zentralen grossen Speicherseen gespeichert wird, wird thermische Energie vorwiegend dezentral in kleinen Speichern gespeichert. Der Betrieb der Pumpspeicher wird seit jeher nach Preisanreizen von der Energiebörse oder anderen Märkten bestimmt. Thermische Speicher werden in der Regel so konziert, dass die Spitzen des Wärmebedarfs gedeckt werden können. Dadurch können die Wärmeerzeugungsanlagen etwas kleiner dimensioniert werden. Entsprechend der Motivation dieses Projektes wird untersucht, wie man die beiden Ansätze am besten kombinieren kann, um insgesamt einen Mehrwert für beide Welten zu erzeugen. Wenn man Pumpspeicher und Gebäude vergleicht, so stellt man fest, dass es auch einige Gemeinsamkeiten gibt. Abbildung 3 zeigt einen Vergleich eines Pumpspeicher-Kraftwerkes (links) mit einem thermischen Speicher (rechts). Im Fall des Pumpspeicherkraftwerks wird Wasser von einem unteren Becken zu einem höheren Becken hochgepumpt. Analog dazu wird im Gebäude Umgebungswärme auf ein höheres Temperaturlevel gehoben. Sowohl die Wasserpumpe wie auch die Wärmepumpe brauchen für diesen Vorgang Strom. Im Fall des Pumpspeichers wird beim Bezug der Energie Wasser turbiniert und Strom zurück ans Netz gegeben. Beim Gebäude wird beispielsweise Brauchwarmwasser von den Bewohnern bezogen und dadurch wird dem Boiler Energie entzogen. In beiden Fällen gibt es Verluste und Gewinne im Speicher. Einerseits führt Dotierwasser zu Verlusten im Pumpspeicher, während Zuflüsse durch Niederschlag oder Schmelzwasser zu Gewinnen führen. Beim Gebäude geht Wärme durch Transmission verloren während die Solarstrahlung und die Abstrahlung von Menschen und Geräten zu passiven Gewinnen führen. In beiden Fällen gibt es einen Mindest- und einen Maximalpegel (Wasserstand/Temperatur) in welchem der Speicher bewirtschaftet werden kann.

Es gibt aber auch einige Unterschiede. Der Hauptunterschied ist die Grösse der Speicher. Der eine ist sehr gross und zentral, während der andere klein und dezentral ist. Im Fall des Gebäudes sind die

Verluste (Transmission) dominant gegenüber dem Brauchwarmwasserbezug. Im Pumpspeicherkraftwerk sind Verluste nur gering. Moderne Wasserkraftwerke haben einen Wirkungsgrad von etwa 85 % während Wärmepumpen bei etwa 500 % liegen, wobei in der thermischen Welt die Nutzung von Umweltwärme im Wirkungsgrad der Wärmepumpe nicht eingerechnet wird.

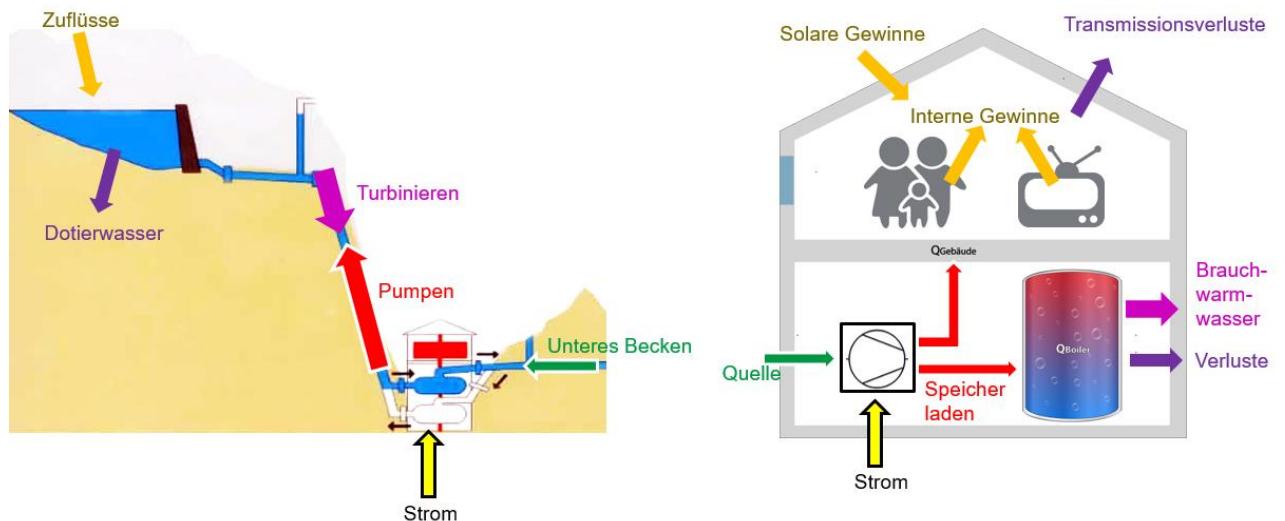


Abbildung 3: Viele Gemeinsamkeiten zwischen einem Pumpspeicher (links) und einem thermischen Speicher (rechts).

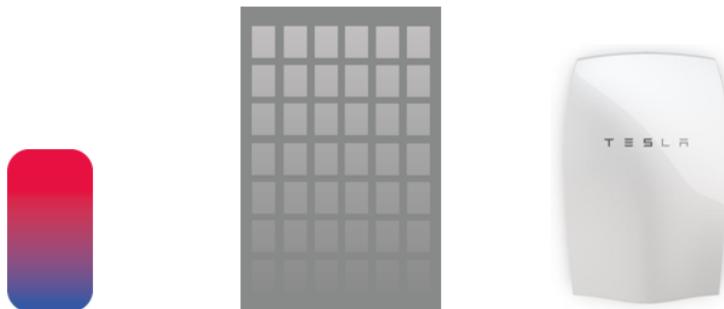
## 4.2 Vergleich Speicherkapazität

Abbildung 4 zeigt einen Vergleich der Speicherkapazität von Boiler, Gebäude und Batteriespeicher. Ein Boiler mit einem Volumen von 2000 Litern und einem Temperaturbereich von 40 – 60 °C hat eine thermische Speicherkapazität von etwa 46 kWh. Bei einem COP von etwa 4 ergibt dies eine elektrische Kapazität von ca. 12 kWh. Das in WarmUp2 modellierte Gebäude hat ein Volumen von 2'500 m<sup>3</sup> und einen flexiblen Temperaturbereich von ca. einem Grad. Thermisch ergibt dies eine Speicherkapazität von etwa 1750 kWh. Aufgrund der tieferen Temperaturen für die Gebäudeheizung kann ein etwas höherer COP angenommen werden. Bei einem COP von 5 erhält man eine elektrische Speicherkapazität von ca. 350 kWh. Eine Tesla Powerwall hat eine Speicherkapazität von 6.4 kWh und ein Volumen von etwa 0.2 m<sup>3</sup>. Damit hat die Tesla Powerwall eine Energiedichte von ca. 31 kWh/m<sup>3</sup>.

Der Vergleich soll nicht dazu dienen, unterschiedliche dezentrale Speicher gegeneinander auszuspielen. Beide Speicher haben ihre Berechtigung. Der Vergleich dient vielmehr dazu, dem Leser ein Gefühl zur Speicherkapazität zu geben. In Kombination mit dem Energiebedarf kann daraus die Flexibilität abgeleitet werden. Dieser Rechenschritt ist allerdings sehr anspruchsvoll und wird direkt in der Optimierung durchgeführt.

Konkrete Aussagen über die Flexibilität sind immer an bestimmte Bedarfs-Situationen geknüpft. Eine Aussage wie jene, dass eine Heizung beispielsweise während zwei Stunden unterbrochen werden kann, ohne dass davon etwas bemerkt wird, ist im Sommer wie im Winter unqualifiziert. Im Sommer wird nicht geheizt und deshalb ist die Flexibilität nicht gegeben. Im Winter bei tiefen Temperaturen ist die Flexibilität ebenso nicht gegeben. Würde man mehrere Tage in Serie bei kalten Außentemperaturen die Heizung unterbrechen, so kühlt sich das Gebäude allmählich aus. Falls dies nicht geschieht, so ist die Heizung zu gross dimensioniert worden. An Heiztagen, die nicht von extremer Kälte sind,

kann die Heizung durchaus unterbrochen werden. Allerdings ist die Aussage von «zwei Stunden Ununterbrechbarkeit» dann wiederum ungenau. Es könnte auch nur 1 Stunde oder 5 Stunden sein. Das Beispiel zeigt, dass der Begriff Flexibilität oft ungenau verwendet wird.



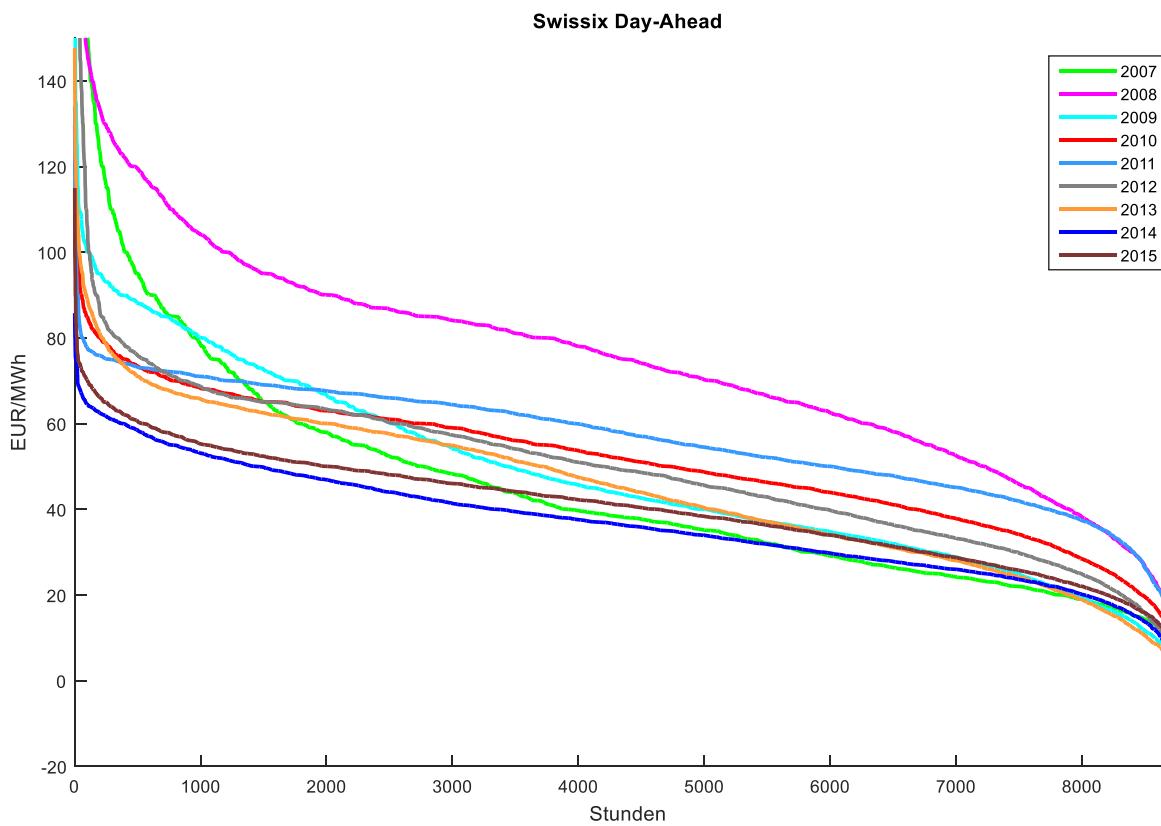
	Boiler	Gebäude	Batteriespeicher
Volumen	$2 \text{ m}^3$	$2500 \text{ m}^3$	$0.2 \text{ m}^3$
Temperatur $\Delta T$	$20 \text{ }^\circ\text{C}$	$1 \text{ }^\circ\text{C}$	-
Energiedichte	$23 \frac{\text{kWh}_{th}}{\text{m}^3}$	$0.7 \frac{\text{kWh}_{th}}{\text{m}^3}$	$31 \frac{\text{kWh}_{el}}{\text{m}^3}$
Therm. Speicherkapazität	$46 \text{ kWh}$	$1750 \text{ kWh}$	-
Elektr. Speicherkapazität	$12 \text{ kWh}$	$350 \text{ kWh}$	$6.4 \text{ kWh}$

Abbildung 4: Vergleich Speicherkapazität von Boiler, Gebäudemasse und Batteriespeicher

## 4.3 Situation in der Energiewirtschaft

### 4.3.1 Energy-Only-Markt

Ordnet man die Day-Ahead Preise für das Marktgebiet Schweiz während eines Jahres nach ihrer Höhe, so ergeben sich Jahresdauerlinien. Für die Jahre 2007 – 2015 sind diese in Abbildung 5 abgebildet. Wenn man die Kurven der verschiedenen Jahre vergleicht, so kann man feststellen, dass diese einerseits nach unten gesunken aber auch flacher geworden sind. Einerseits sind die Strompreise in den letzten 10 Jahren massiv gesunken. Andererseits sind die Stunden mit verhältnismässig hohen Strompreisen rar geworden. Gleichzeitig nehmen die Stunden mit Preisen von Null (oder sogar noch weniger) zu. Die Tatsache, dass die Kurven flacher geworden sind, liegt vor allem daran, dass sich die teuren Peak-Stunden gut mit der PV-Einspeisung decken. Durch die PV-Einspeisung sind die Peak-Stunden günstiger geworden. Auch wenn in der Schweiz noch relativ wenig PV-Anlagen gebaut wurden, so ist der Einfluss aus den Nachbarländern gut zu sehen. Flache Kurven sind ein Indiz für eine schwierige Situation für Speicher jeglicher Art. Die Preisdifferenzen sind klein, so dass die Flexibilität wenig belohnt wird. Besonders eindrücklich sind die Preismuster an Sonntagen mit schönem, vielleicht etwas windigen, Wetter. An den Nachmittagsstunden tendieren die Preise oft gegen Null oder sogar leicht darunter.



**Abbildung 5: Jahresdauerlinien der Strompreise aus der Day-Ahead-Auktion für das Marktgebiet Schweiz**

Die Abbildung 6 zeigt ein mögliches Szenario, wie diese Jahresdauerlinien in Zukunft aussehen könnten. Die Kurven werden wieder klar steiler. Die Prognose geht davon aus, dass es viele Zeiten mit einem Überangebot geben wird. In diesen Zeiten liegen die Preise bei null. Es wird davon ausgegangen, dass Überschüsse gekappt, durch Lastmanagement genutzt oder in Batterien gespeichert werden können, so dass die Preise nicht unter null sinken. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass in Zeiten mit wenig Einspeisung aus Sonne und Wind hohe Preise existieren müssen. Dies kann daran liegen, dass teure fossile Kraftwerke einspringen müssen, oder dass Speicher erst ab einem gewissen Preis dazu gewillt sind, die Energie zurückzuliefern. Die Jahresdauerlinien werden wesentlich steiler und damit wird der Business-Case für Speicher wieder interessanter. Oft wird in diesem Zusammenhang die Frage geäusserst, ob dies auch dann eintreffen wird, wenn viele Lastmanagement-Projekte das gleiche Potential adressieren oder ob man sich nicht dadurch selbst den Business-Case zerstört. Die Frage lässt sich am besten dadurch beantworten, in dem man die Ausbaugeschwindigkeiten von Sonne und Wind mit jenen von Lastmanagement-Projekten und Batteriespeichern vergleicht. Alleine in Deutschland nimmt die installierte Leistung von PV- und Windanlagen jährlich um etwa 5 GW zu. Da vermögen Lastmanagement-Projekte nicht mitzuhalten. Insofern wird der Bedarf an Flexibilität ansteigen. Dies wird sich erst dann ändern, wenn Elektromobilität ihren Durchbruch im grossen Stil schafft. Ob diese dann kurz- bis mittelfristig eher Flexibilität liefert oder zusätzliche Lastspitzen generiert (vor allem in den Abendstunden) ist noch schwer absehbar.

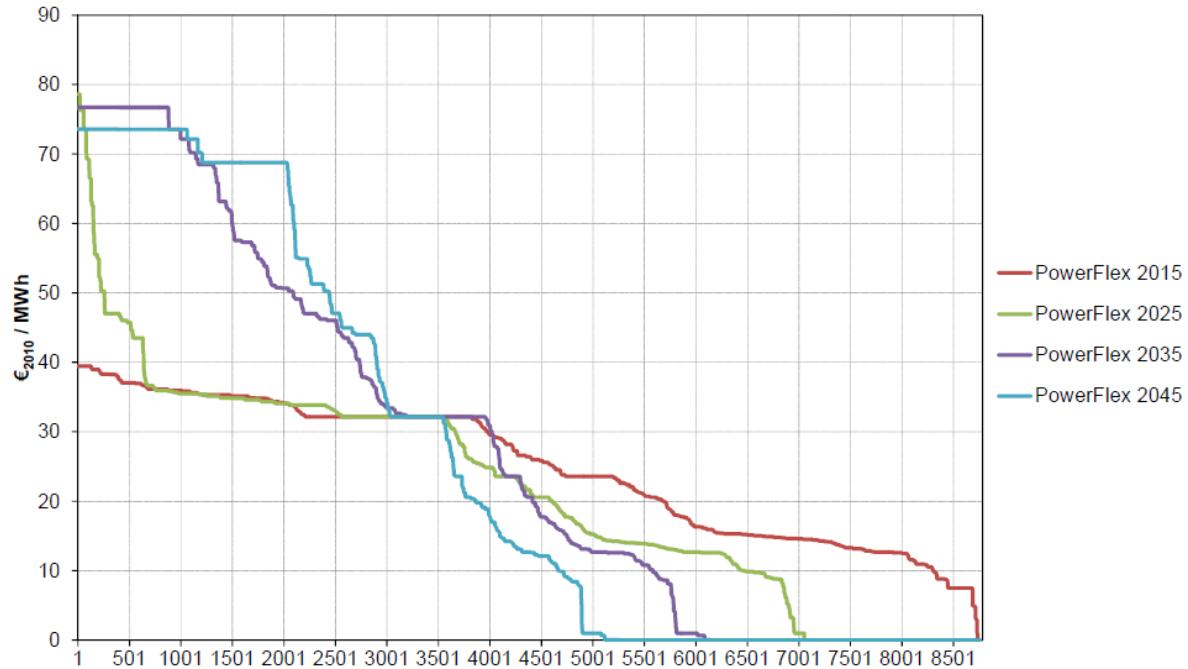


Abbildung 6: Szenario zukünftiger Strompreise (Quelle [3]).

Die Einspeisung aus neuen Erneuerbaren Energiequellen, im Besonderen Solarstrom, ist mit steilen Rampen verbunden. Der konventionelle Kraftwerkspark in Deutschland, welcher aufgrund der tiefen CO<sub>2</sub>-Preise vorwiegend aus Kohlekraftwerken besteht, tut sich schwer mit diesen steilen Rampen. Als Folge dessen ergeben sich Differenzen zu der stündlichen Day-Ahead-Vermarktung von Solarstrom. Diese Differenzen werden teilweise am Intraday-Markt (kontinuierlich / Auktion) ausgeglichen und führen zu typischen Halb-Stunden-Mustern. In Schwachlastzeiten mit hoher Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen sind teilweise sogar negative Preise zu beobachten.

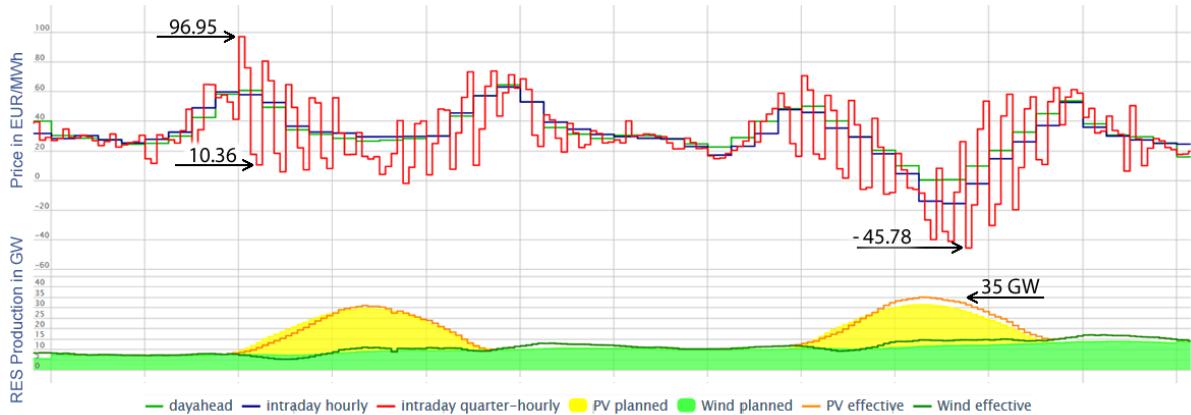


Abbildung 7: Preise an der deutschen Strombörse (oben) und Einspeisung aus Sonnen- und Windenergie (unten) anfangs Oktober 2013 während 48 Stunden. Hohe Intraday-Volatilitäten und teilweise negative Preise treten regelmäßig auf. (Datenquellen [4], [5], Grafik Misurio)



Wenn man die Entwicklung des Strommarkts in den letzten Jahren analysiert, dann lassen sich einige Trends identifizieren. Energie wird immer kurzfristiger und in kleineren Mengen gehandelt. Innerhalb von Deutschland kann Energie mittlerweile bis 30 Minuten vor dem Ausführungszeitpunkt gehandelt werden [6]. Für die Schweiz gelten Vorlaufzeiten von 60 Minuten. Grenzüberschreitend gelten Vorlaufzeiten von 75 Minuten. Das Mindestvolumen für einen Kontrakt am Intraday-Markt beträgt 0.1 MW. Bei solch kleinen Volumen in Kombination mit tiefen Energiepreisen ist es ineffizient, den Handel manuell durchzuführen. Es werden sich automatisierte Handelssysteme durchsetzen. Um diesem Aspekt gerecht zu werden, wurde frühzeitig entschieden, eine Schnittstelle zur Energiebörse zu entwickeln (siehe Kapitel 6.2.4). Das entscheidende Modul solch automatisierter Handelssysteme wird die Entscheidungsfindung sein. Diese ist der Hauptfokus im WarmUp-Projekt.

### 4.3.2 Regelleistung

Neben der Energie an sich (Energy-Only-Markt) können Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Speichern auch Systemdienstleistungen für das Stromnetz bereitstellen. Eine oft diskutierte Anwendung ist die Vorhaltung von Regelleistung. Es gibt drei unterschiedliche Stufen von Regelleistung (Primär-, Sekundär-, Tertiärregelleistung). Je nach Stufe sind die technischen Anforderungen unterschiedlich. In WarmUp1 wurde untersucht, wie gross der ökonomische Mehrwert ist, wenn man Tertiärregelleistung mit Wärmepumpen liefert. Die Resultate der Potentialanalyse haben gezeigt, dass die Beiträge aus Regelleistung nur gering waren. Gleichzeitig war nach Abschluss von WarmUp1 klar, dass die Preise für Regelleistung sinken werden. Man hat sich vor Beginn von WarmUp2 entschieden, auf Regelleistung vorerst zu verzichten. Rückblickend erweist sich diese Entscheidung als weise. Die Preise für Regelleistung sind tatsächlich massiv gesunken. Das Optimierungsmodell ist so gestaltet, dass Regelleistung oder andere, neue Flexibilitätsprodukte jederzeit einfach ergänzt werden können. Zurzeit ist nicht davon auszugehen, dass Regelleistung in naher Zukunft wieder teurer wird. Das Hauptargument dieser Aussage liegt darin, dass Energie an der Börse zunehmend kurzfristig gehandelt werden kann. Je näher eine Prognose am Ausführungszeitpunkt erstellt wird, desto kleiner sind die Abweichungen. Kurzum, Fahrplanabweichungen gegenüber der Day-Ahead-Prognose werden vermehrt am Intraday-Markt ausgeglichen.

### 4.3.3 Netznutzungskosten

Bei den Netznutzungskosten werden die Kosten, welche an der Übergabestelle zur höheren Netzebene verrechnet werden, berücksichtigt. Üblicherweise werden die jeweiligen Monatspeaks mit einem Leistungstarif verrechnet. Wie sich in Kapitel 5.2 zeigen wird, können Netznutzungskosten und andere Optimierungsziele gegenläufig sein. Das Optimierungsmodell wiederspiegelt diese Tatsachen und findet jeweils das Gesamtoptimum. Wie die bisherige Erfahrung im WarmUp-Betrieb zeigt, sind die Netznutzungskosten in etwa 95 % aller Zeiten ohne Einfluss auf die Optimierung. In den 5 % der Zeit, wo die Netznutzungskosten relevant sind, sind sie so dominant, dass die Energiepreise dann eine untergeordnete Rolle spielen.

Abbildung 8 zeigt ein Beispiel der Modellierung der Netznutzungskosten aus WarmUp1. Der Fokus wurde nicht auf die Last des Wärmepools, sondern auf die gesamte Netzlast gelegt. Solange die übrige Last im Netz nicht einen gewissen Level erreicht hat, besteht keine Gefahr von neuen Leistungspeaks und die zusätzlichen Netznutzungskosten sind folglich null. Erst ab einem gewissen Level nehmen die Netznutzungskosten zu. In der obersten Zeile der Abbildung 8 ist die tatsächliche Netzlast dargestellt. Basierend auf den historischen Monatspeaks und dem bisherigen Monatsverlauf wird eine Prognose für den aktuellen Monatspeak erstellt. In der mittleren Zeile ist die Prognose der Netzlast

abgebildet. Sobald die Netzlast einen gewissen Anteil am prognostizierten Monatspeak erreicht, werden Netznutzungskosten prognostiziert und fliessen in die Optimierung ein. Die Kunst der Modellierung liegt darin, die Grenze der Netzlast so hoch wie möglich zu setzen, damit die Optimierung möglichst wenig beeinflusst wird, aber gleichzeitig genug tief, damit die Monatspeaks richtig prognostiziert und reduziert werden können.

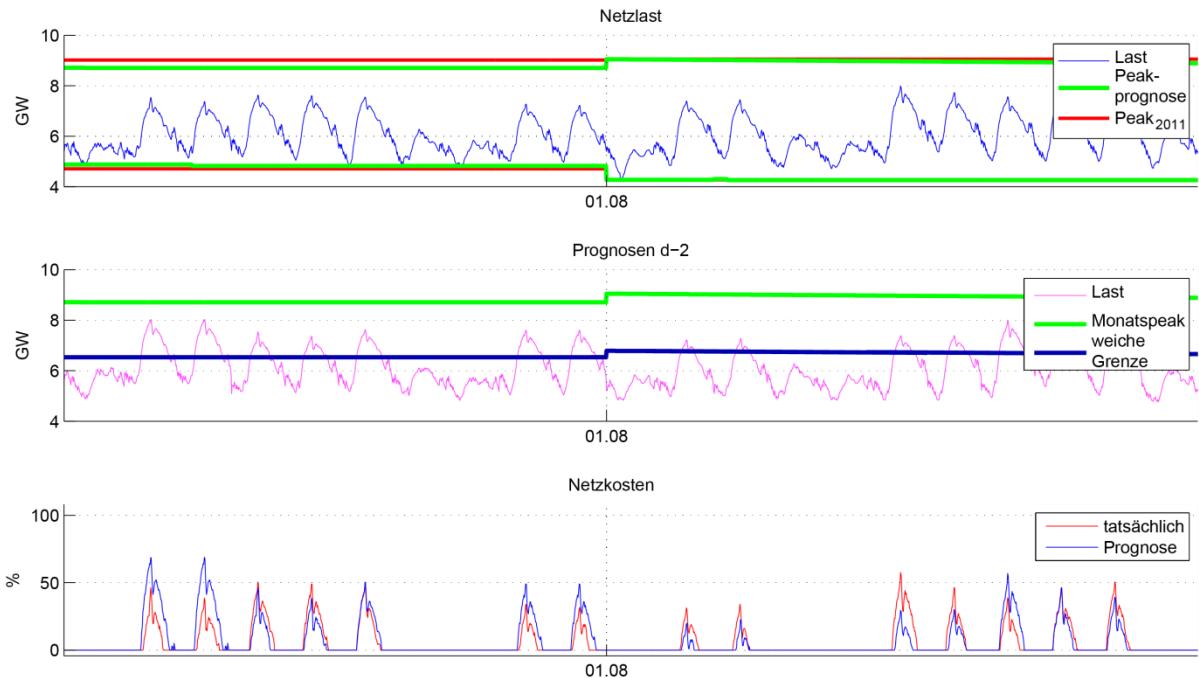


Abbildung 8: Bewertung der Netznutzungskosten. Sobald die Netzlast einen gewissen Level erreicht, entstehen zusätzliche Netznutzungskosten. Schlussendlich verrechnet werden die jeweiligen Anteile am Monatspeak.

## 4.4 Marktpotential

In der Schweiz sind Wärmepumpen für die Bereitstellung von Komfortwärme gemäss Gesamtenergiestatistik mit über 240'000 Anlagen (2014) sehr verbreitet. Die entsprechende installierte thermische Leistung betrug 3'565 MW, was bei einem Wirkungsgrad von angenommenen 350% einer elektrischen Leistung von 1 GW (1 Mio. kW) entspricht. Im Durchschnitt haben die Anlagen also eine elektrische Leistung von etwas über 4 kW. In den Bauten von WarmUp handelt es sich um grössere Anlagen im Bereich von 20 – 175 kW in Mehrfamilienhäusern und öffentlichen Bauten.

Jährlich werden rund 20'000 neue Wärmepumpen installiert. Damit wächst auch das Potential der nutzbaren Flexibilität in diesem Bereich. Eine Verdoppelung der verfügbaren Leistung bis 2050 erscheint realistisch, frühere Studien sind sogar von einer Verdreifachung ausgegangen. Das ist wahrscheinlich zu optimistisch, da einerseits die Modernisierung des bestehenden Gebäudeparks nicht so schnell durchgeführt wird, wie von den Studienautoren angenommen wurde und andererseits der tiefe Ölpreis dazu führt, dass bestehende Ölheizungen länger in Betrieb bleiben, als ursprünglich gedacht.

Im Trend der fortschreitenden Vernetzung von Anlagen, die durch Informationstechnologie ermöglicht wird, ist es wahrscheinlich, dass Internetanbindungen von Wärmepumpen in nicht allzu ferner Zukunft zum Stand der Technik gehören. WarmUp wird diesbezüglich wichtige Erkenntnisse liefern. Es sollte



einfacher werden, die thermische Trägheit der Gebäude für die Flexibilität bei der Stromversorgung zu nutzen.

Das erschliessbare Potential der Gebäude liegt heute unter Annahme 20 prozentiger Ausschöpfung des theoretischen Potentials bei  $0.2 \times 1 \text{ GW} = 200 \text{ MW}$ , was eine durchaus ansehnliche flexibel verfügbare Leistung darstellt (Flusskraftwerke am Hochrhein verfügen über etwa 50 MW Leistung). Mit einer sehr konservativen Annahme, dass Flexibilität einen Wert von nur 5 CHF/kW/a hat, ergibt das einen Ertrag von  $200'000 \text{ kW} \times 5 \text{ CHF/kW} = 1 \text{ Mio. CHF pro Jahr}$  für das Marktgebiet Schweiz. Optimistisch geschätzt wären es 8 Mio. CHF. Kann mehr als 20% des theoretischen Potentials ausgeschöpft werden, wird es entsprechend mehr.

Es ist davon auszugehen, dass der Flexibilitätsbedarf mit fluktuierenden Einspeisungen aus PV und Windanlagen zunehmen wird. Wie gross der Bedarf effektiv sein wird und zu welchen Preisen Flexibilität zukünftig abgegolten wird, ist mit grosser Unsicherheit behaftet und unter anderem von der Entwicklung und Ausprägung der Speichermöglichkeiten abhängig.

Die bisherige Abschätzung berücksichtigt nur die Bewirtschaftung der Flexibilität, die aus der thermischen Trägheit von Gebäuden und Warmwasserspeichern in Kombination mit Wärmepumpen resultiert. Dieselbe analytische Intelligenz und das entsprechende Optimierungsmodell lassen sich auf weitere flexible Verbraucher und Produzenten übertragen. Beispielsweise können mit derselben Logik und entsprechend angepassten Zielfunktionen und Rahmenbedingungen bei PV-Anlagen (Eigenverbrauch), Batteriespeichern in Gebäuden, Quartieren und Fahrzeugen, Blockheizkraftwerken, Biogasanlagen, Notstromaggregaten, gewissen Industrieprozessen etc. ebenfalls entsprechende Optimierungen durchgeführt werden, was das Potential von Optimierungslösungen erheblich vergrössert.

Neben dem monetarisierten Potential, das stark von den sich wandelnden Markt- und Tarifverhältnissen abhängt, gibt es ein anderes, ein strategisches Anwendungspotential. Dieses betrifft die Transformation der bisherigen zentral top-down organisierten Stromversorgung hin zu einer dezentralen Versorgung mit Einspeisungen auf den unteren Netzebenen. In diesem neuen System mit variabler Produktion ist es schlicht unumgänglich, die Flexibilität auf der Verbraucherseite zu nutzen, um das System im Gleichgewicht zu halten und die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Die Vernetzung entsprechender Anlagen ist eine Voraussetzung dafür.

Die Funktionalität eines marktgängigen Produktes für die Bewirtschaftung von Flexibilität von Energiesystemen geht über die Nutzung der thermischen Trägheit von Gebäuden hinaus. Dieser anspruchsvolle Teilbereich nutzt viele der technischen Eigenschaften der Basistechnologie exemplarisch. Die Technologie einer solchen Plattform ist aber gegenüber vielen verschiedenen Anwendungen offen, denen gemeinsam ist, dass laufend grosse Mengen von Echtzeitdaten zusammenlaufen, die analysiert werden und aus denen für kundenspezifische Geschäftsmodelle Informationen und Handlungsanweisungen generiert werden.

## 4.5 Energetisches Potential

Die Bereitstellung von Flexibilität in der Stromversorgung ist eine wichtige Voraussetzung für die Umsetzung der Energiestrategie. WarmUp hilft Anwendern Kosten zu sparen und Zusatzerträge zu erwirtschaften, beispielsweise indem die thermische Flexibilität für netzdienliche Anwendungen zur Verfügung gestellt wird.

Die Optimierung bestimmt die Betriebsweise, welche mit geringsten Kosten die Komfortbedürfnisse der Bewohner gewährleistet. Dazu gehört es auch, nur die unbedingt notwendige Wärme zu produzieren. Dank dem Einbezug von Wetterprognosen und der Modellierung der Gebäude kann vorausschauend Wärme erzeugt werden. So ist es beispielsweise möglich, an sonnigen Tagen in der Übergangsphase keine Heizwärme zu erzeugen, wenn die solare Einstrahlung über Mittag den Wärmebedarf zu decken vermag. Dank einer vorausschauenden Betriebsweise kann Energie gespart werden.

Neben einer Einsparung auf lokaler Ebene gibt es eine weitere Einsparung mit Systemgrenze Europäisches Verbundnetz. Der Verbrauch wird von Zeiten mit knappem Angebot auf Zeiten mit Überschuss im europäischen Verbundnetz verschoben. Damit wird es einerseits einfacher, fluktuierend produzierende neue erneuerbare Energien für spätere Verwendung zu puffern und den Strombedarf in Zeiten mit wenig erneuerbarer Einspeisung zu reduzieren.

Mit der Verwendung der Flexibilität treten flexible Lasten und Speicher auch in Konkurrenz zu fossil betriebenen Kraftwerken, die für die Stabilisierung des Netzes im Hot-Standby gefahren werden müssen. Dies ist v.a. im internationalen Umfeld relevant, weil im Unterschied zur Schweiz die Stromproduktion der meisten Länder der Welt stark CO<sub>2</sub>-belastet ist. Ein Nutzen besteht deshalb darin, dass durch Demand Side Management Kraftwerke aus dem Markt gedrängt werden, die mit fossilen Brennstoffen Strom produzieren.

Folgendes Beispiel zur Illustration:

Reine Gaskraftwerke sind aufgrund ihrer Charakteristik einigermassen geeignet mit Windkraft kombiniert zu werden. Sie produzieren Strom mit CO<sub>2</sub>-Emissionen von 600g/kWh. Gas und Dampfkraftwerke (400g/kWh) und Kohlekraftwerke (1'000g/kWh) sind aufgrund längerer Reaktionszeiten für die Lieferung von kurzfristiger Regelenergie (innerhalb von 15 Minuten) weniger geeignet, können aber bei länger anhaltendem Bedarf mit Verzögerung ebenfalls benutzt werden.

Die Daten für ein kleines Gaskraftwerk, das für die Lieferung von Regelenergie ausgelegt ist, mögen folgendermassen aussehen:

Gaskraftwerk	
Leistung [MW]	100
Nutzungsdauer [h/a]	500
Produktion [kWh/a]	50'000'000
CO <sub>2</sub> -Emission [g/kWh]	600
CO <sub>2</sub> -Emission [t/a]	30'000

Die Quintessenz aus obiger Tabelle ist, dass die effiziente Nutzung flexibler Kapazitäten eine Alternative zu fossilen Kraftwerken ist und pro 1 MW Leistungskapazität die nicht gebaut werden muss, bzw. nicht eingesetzt wird, rund 300 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr einspart werden kann.

Für die Schweiz ist die CO<sub>2</sub>-Bilanz anders, da hierzulande (noch) keine fossil betriebenen Kraftwerke für die Stabilisierung des Stromnetzes eingesetzt werden. Das hat mit dem hohen Anteil an flexibel verfügbare Wasserkraft zu tun. Es wird aber zunehmend Strom aus thermischen Kraftwerken aus dem Ausland importiert. Insbesondere beschafft Swissgrid mittlerweile grenzüberschreitend Regelenergiiekapazitäten und der Stromverbrauch der Schweiz ist im Winterhalbjahr auf den Import aus Europa angewiesen. Die Nutzung der Flexibilität durch Demand Side Management ist also auch hierzulande ein energiepolitisches Gebot der Stunde.



## 5 Konzept

### 5.1 Ganzheitliche Betrachtung

WarmUp verfolgt seit Beginn eine ganzheitliche Betrachtung in der Optimierung. Es ist unumstritten, dass diese Sichtweise den grössten Gesamtnutzen bringen wird. 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 9 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.

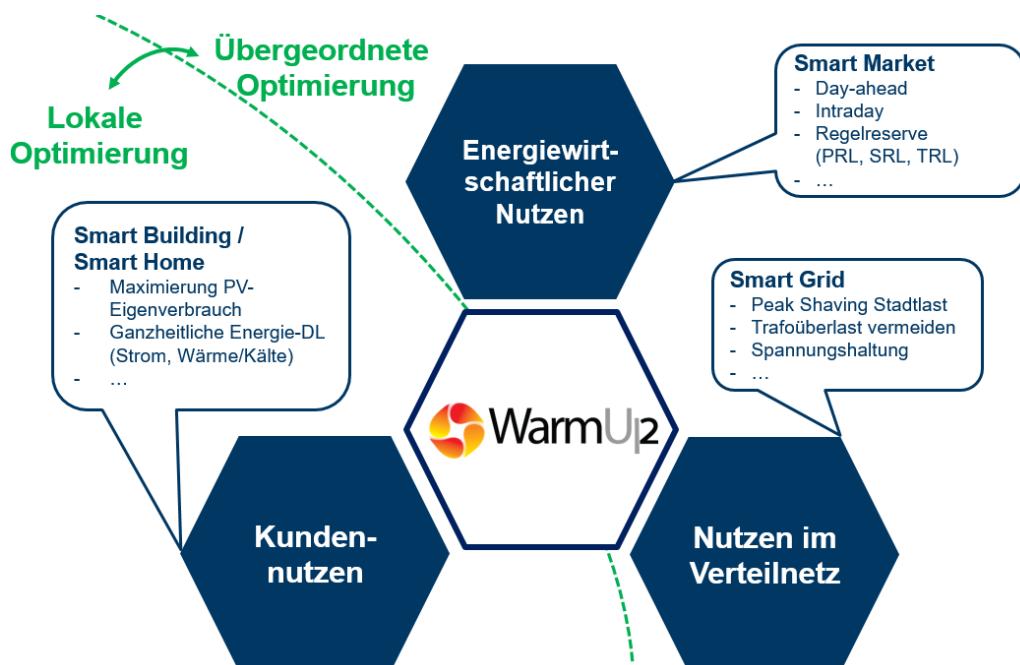


Abbildung 9: Ganzheitliche Optimierung im Spannungsfeld zwischen Smart Building, Smart Grid und Smart Market  
(Quelle Grafik: ewz)

## 5.2 Übersicht möglicher Anwendungen

Abbildung 10 zeigt eine Übersicht möglicher Lastmanagement-Anwendungen im Allgemeinen. Die meisten der hier aufgeführten Anwendungen sind in der Optimierung von WarmUp modelliert. Einige Anwendungen, wie beispielsweise die Reduktion von Ausgleichsenergie, sind Bestandteil der Optimierung, können ihr Potential aber erst in einem Pool von Wärmepumpen entfalten, da hier Verschachtelungseffekte eine grosse Rolle spielen. Die Liste möglicher Anwendungen kann ergänzt werden, sobald sich neue Möglichkeiten ergeben. Es gibt Anzeichen, dass zukünftig neue Flexibilitätsprodukte entstehen werden.

Welche Zielanwendungen mit welcher Gewichtung bzw. mit welchen Randbedingungen verfolgt werden sollen, kann der Auftraggeber festlegen. Beispielsweise ist denkbar, dass nur bezüglich Energieeffizienz optimiert wird. Im vorliegenden Projekt hat man sich entschieden, die unterschiedlichen Ziele gleich zu gewichten.

Die Randbedingungen spielen eine wichtige Rolle. Je weniger Freiheiten, desto kleiner die Ertragsmöglichkeiten. Ziel des Projektes ist es, das Potential der Flexibilität so weit wie möglich auszuloten, unter Einhaltung der Vertragsbedingungen mit den Contracting-Kunden. Das Projekt soll unter anderem Erkenntnisse liefern, wo diese Grenzen liegen. Idealerweise könnte man direkt das Feedback der Endkunden einholen. Dies ist aber nicht vorgesehen. Insofern wird man sich iterativ an die Grenzen antasten müssen.

Die unterschiedlichen Ziele können sich teilweise widersprechen. Das Ziel der Optimierung ist es, die bestmögliche Erreichung aller Ziele der ausgewählten Anwendungen zu erzielen. Hierfür werden die unterschiedlichen Ziele monetär bewertet. Einzelne Anwendungen wie beispielsweise die Energiekosten sind durch die Börsenpreise eindeutig bewertet. Andere Kriterien wie beispielsweise Komfortvorgaben müssen sinnvoll bewertet werden. Dies ist vor allem dann anspruchsvoll, wenn viele nicht monetäre Kriterien befolgt werden sollen und bedarf einiges an Expertise. In den nachfolgenden Kapiteln werden einige gegenläufige Optimierungsziele erläutert und diskutiert.

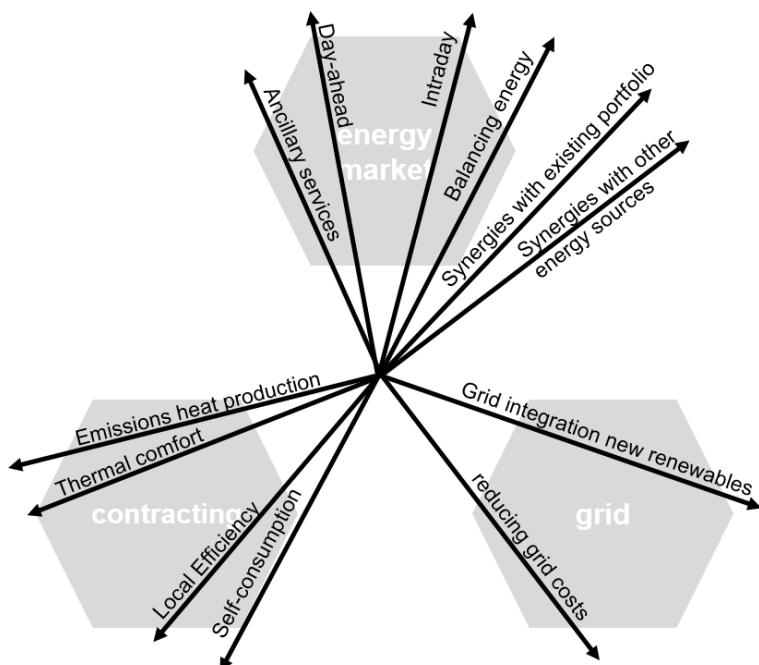


Abbildung 10: Übersicht möglicher Anwendungen in den drei Dimensionen

### 5.2.1 Handelsgeschäfte vs. (lokale) Energieeffizienz

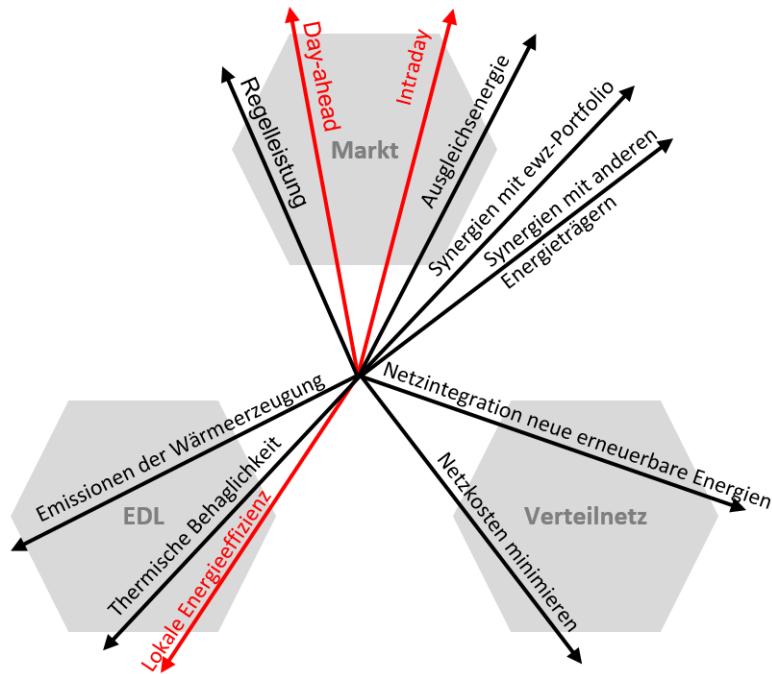


Abbildung 11: Je nach Energiepreisen verliert die lokale Energieeffizienz an Gewicht.

In Zeiten mit tiefen, teils negativen Strompreisen können die Speicher höher geladen werden, damit später in Zeiten mit höheren Preisen weniger Energie bezogen werden muss. Wenn thermische Speicher höher geladen werden, so müssen höhere Austrittstemperaturen an den Wärmepumpen gefahren werden. Als Folge dessen sinkt die Leistungszahl der Wärmepumpen. Solange die monetären Ersparnisse grösser sind als die Kosten für die gesunkene Effizienz, ist dieses Vorgehen sinnvoll. Mit dieser Aussage wird ein uraltes Paradigma der thermischen Welt umgestossen. Energieeffizienz und Kosteneffizienz müssen nicht zwingend korrelieren. Entscheidend ist der Zeitpunkt, wann der Strom bezogen wird.

Kritisch wird es in Zeiten mit negativen Strompreisen. Dies kommt zwar selten vor und wird vermutlich nur ein vorübergehendes Phänomen sein. Trotzdem stellt sich die Frage, welche Strategie in diesen Situationen sinnvoll ist. Negative Preise stellen einen Anreiz dar, Energie zu «vernichten». Gleichzeitig muss man sich überlegen, was geschieht, wenn man überschüssige Energie nicht in thermischen Speichern speichert. Wenn andere Speicherformen ausgeschöpft sind und trotzdem negative Preise existieren, so ist es wahrscheinlich, dass Bandlastkraftwerke in ineffizientem Teillastbetrieb fahren oder Laufwasserkraftwerke das Wasser ungenutzt über das Wehr laufen lassen. Die Frage der Energieeffizienz ist also vielmehr eine Frage der Systemgrenzen. Insgesamt ist es schlauer, einen Teil der überschüssigen Energie mit Wärmepumpen in thermische Energie umzuwandeln und so zu speichern, anstatt diese andernorts komplett zu «vernichten» oder gar nicht erst zu produzieren. Die Integration von neuen erneuerbaren Energien fordert ein Umdenken. Es ist sinnvoller, einen etwas schlechteren COP in Kauf zu nehmen anstatt PV Anlagen abzuregeln. Durch die Verschiebung der Lasten auf Zeiten mit hohem Angebot an neuen erneuerbaren Energien wird gleichzeitig auch der Bedarf an fossilen Kraftwerken in Zeiten mit wenig Wind und Sonne reduziert. Die lokale Effizienz ist im Modell abgebildet. Letztlich entscheidet die Kosteneffizienz über die richtige Betriebsstrategie.

## 5.2.2 Regelleistung vs. (lokale) Energieeffizienz

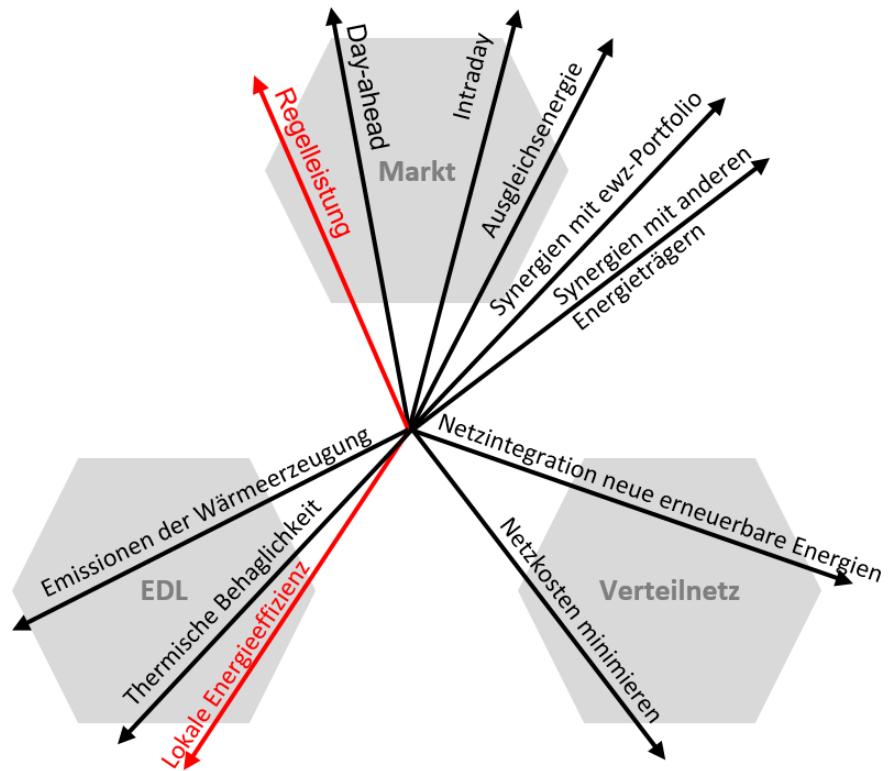


Abbildung 12: Regelleistung vs. lokale Energieeffizienz

Eine ähnliche Situation wie zuvor entsteht beim Abruf von Regelleistung. Ein Abruf ist auf jeden Fall zu befolgen. Hier spielt die lokale Energieeffizienz eine untergeordnete Rolle. In diesem Fall geht die Systemstabilität des Übertragungsnetzes und mit ihr die Versorgungssicherheit vor. Neben dem Preis für die Vorhaltung von Regelleistung kann auch ein separater Energiepreis für den Fall eines Abrufs festgelegt werden. Seit einigen Jahren können für den Fall, dass überschüssige Energie bezogen werden muss, auch negative Preise definiert werden. Mit der Höhe des Energiepreises kann die Abrufwahrscheinlichkeit beeinflusst werden. Bei stark negativen Preisen ist ein Abruf sehr unwahrscheinlich. Die historischen Daten zeigen, dass die Abrufwahrscheinlichkeit von Tertiärregelleistung bei extremen Preisen bei etwa 3 % liegt. Negative Regelenergiepreise bedeuten, dass man selbst dann Geld erhält, wenn man Energie bezieht. Als Folge dessen entstehen die gleichen Fragestellungen, wie sie bereits zuvor erörtert wurden.

Idealerweise kann die Energie bei einem Abruf sinnvoll genutzt oder für spätere Zeiten zwischengespeichert werden. Gerade im Sommer ist es einfach, Regelleistung vorzuhalten, da die Wärmepumpen oft nicht laufen, aufgrund des kleinen Wärmebedarfs. Im Fall eines Abrufs stellt sich aber die Frage, wohin man mit der Energie gehen soll. Irgendwann sind alle Speicher voll und der Abruf muss möglicherweise weiterhin erbracht werden. Möglicherweise kann überschüssige Wärme dem Boden zugeführt werden und dabei die Erdsonden regenerieren. Dies ist aber nicht überall sinnvoll. Insofern ist es zwingend, dass bei der Erstellung von Regelleistungs-Angeboten die Nutzung der Energie bei einem Abruf berücksichtigt wird. In den meisten Fällen, wo Regelleistung mit Wärmepumpen angeboten wird, ist deshalb der Faktor Energie die limitierende Größe in der Bestimmung des maximalen Gebotes.

### 5.2.3 Synergien mit anderen Energieträgern vs. Emissionen der Wärmeerzeugung

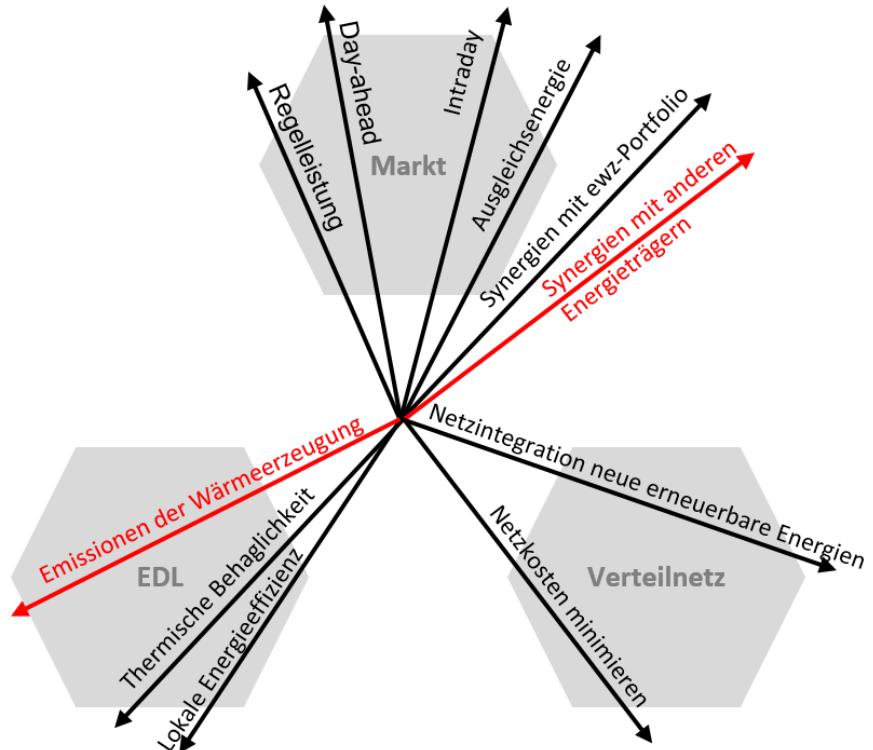


Abbildung 13: Synergien vs. Emissionen der Wärmeerzeugung

Im Contracting-Pool von ewz gibt es Objekte, bei welchen bivalent Wärme erzeugt werden kann. Bei solchen Anlagen liegt viel Flexibilität darin, zwischen verschiedenen Energieträgern auswählen zu können. So kann beispielsweise zwischen Gas und Strom optimiert werden. Die Kosten für Emissions-Kompensations-Massnahmen werden in der Optimierung berücksichtigt. Fossile Energieträger zur Spitzenlastdeckung sind teilweise sowieso im Einsatz. Es besteht durchaus Potential, den Verbrauch fossiler Energieträger reduzieren zu können und damit einen aktiven Beitrag zur Energiewende leisten zu können. Es besteht also sowohl Verbesserungs- wie auch Verschlechterungspotential. Letztlich wird es vor allem davon abhängen, wie stark man CO<sub>2</sub>-Emissionen bestraft. Innerhalb des WarmUp-Projektes stellt sich primär die Frage, wie viel Potential vorhanden ist.

Die Anlage aus WarmUp2 besitzt nur eine monovalente Versorgung mit Wärmepumpen. In einer weiteren Phase kann solch eine Anlage identifiziert und in WarmUp eingebunden werden.

## 5.2.4 Stromhandel vs. Netznutzungskosten

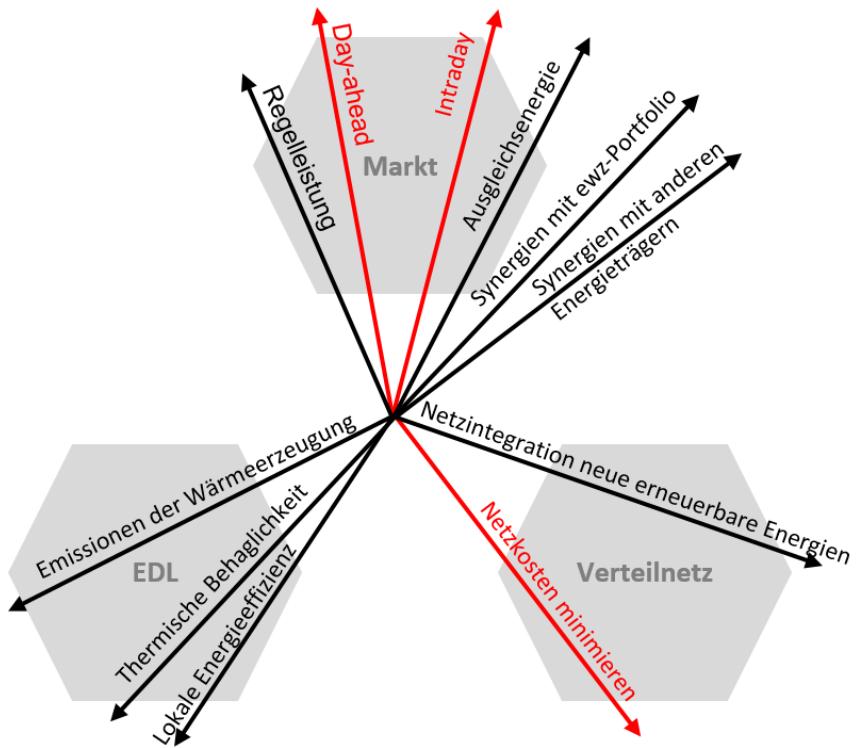


Abbildung 14: Energiehandel vs. Netznutzungskosten

In Zeiten hoher Einspeisung von Solarstrom sinken die Preise an der Strombörse. Weil die Energiepreise stark an die Situation von Nachbarländern und nicht an lokale Gegebenheiten gekoppelt ist, kann dies dazu führen, dass auch in Zeiten lokal hoher Netzlast günstig Strom eingekauft werden kann. Besonders in den Sommermonaten können tiefe Strompreise über Mittag den Leistungspeak im ewz-Netz verstärken und damit die Netznutzungskosten erhöhen. Dies ist eine der Erkenntnisse der Simulation in der Phase 1 des WarmUp Projektes. Die Netznutzungskosten sind im Optimierungsmodell enthalten. Allerdings werden kleine Differenzen in der Netzlast darüber entscheiden, welcher Zeitpunkt letzten Endes für die Abrechnung des Monatspeaks relevant sind. Um auf Nummer sicher zu gehen, müsste man die Netznutzungskosten konservativ prognostizieren. Gleichzeitig verbaut man damit die Möglichkeit, günstig Strom einzukaufen. In all jenen Fällen, die nicht den monatlichen Netzpeak beeinflussen, kann man die Opportunitäten des Strommarktes voll ausschöpfen. Es wird nicht so einfach sein, das richtige Level für den Grenzwert der Netzlast zu bestimmen. Letztlich hängt dies auch von der Qualität der Netzlastprognosen ab. Die Netzlastprognosen werden von der Handelsabteilung bezogen.

Diesbezüglich werden Diskussionen zum Design der Netznutzungskosten notwendig sein. Heute vergütet der Endkunde einen grossen Teil der Netznutzungskosten über einen Energietarif und einen Teil über einen Leistungstarif mit der monatlichen Leistungsspitze als Bemessungsgrundlage. Diese Art der Verrechnung bietet zu wenig Anreize für die netzdienliche Nutzung von Flexibilität. Zudem ist für die Auslegung der Verteilnetze die jährliche Spitze und nicht die Monatsspitzen relevant. Die Interpretation des Begriffs «Verursachergerecht» dürfte neu definiert werden. Kurzfristig wird aber kaum mit Änderungen zu rechnen sein.



## 5.3 Anlagenbeschrieb

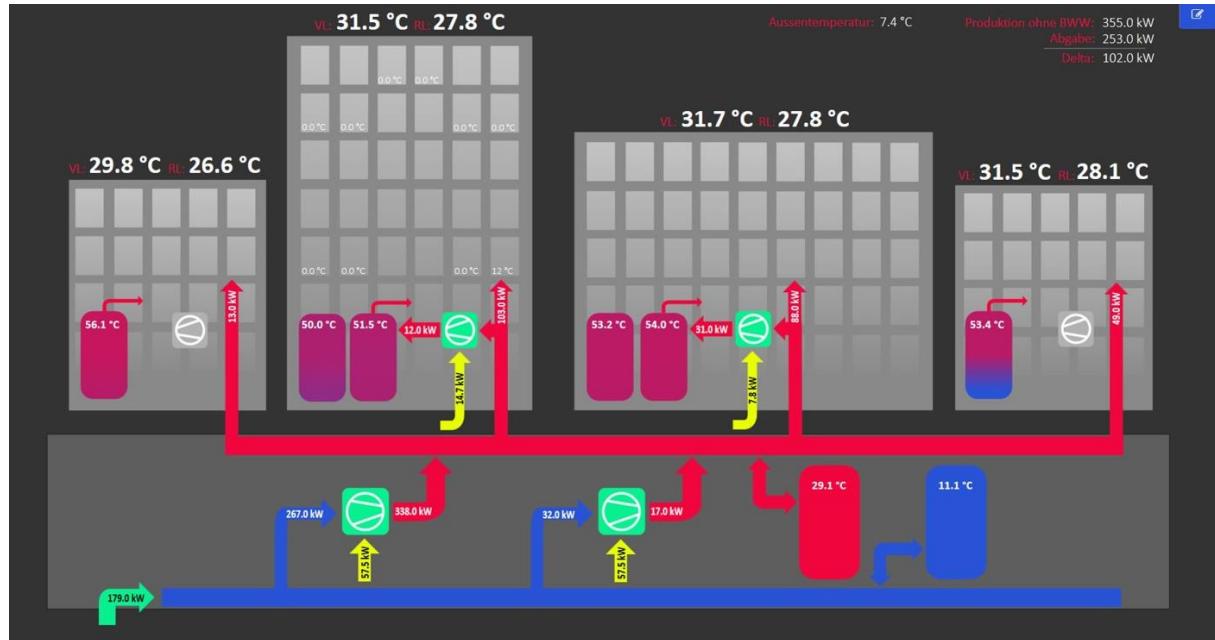


Abbildung 15: Pilotanlage in WarmUp2.

Als Pilotanlage wurde eine Liegenschaft mit 4 Gebäuden, 8 Boilern und 6 Wärmepumpen ausgewählt. Die Anlage beinhaltet Büros und Mietwohnungen.

Die bestehende Regelung im Pilotobjekt weist einen hohen Grad an Komplexität auf. Die übergeordnete Regelung durch WarmUp greift nicht direkt auf die Maschinensteuerung der Wärmepumpen ein, sondern übersteuert die Inputparameter der existierenden Regelung. Dies hat den Vorteil, dass das bestehende Regelsystem unangetastet bleibt. Gleichzeitig entstehen dadurch Herausforderungen bezüglich der Dynamik der Ansteuerung und das bestehende Regelsystem muss genau verstanden werden, damit es richtig angesteuert wird.

### 5.3.1 Fußbodenheizung

Die Temperatur der Fußbodenheizung wird über den Vorlauf geregelt. Das WarmUp-System kann die Solltemperatur des Vorlaufs übersteuern und dadurch die Heizleistung beeinflussen.

Der tatsächliche Wärmebezug wird durch Raumthermostaten beeinflusst. Diese sind nicht steuerbar. Je nach Solarstrahlung ist die Raumtemperatur mehr oder weniger träge und entsprechend die Reaktionszeit der Ventile unterschiedlich.

Als Kontrolle wird die Rücklauftemperatur überwacht. Falls Temperaturgrenzen unter- oder überschritten werden, wird die Wärmepumpe umgehend so gesteuert, dass der Komfort gewahrt bleibt. Dank der vorausschauenden Regelung ist die Gefahr klein, dass Temperaturgrenzen verletzt werden. Vielmehr dient diese Absicherung für den Fall, dass die Kommunikation zwischen dem Backend und der Anlage unterbrochen wird.



### 5.3.2 Thermoaktiven Bauteilsysteme

Die thermoaktiven Bauteilsysteme (TABS) sind wiederum über die Vorlauftemperatur geregelt. Die Übersteuerung funktioniert wie bei der Heizung. Im Gegensatz zu der Heizung kann bei den TABS das Regelventil angesteuert werden. In gewissen Grenzen ist ein vorausschauendes Heizen also möglich. Die Stellgröße des Regelventils wird im PI-Regler bestimmt. Hierfür können die Inputs übersteuert werden.

Beim Überheizen der TABS ist Vorsicht geboten, weil die TABS sehr träge sind. Ist zu viel Wärme in den TABS, bringt man diese kaum mehr raus (weil beim Kühlen ein kleinerer Temperaturgradient möglich ist).

### 5.3.3 Kühlung

Für die Kühlung gibt es eine separate Heizkurve. Diese wird nicht beeinflusst, da hier vorwiegend mit Freecooling gekühlt wird und entsprechend der Strombedarf für die Kühlung wesentlich kleiner als für die Heizung ist.

### 5.3.4 Brauchwarmwasser

Die Solltemperatur für das Brauchwarmwasser (BWW) kann dynamisch übersteuert werden. Die maximale Ausschalttemperatur liegt bei 65 °C. Die Einschalttemperatur liegt bei 45 °C.

Die Legionellenschaltung wird ebenfalls durch WarmUp durchgeführt. Zusätzlich gibt es eine lokale Absicherung, die sicherstellt, dass die Legionellenschaltung mindestens einmal wöchentlich erfolgt.

Theoretisch könnte man auch den Elektroeinsatz übersteuern. Aus Effizienzgründen hat man sich entschieden, darauf zu verzichten.

Im Sommer dienen die TABS als Quelle für die BWW-Ladung. Sobald die Temperatur in den TABS tief ist, wird Wärme von der Energiezentrale angefordert. Der Kondensationsschutz wird weiterhin durch eine lokale Regelung gewährleistet.

### 5.3.5 Lüftung

Die Lüftung wird nicht übersteuert. Aufgrund der Wärmerückgewinnung und dem Rücklauf aus der BWW-Ladung ist stets genügend Wärme für die Lüftung vorhanden.

## 5.4 Optimierung

In diesem Kapitel wird qualitativ die Funktionsweise der Optimierung mittels MPC-Regler beschrieben. 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.



## 5.4.1 Modellierung

### 5.4.1.1 Gebäude

Die Abbildung 16 zeigt eine vereinfachte Darstellung eines Anlagemodells. Das Beispiel entspricht der Anlage aus WarmUp1 und entspricht nicht ganz jenem von WarmUp2. Trotzdem lassen sich die Grundgedanken und der Umfang der Modellierung an diesem Beispiel gut erklären. 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 17 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 andere Konzepte. Folglich wurde ein Ansatz entwickelt, mit der man die Parameter mittels Regression, basierend auf historischen Zeitreihen, automatisch berechnen kann.

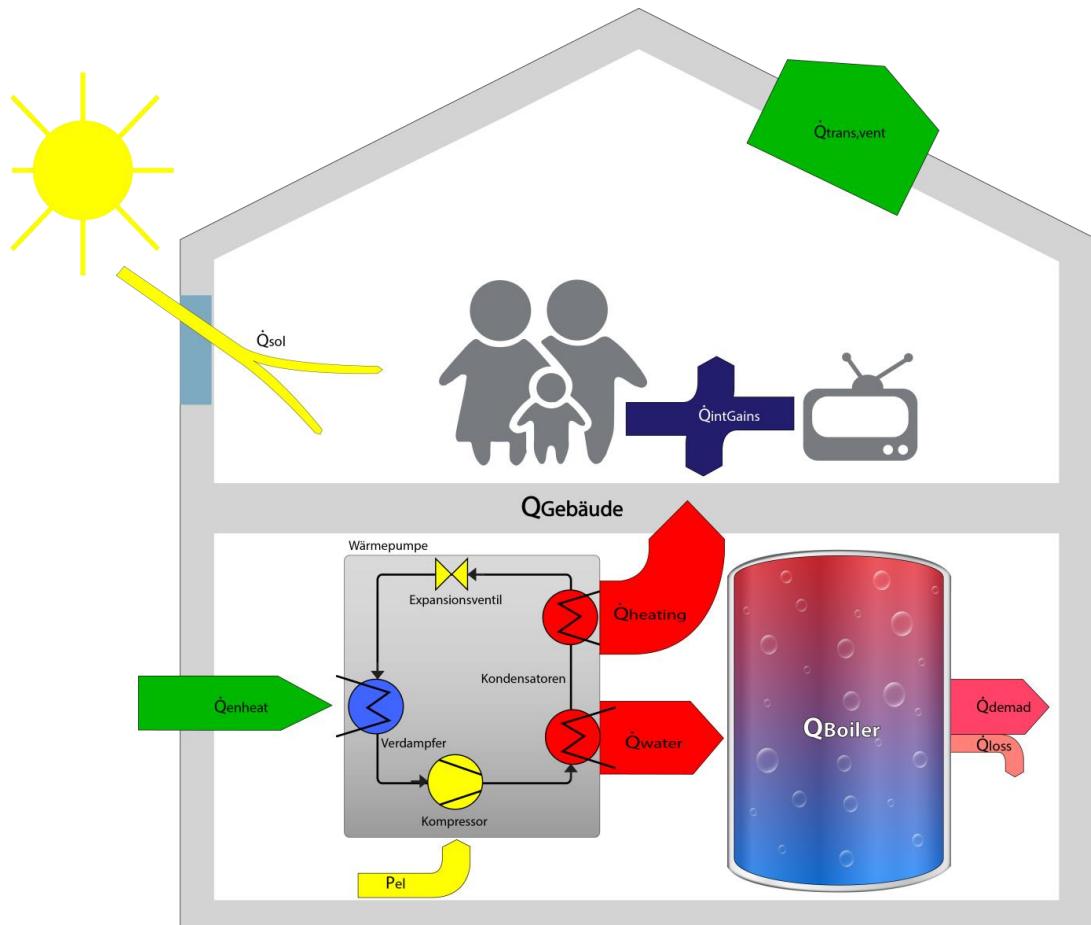


Abbildung 16: Schematische Darstellung eines Gebäudemodells (entspricht der Anlage aus WarmUp1)

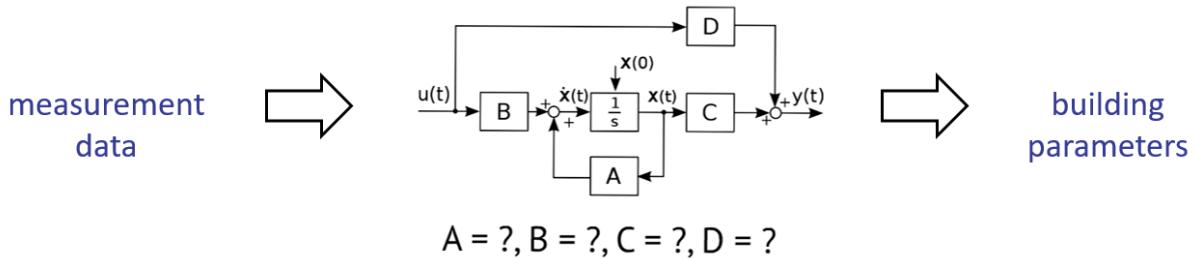


Abbildung 17: Generische Zustandsraumdarstellung für die Modellierung der Anlagen. Mittels Regression werden die Gebäudeparameter bestimmt.

Die Abbildung 18 zeigt in der untersten Zeile einen Vergleich der Simulationsresultate der Raumtemperatur und der realen Messdaten der Anlage aus WarmUp1. Der weiße Bereich ist der Komfortbereich. Innerhalb diesem kann sich die Temperatur bewegen. In der in Abbildung 18 dargestellten Situation wurde die Flexibilität nicht aktiv bewirtschaftet (Ist-Situation) entsprechend ist der Tagesmittelwert ziemlich konstant. Für die Optimierung genügt eine gute Genauigkeit im Zeitbereich von ein paar wenigen Tagen. Das Resultat für diese Anlage zeigt, dass das Verhalten des Gebäudes sehr nahe an der Realität liegt. Sofern die notwendigen Zustandsgrößen gemessen werden, funktioniert diese Methode gut, was allerdings eher selten der Fall ist (siehe Kapitel 6.1.1).

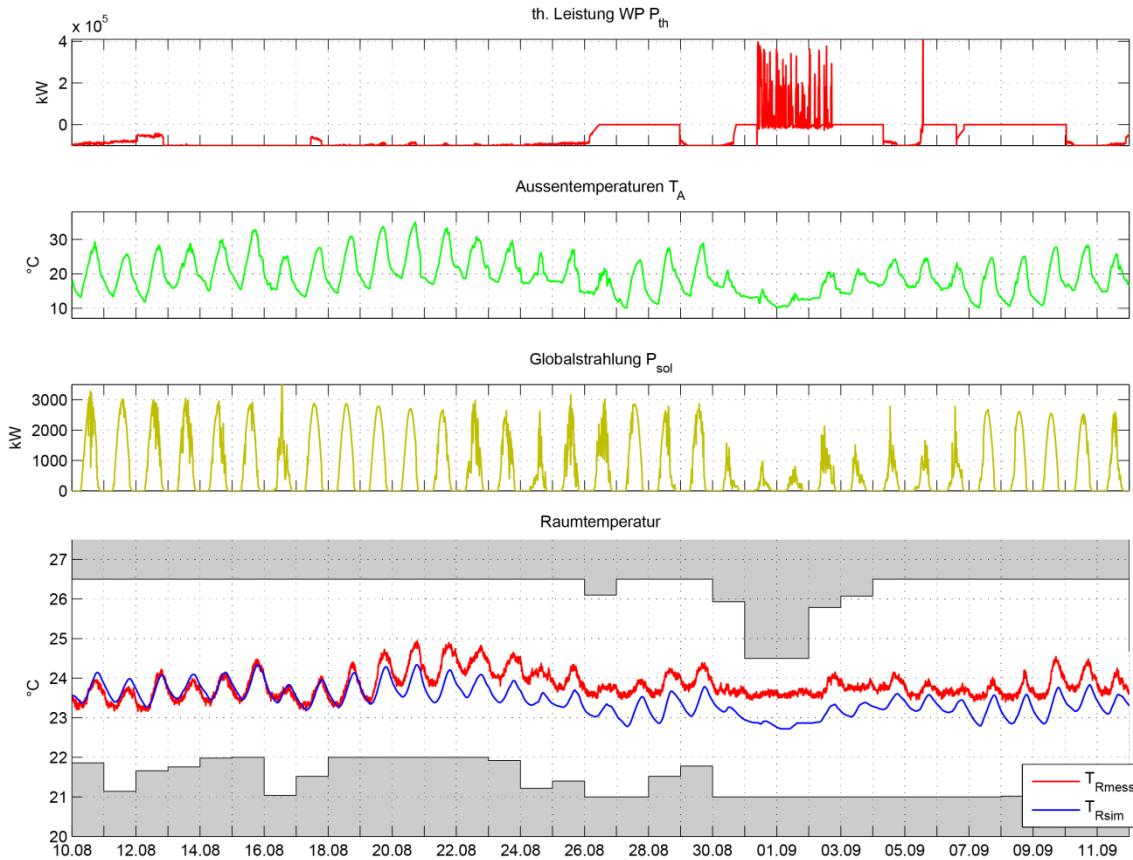


Abbildung 18: Gegenüberstellung des Gebäudemodells mit den Messdaten der Anlage.



### 5.4.1.2 Boiler

Neben dem Gebäude als Speicher werden auch die Boiler modelliert. Die Abbildung 19 zeigt ein Beispiel eines Boilers der Pilotanlage. Gut zu erkennen ist die Schichtung innerhalb des Boilers. Im realen Boiler werden 5 Temperaturschichten gemessen und das Boilermodell besteht aus 10 Layern. Das Modell stimmt ziemlich gut mit der Realität überein. Einerseits ist es wichtig, dass die Austrittstemperatur möglichst gut prognostiziert werden kann, damit die Grenzen des Komforts eingehalten werden. Andererseits ist es wichtig, dass die Optimierung die Ladezyklen so plant, dass die Schichtung nicht unnötig zerstört wird und gleichzeitig der Ladezyklus genug lange dauert, so dass letzten Endes die Temperatur im obersten Layer nach der Ladung höher ist als vorher. Lange Laufzeiten sind gleichzeitig schonend für den Betrieb der Wärmepumpen. Umgekehrt besteht aufgrund der Preismuster an der Börse möglicherweise ein gewisser Anreiz, die Wärmepumpen öfters zu takten. Wie oft die Wärmepumpen ein- und ausgeschaltet werden dürfen, kann als Randbedingung für die Optimierung parametriert werden.

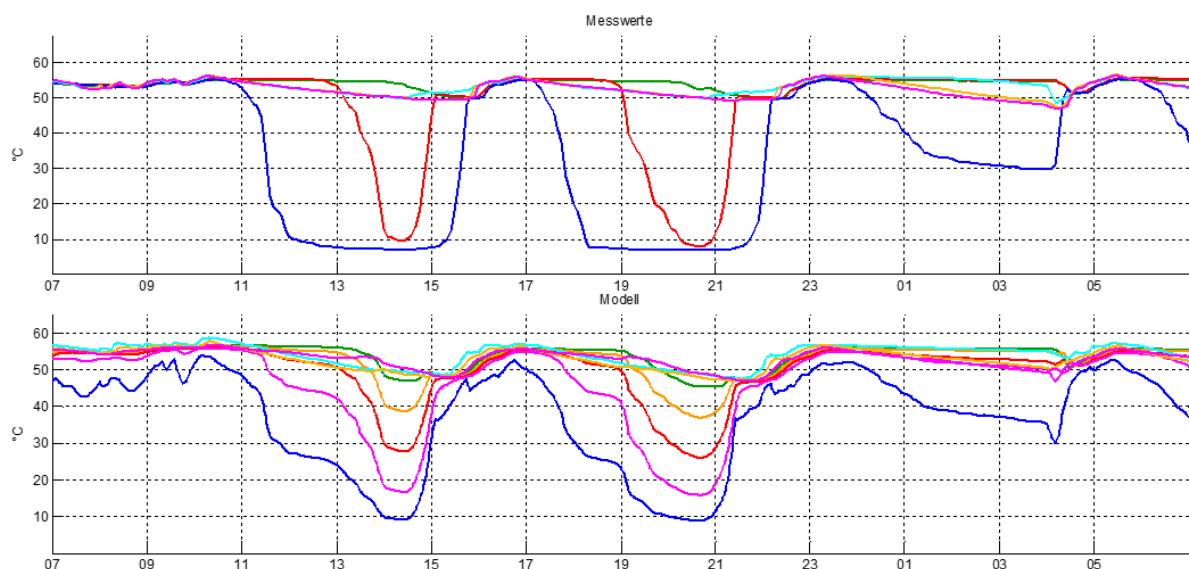


Abbildung 19: Vergleich der Temperaturmessungen (oben) und des Modells (unten).

Die Flexibilität eines Boilers liegt im Temperaturbereich, den man durchlaufen darf. Dank der Notwendigkeit einer Legionellenschaltung verfügt die Wärmepumpe der Pilotanlage über die Möglichkeit, Temperaturen bis 65°C zu erreichen. Bei anderen Anlagen wird die Legionellenschaltung teilweise auch mit dem Elektroheizungssystem gewährleistet. In dem hier modellierten Fall aber bietet dieses Potential nach oben, sprich die Möglichkeit, zeitweise höhere Temperaturen zu fahren, eine grosse Flexibilität in der Bewirtschaftung.

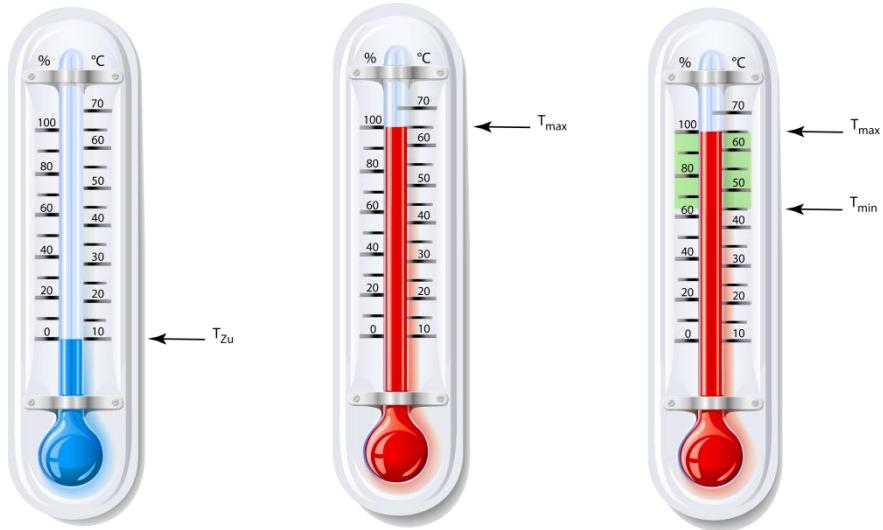


Abbildung 20: Zuflusstemperatur des Kaltwassers (links), maximale Temperatur des Wassers im Boiler (Mitte), der Temperaturbereich zwischen  $T_{\min}$  und  $T_{\max}$  ist jener Bereich, der die zu bewirtschaftende Flexibilität repräsentiert (rechts).

#### 5.4.2 Zielfunktion

In Abhängigkeit der in Kapitel 5.2 definierten Zielanwendungen wird eine Kosten-Zielfunktion definiert, die in der Optimierung minimiert wird. Als Kosten fliessen tatsächliche Kosten, wie Energiekosten, sowie fiktive Strafkosten, z.B. um die Einhaltung von Temperaturgrenzen zu erzwingen, in die Berechnung ein.

Die Optimierung besteht aus einem hierarchischen Prozess (siehe Kapitel 5.4.4). Jede Optimierung verfolgt jeweils eine ganzheitliche Betrachtungsweise. Die verschiedenen Optimierungen unterscheiden sich hauptsächlich in der zeitlichen Abfolge. So findet beispielsweise die Optimierung der TRL-Angebote etwa zwei Tage vor dem Ausführungszeitpunkt statt. Im Gegenzug findet die Betrieboptimierung maximal 15 Minuten vor dem Ausführungszeitpunkt statt. Ab einer gewissen Grösse eines Pools, ist zudem eine hierarchische Struktur auch bezüglich der Gruppierung von ähnlichen Anlagen denkbar.

#### 5.4.3 Nebenbedingungen

Die Bedingungen der Optimierungsfunktion zur Nutzung der Flexibilität von Wärmepumpen können als harte Grenzen (hard constraints) oder weiche Grenzen (soft constraints) definiert werden. Harte Grenzen dürfen auf keinen Fall verletzt werden. Falls trotz aller optimierungsseitigen Vorkehrungen aufgrund von höherer Gewalt eine harte Grenze überschritten wird, wird ein Alarm ausgelöst. Weiche Grenzen werden bei Übertreten mit fiktiven Strafkosten pönalisiert. Dies geschieht beispielsweise, wenn es darum geht, dass thermische Komfortvorgaben in gewissen Zeiten wichtiger einzuhalten sind als in anderen Zeiten (z.B. in der Nacht/bei Ferienabwesenheit mehr Flexibilität). Solche fiktiven Kosten werden real nicht verrechnet, beeinflussen aber indirekt den tatsächlich realisierbaren monetären Erfolg negativ. Die Festlegung der richtigen Höhe von Soft Constraints ist eine anspruchsvolle Aufgabe.



#### 5.4.4 Optimierungskaskade

Die Abbildung 21 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.

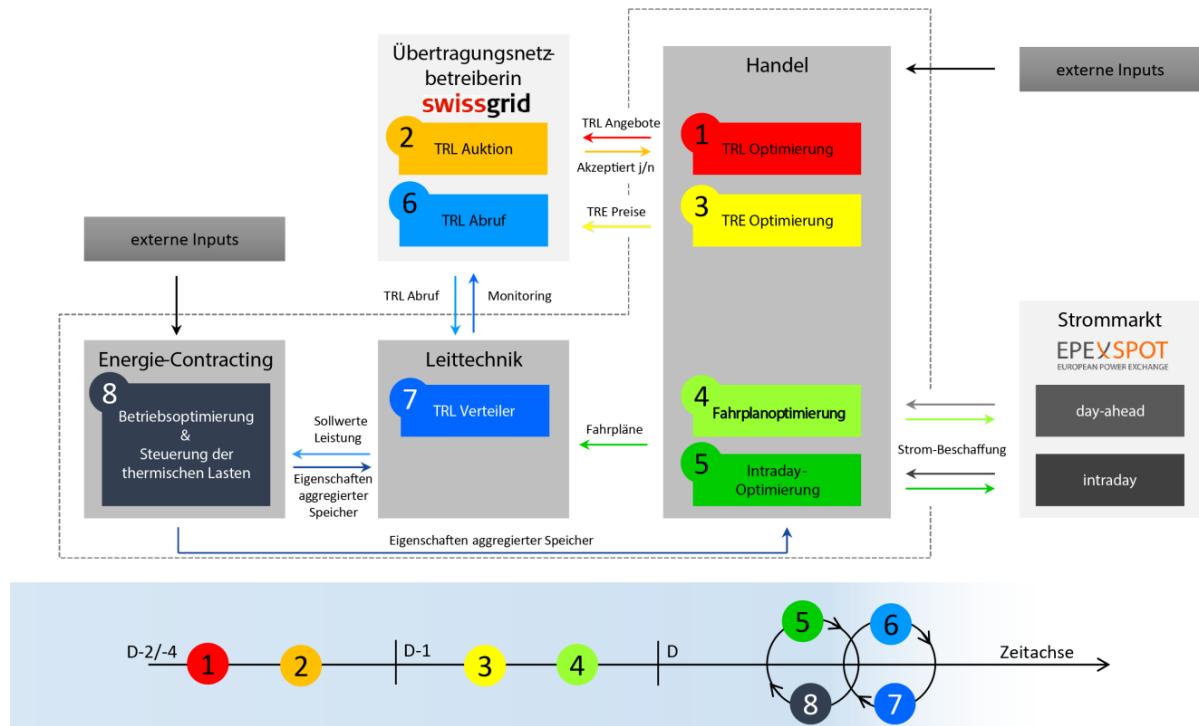


Abbildung 21: Die Optimierungskaskade im WarmUp Projekt. Die jeweiligen Schritte sind nach ihrer zeitlichen Abfolge durchnummieriert.

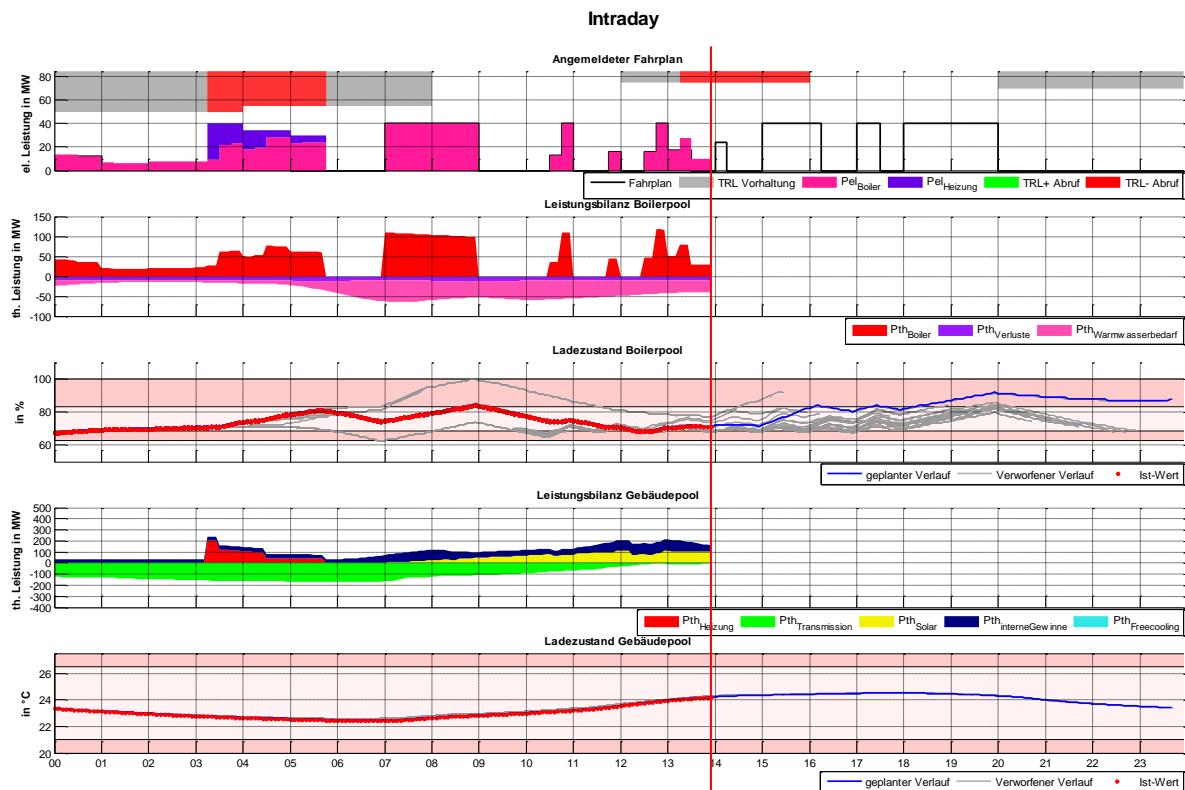
In der ersten Optimierung werden Angebote für Tertiärregelleistung erzeugt. Es liegt in der Natur der Sache, dass Abrufe von Regelleistung nicht vorhergesehen werden können. Folglich müssen in einer stochastischen Optimierung verschiedene Abrufszenarien berücksichtigt werden. Je nach Szenario ergeben sich unterschiedliche Kosten und Erträge. Anschliessend werden die TRL-Angebote an Swissgrid übermittelt, welche die optimale 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 Regelleistung 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 Wittersituationen reagieren zu können. Für jede Optimierung erhält der Simulator neue Prognosenedaten. Die Intraday-Optimierung wurde als vorausschauender Regler (MPC-Controller) implementiert. Mit den Modellen der Anlagen und den Prognosenedaten kann der Regler für den Vorhersagehorizont die richtigen Entscheide treffen und entsprechende Handelsgeschäfte auslösen.

Abbildung 22 zeigt die Funktionsweise des MPC-Controllers anhand eines Beispiels aus WarmUp1. (Aktuelle Printscreens aus WarmUp2 sind in Kapitel 6.3.3 abgebildet.) Die rote Linie wiederspiegelt 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 22: 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 des Boilerpools, 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 TRE-Preis spielt deshalb auch die Blockgrösse eine Rolle. In Schritt 7 wird der TRE-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 Fahrplan möglichst eingehalten



werden und andererseits soll der Speicherinhalt jeder einzelnen Last innerhalb der zulässigen Grenzen gehalten werden. Die Betriebsoptimierung wird wiederum als MPC-Regler implementiert. In jedem Entscheidungsschritt wird ein Zeithorizont in der Zukunft betrachtet und daraus die optimale Entscheidung für den aktuellen Zeitschritt berechnet.

## 5.5 Eingriff in das bestehende Gebäudeleitsystem

### 5.5.1 Stakeholder bei der Anbindung von Anlagen

Abbildung 23 zeigt eine Übersicht der Stakeholder bei der Anbindung der Pilotanlage. Es müssen zukünftig bei neuen Anlagen längst nicht alle aufgeführten Stakeholder involviert werden. Bei der ersten Anlage war es aber sinnvoll, im Konsens die optimale Lösung für die Anbindung der Anlagen zu erarbeiten. Die Lösung hat sich bisher bewährt und funktioniert gut. In einem nächsten Schritt kann man sich überlegen, ob die Anbindung etwas schlanker realisiert werden kann (siehe Kapitel 6.1.3).

Die Workshops mit den verschiedenen Akteuren hat gezeigt, dass die neue Denkweise durchaus etwas Zeit benötigt, bis sie verstanden und akzeptiert wird. Gleichzeitig hat sich schnell gezeigt, dass das bisherigen Regelsystem der Pilotanlage nicht optimal designt ist, um übergeordnete Energiemanagement-Systeme anbinden zu können. Damit dies in Zukunft besser klappt und idealerweise direkt bei der Planung von neuen Anlagen berücksichtigt werden kann, wurde eine Reihe von «WarmUp-ready»-Kriterien erarbeitet (siehe Kapitel 6.1.5).

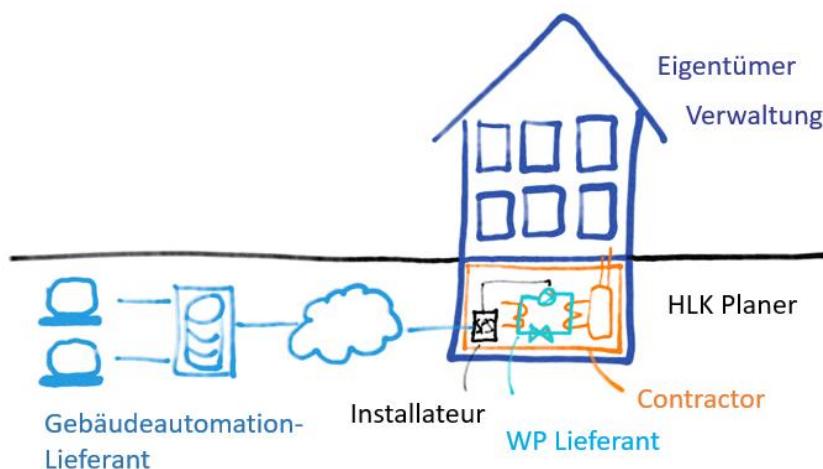


Abbildung 23: Übersicht der Stakeholder bei der Anbindung von Anlagen.

### 5.5.2 Dynamische Sollwertübersteuerung

Aus der Optimierung resultiert ein Fahrplan für die Wärmepumpen. Der Fahrplan beinhaltet elektrische Sollwerte. Daraus müssen für die einzelnen Anlagen verwertbare (thermische) Sollwerte berechnet werden, so dass der gesamte elektrische Verbrauch dem zuvor gehandelten Fahrplan entspricht. Die Übersteuerung der bisherigen Regelung auf der Anlage kann auf unterschiedliche Art und Weise erfolgen. Grundsätzlich bieten sich nachfolgende Optionen an:

- Übersteuerung der Heizkurve
- Übersteuerung der Sensoren
- Übersteuerung der Stellgrößen am Ausgang der PI-Regler
- Direktes Ansteuern der Wärmepumpen (z.B. durch Relais)

Die Übersteuerung der Stellgrößen bietet die beste Dynamik. In den Workshops mit den bisherigen Akteuren hat sich aber gezeigt, dass im vorliegenden Fall diese Option nicht möglich ist. Das bisherige Regelkonzept besteht aus kaskadierten PI-Reglern so dass ein Übersteuern von Eingangsgrößen unumgänglich ist. Einen direkten Eingriff via Relais ist als zu riskant bewertet worden, da im Fall eines Kommunikationsproblems und ausgeschaltetem Relais die Wärmepumpe nicht mehr von selbst anspringen kann. Man hat sich deshalb im Konsens für das Übersteuern der Heizkurven entschieden.

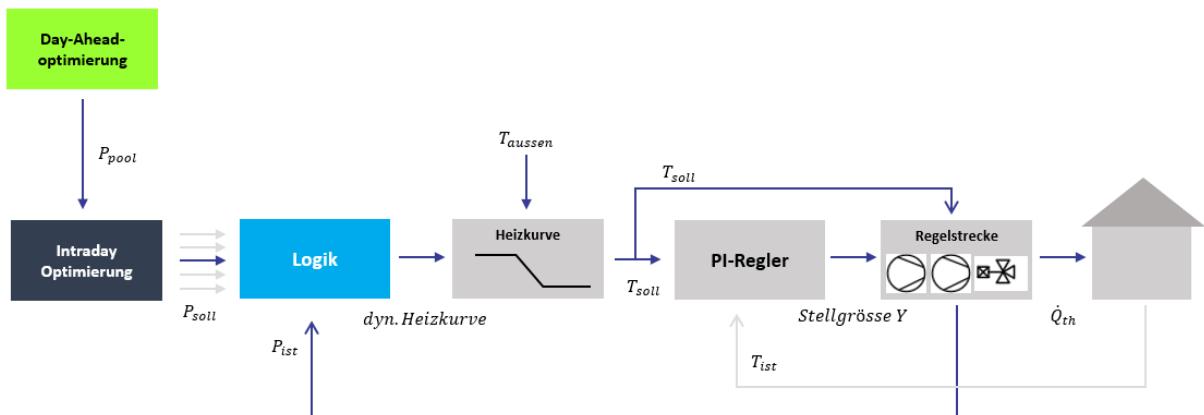


Abbildung 24: Vereinfachtes Schema der Regelstrecke in der Pilotanlage.

Via Schaltfläche auf der Webapplikation kann der WarmUp-Modus aktiviert oder deaktiviert werden. Sobald WarmUp aktiv ist, werden die dynamischen Heizkurven verwendet, andernfalls die statischen. Im Fall der Boiler ist die Übersteuerung sehr einfach. Es genügt, einzig die Solltemperatur zu verändern um ein Ein- oder Ausschalten zu erzwingen.

## 5.6 Exception Handling

Ein äusserst wichtiger Bestandteil von robuster Software ist das Behandlung von Ausnahmesituationen. Was soll das System machen, wenn beispielsweise eine Prognose nicht rechtzeitig geliefert wird? Wie soll das System reagieren, wenn eine Temperaturgrenze erreicht ist? Was soll passieren, wenn das Resultat einer Optimierung nicht die gewünschte Qualität aufweist? Diese und viele andere Ausnahmesituationen müssen gehandelt werden. Das Exception Handling nimmt einen beachtlichen Anteil am Programmieraufwand ein. Nachfolgend werden einige der Regeln kurz erläutert.

### 5.6.1 Alarme

Das WarmUp System erlaubt es, für beliebig viele Messgrößen erlaubte Bereiche zu definieren. Naheiliegend sind Temperaturgrenzen für Vor- und Rücklauf sowie der Boiler aufgelistet. Im Fall der Boiler muss abgesichert werden, dass die Temperaturen nicht zu tief sind. Die obere Temperaturgrenze wird durch die Maschinensteuerung der Wärmepumpe selber geregelt. Im Fall der Heizung muss überwacht werden, dass die Temperatur im Rücklauf nicht zu hoch ist. Dies geschieht dann, wenn die



Wärmeabgabe an das System nicht wie geplant vonstatten geht, weil beispielsweise die Raumthermostaten geschlossen sind. Zu tiefe Temperaturen werden dadurch verhindert, indem minimale Werte für die Heizkurven definiert sind.

Alarm	Beschreibung	Gewünschte Reaktion
BWW-Temperatur Grenzwert-überwachung Haus 1-4 <b>Temperatur zu tief</b>	Nach einer vorgegebenen Temperatur und Wartezeit wird auf dem obersten Speicherführer, ein Alarm abgesetzt	Sofortiger Start der BWW-Ladung
Rücklauftemperatur Grenzwert-überwachung Haus 1-4 <b>Temperatur zu hoch</b>	Bei einer vorgegebenen Temperatur beim Rücklauf, wird ein Alarm abgesetzt	Temporäre Deaktivierung der Sollwertübersteuerung

### 5.6.2 Automatischer Stopp

Es gibt Ausnahmesituationen, auf die WarmUp korrigierend einwirken kann. Es gibt auch Fälle, wo eine automatische Korrektur nicht möglich ist. Beispielsweise können Probleme mit der Server-Performance einen robusten Betrieb verunmöglichen. Solche Fälle müssen detektiert werden und eine manuelle Interaktion auslösen. Vorsichtshalber kann WarmUp automatisch deaktiviert werden. Hierbei besteht allerdings die Herausforderung, nicht zu schnell auszuschalten, da beispielsweise eine temporär längere Reaktionszeit nicht zwingend ein anhaltendes Problem sein muss. Umgekehrt sollte im Fall eines anhaltenden, grösseren Problems umgehend reagiert werden. Zwischen diesen beiden Positionen muss ein Trade-Off gefunden werden.

### 5.6.3 Kommunikationsausfall

Fällt die Kommunikation zu einer der Anlagen aus, wird sofort ein Alarm generiert und an das WarmUp-System gesendet. Sofern keine Kommunikation zur Anlage mehr möglich ist, kann WarmUp seine Sollwerte nicht mehr korrigieren. Dieser Fehlerfall kann auch im klassischen System vorkommen. In beiden Fällen ist es wichtig, dass die gesendeten Sollwerte auch für eine längere Zeit aktiv sein können, ohne dass Probleme entstehen. Zusätzlich kann auf der Steuerung vor Ort ein Heartbeat überwacht werden, so dass die Anlage selber auf die klassischen Sollwerte umschalten kann.

### 5.6.4 Manueller Stopp

Der Benutzer kann via Webapplikation den WarmUp-Modus abschalten. Dies ist beispielsweise dann sinnvoll, wenn eine Revision der Anlagen bevorsteht.

## 6 Resultate

In den nachfolgenden Kapiteln wird das bisher Erreichte präsentiert und diskutiert.

### 6.1 AP1 - Anlagen

#### 6.1.1 Parameteridentifikation für das Gebäudemodell

Die Parameteridentifikation für die Pilotanlage wurde mit dem eigens dafür entwickelten Tool durchgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die Qualität der Resultate wesentlich davon abhängt, wie viele der Zustandsgrößen mit Sensoren gemessen werden. Im Fall der vorliegenden Arbeit waren weder Raumtemperaturen noch Temperaturen, die auf den Zustand der Gebäudemasse schliessen lassen, vorhanden. Der Nutzen der Rücklauftemperaturen ist sehr bescheiden. Um die Ausgangslage zu verbessern, wurden Funkfühler von EnOcean zur Messung der Raumtemperatur installiert. Die Bauweise des Gebäudes war aber dermassen massiv, dass keine stabile Funkverbindung über längere Zeiten möglich war und dieser Ansatz leider verworfen werden musste. Anhand von typischen Kennzahlen für Gebäudematerialien und viel manuellem Tuning konnten letztlich Parameter gefunden werden, welche gute Resultate gezeigt haben. Der manuelle Ansatz ist aber definitiv zu aufwendig und wird nicht weiterverfolgt werden.

Nachfolgende Abbildung zeigt einen Vergleich der gemessenen und simulierten Raumtemperatur für die Anlage aus WarmUp1. Für die Anlage aus WarmUp2 kann dieser Vergleich nicht erstellt werden, weil keine Raumtemperaturmessungen existieren.

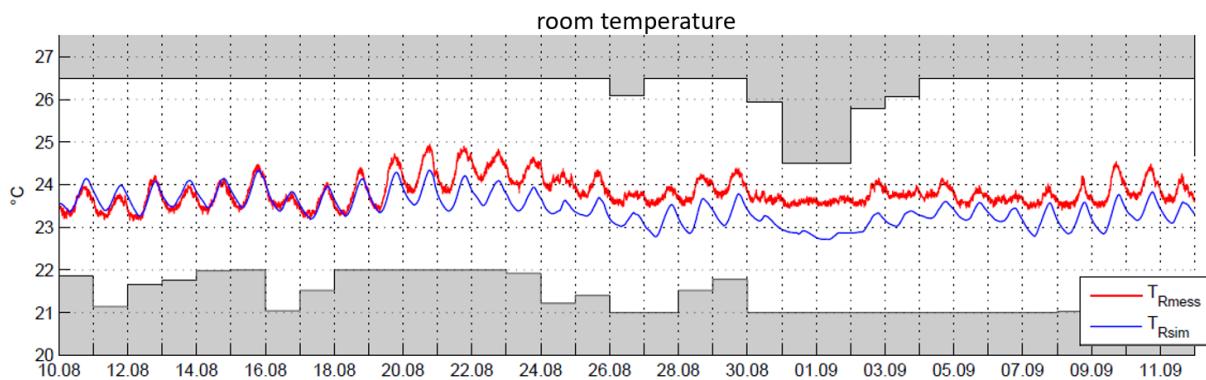


Abbildung 25: Vergleich der gemessenen und simulierten Raum-Temperaturen.

#### 6.1.2 Zustandserfassung in den Boilern

Die Abbildung 26 zeigt in der ersten Zeile den Verlauf des obersten und untersten Temperaturfühlers im Boiler. Im Bereich mit roter Schraffierung ist zu erkennen, dass es Zeiten gibt, wo diese zwei Temperatursensoren praktisch konstante Werte über Stunden anzeigen. Basierend auf nur diesen zwei Sensoren könnte man fälschlicherweise ableiten, dass in dieser Zeit kein Brauchwarmwasser bezogen wurde. In der zweiten Zeile ist der gleiche Boiler mit insgesamt fünf Temperaturfühlern dargestellt. Man sieht, dass zu der vorher erwähnten Zeit ein Bedarf an Brauchwarmwasser existierte (roter Verlauf). Aufgrund der Schichtung im Boiler tragen der oberste und unterste Temperaturfühler wenig zur



Bestimmung des Ladezustandes bei. Idealerweise sind Boiler also mindestens mit drei Temperaturfühlern ausgestattet. Bei weniger Fühlern verzichtet man besser auf den untersten statt auf den mittleren Fühler, weil man so ein nahendes zwingendes Nachladen besser prognostizieren kann.

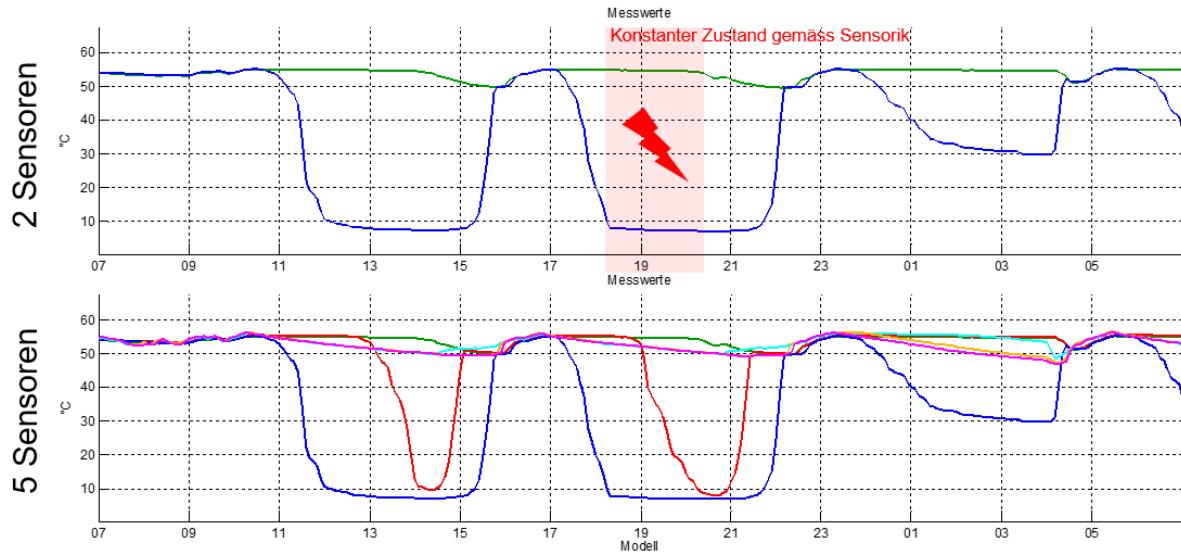


Abbildung 26: Schwierige Zustandserfassung bei Vorhandensein von nur 2 Temperaturfühlern (oben). Unten ein Beispiel mit 5 Fühlern, womit der Ladezustand des Boilers sehr genau abgeleitet werden kann.

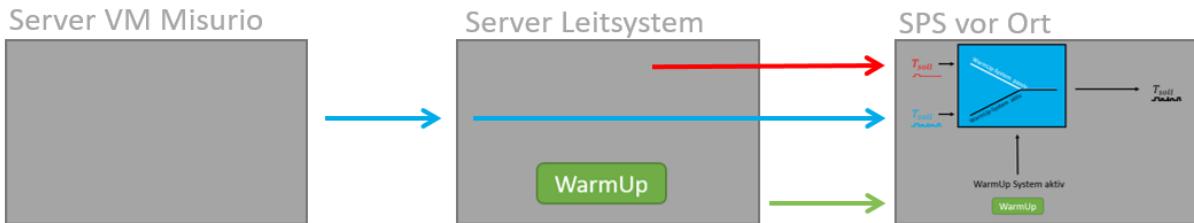
### 6.1.3 Anbindung an die bestehende Gebäudeautomation

Aktuell geschieht die Übersteuerung der dynamischen Sollwerte auf der SPS vor Ort. Sprich die SPS bekommt vom Server sowohl die klassischen statischen wie auch die dynamischen Sollwerte. Zusätzlich wird der SPS mitgeteilt, ob WarmUp aktiv ist oder nicht. Die SPS entscheidet anhand dieses Status-Flags, welche Sollwerte sie verwendet. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die SPS detektieren kann, ob die Verbindung zum Server ausgefallen ist und entsprechend reagieren kann. Der grosse Nachteil dieses Ansatzes sind teure Anpassungen auf der SPS. Vor allem dann, wenn es sich um ältere Anlagen handelt, ist man vorsichtig, wenn es darum geht, Anpassungen vorzunehmen. Bei zukünftigen neuen Anlagen ist dieser Ansatz kein Problem, da die Ergänzung ohne grossen Mehraufwand beim Bau der Anlage berücksichtigt werden kann.

In der Option 2 wird die Selektion der gültigen Sollwerte direkt auf dem Server durchgeführt und die SPS vor Ort bleibt unangetastet. Für bestehende Anlagen ist dieser Ansatz wesentlich günstiger. Im Fehlerfall ist dieser Ansatz aber weniger robust als Option 1.



### Option 1



### Option 2



Abbildung 27: Dynamische Übersteuerung von Sollwerten auf der SPS vor Ort (Option 1) oder auf dem Server (Option 2).

#### 6.1.4 Erkenntnisse aus der Anbindung der Pilotanlage

Die Wahl der Pilotanlage beruhte vor allem auf ihrer Grösse und der Flexibilität. Wie sich später herausstellte, ist die bestehende Regelung nicht optimal für den Eingriff eines übergeordneten Energiemanagement-Systems. Zudem musste die fehlende Sensorik der Speicherzustände aufwendig durch andere Ansätze kompensiert werden. Die Analyse weiterer Anlagen hat gezeigt, dass die Pilotanlage diesbezüglich eine Ausnahme ist und dass andere Anlagen einfacher angebunden werden können. Trotzdem ist es gelungen, bei der ausgewählten Anlage die Steuerung der Wärmepumpen zu übersteuern und die Tests sind erfolgreich abgeschlossen worden. In Kapitel 6.5 werden Vergleiche des Fahrplans und der tatsächlich realisierten elektrischen Leistung präsentiert.

#### 6.1.5 WarmUp-ready Kriterien

Damit die Erkenntnisse aus WarmUp in die Planung von neuen Anlagen einfließen, wurden WarmUp-ready Kriterien definiert. Die meisten Kriterien sind relativ einfach zu erfüllen, wenn diese bereits beim Bau der Anlagen berücksichtigt werden. Einige der Kriterien sind mittlerweile sowieso Standards. Zu den zwingenden WarmUp-ready Kriterien zählen:

- Mindestens Fußbodenheizung, idealerweise noch träge Systeme
- Speicherkapazität der Boiler so gross dimensionieren, dass 1-2 Ladungen pro Tag genügen
- Sollwerte dynamisch von übergeordnetem Energiemanagement-System übersteuerbar
- Vor- und Rücklauftemperatur der Wohnungen werden gemessen





- Temperaturfühler in der Abluft
- 3 Temperaturfühler pro Boiler
- Zugriff auf die Zählerdaten, Temperaturmessungen, etc. (idealerweise via REST-Schnittstelle)
- Trennen von Grundlast und flexiblen Lasten in der Hydraulik

Es gibt weitere Kriterien, die zu mehr Flexibilität führen. Diese Kriterien sind nicht zwingend, erlauben aber eine bessere Performance des WarmUp-Systems. Gleichzeitig sind die nachfolgenden Kriterien in der Regel mit Mehrkosten verbunden. Diese müssen sich durch den Mehrwert im Betrieb rechtfertigen. Dieser Vergleich ist allerdings schwierig sachlich zu führen. Die massiven Veränderungen in der Energiebrache in den letzten 5 Jahren haben gezeigt, wie schnell sich Spielregeln und Preise verändern können. Die begünstigenden, aber nicht zwingenden, WarmUp-ready Kriterien sind:

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

## 6.2 AP2 – Kommunikation

Einen wesentlichen Anteil an den Arbeiten in WarmUp2 nahmen die Schnittstellen zu verschiedenen bestehenden Systemen ein. Abbildung 28 zeigt eine Übersicht dieser Schnittstellen. Die grünen Pfeile entsprechen den neuen Schnittstellen und die blauen Pfeile den bereits vorhandenen. In den nachfolgenden Absätzen werden die neuen Schnittstellen kurz beschrieben.

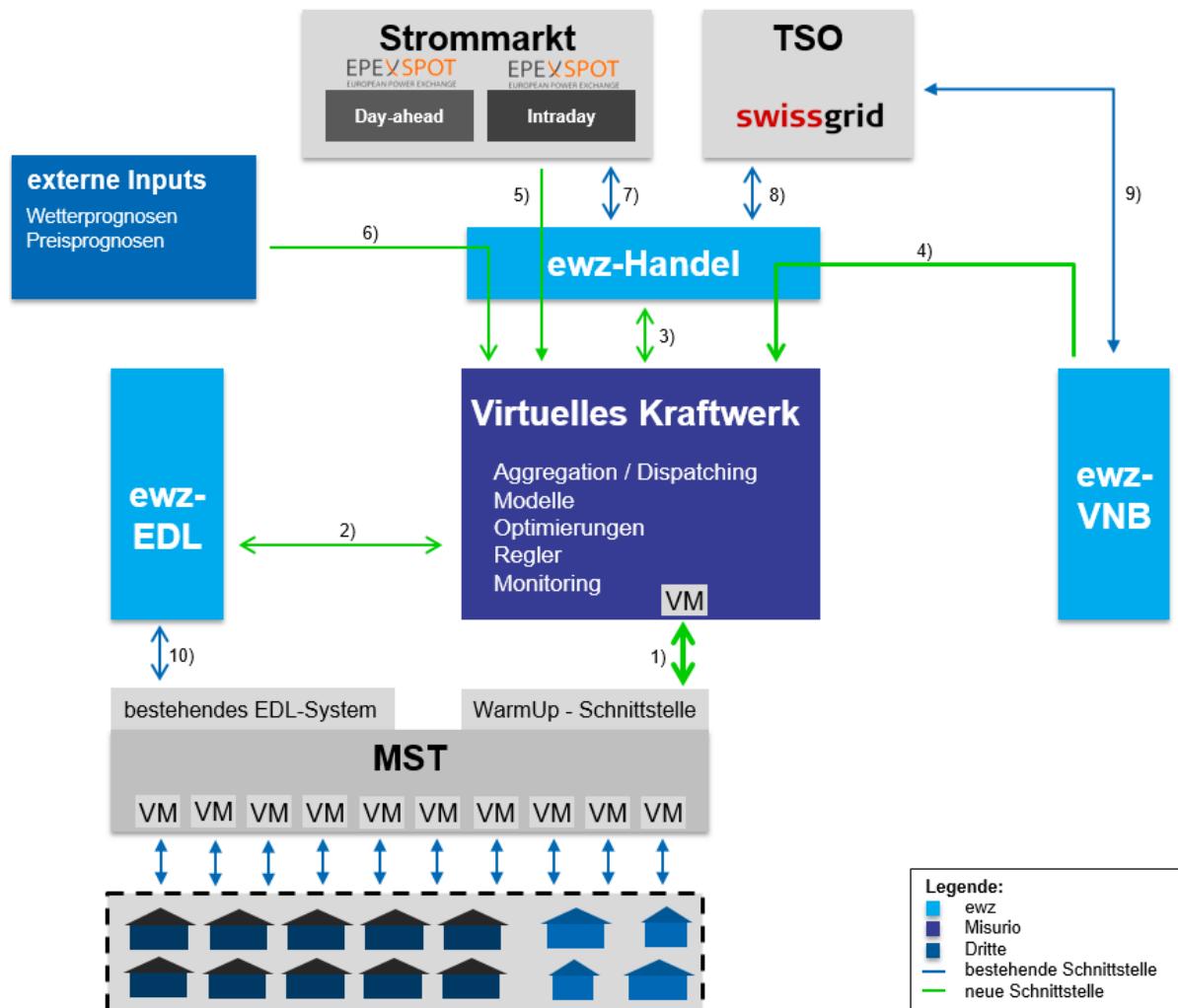


Abbildung 28: Übersicht der Schnittstellen im WarmUp-Projekt. Grün sind jene Schnittstellen, die neu dazugekommen sind

### 6.2.1 Schnittstelle MST <→ Misurio (1)

Die Schnittstelle zwischen der Firma MST, dem Lieferanten des Gebäudeleitsystems und dem virtuellen Kraftwerk von Misurio (im Folgenden Misurio) wurde neu erstellt. Hauptzweck dieser Schnittstelle ist der Austausch von Messdaten und Sollwerten. Hierfür wurde eine REST-Schnittstelle entwickelt. Die Schnittstelle ist sehr performant und kann eine Vielzahl von Datenpunkten in kurzer Zeit übertragen. Pro Datenpunkt dauert eine Anfrage etwa eine Millisekunde.

### 6.2.2 Schnittstelle Misurio <→ ewz-EDL (2)

Die Schnittstelle zwischen ewz-EDL und Misurio wurde als Webapplikation ausgeführt. Die Webapplikation von Misurio wurde im bisherigen Anlagenportal verlinkt. Die Webapplikation wird in Abschnitt 6.3.3 beschrieben. Der Kunde hat durch die Webapplikation die Möglichkeit, das WarmUp-System zu überwachen. Dazu zählen einerseits das Anpassen der Randbedingungen (vor allem Temperaturgrenzen), das Nachvollziehen der Entscheidungen, das Visualisieren der Prognosen und Charts mit



historischen Verläufen. Andere Abteilungen von ewz werden ebenfalls Zugriff auf diese Webapplikation haben, wobei die verschiedenen Benutzerrollen und Rechte genau definiert sind.

### 6.2.3 Schnittstelle Misurio <-> ewz-Handel (3)

Als Schnittstelle zwischen dem Handel und dem WarmUp-Systems dient einerseits die Webapplikation und andererseits ein File-basierter Austausch via FTP. Die Schnittstellen 4) und 6) tauschen Prognosen vom Netz, dem Wetter sowie den Strompreisen ebenfalls über diese Schnittstelle aus.

### 6.2.4 Schnittstelle Misurio <-> EPEX Spot (5)

Die Handelsvolumen des virtuellen Kraftwerks werden im Pilotprojekt, verglichen mit den bisherigen Volumina der Wasserkraft, äußerst bescheiden sein. Insofern ist es wichtig, dass die Aufwände für den Betrieb möglichst tief gehalten werden. Gemeinsam wurde entschieden, eine API zur EPEX Spot zu entwickeln. Dank dieser Schnittstelle ist es möglich, das aktuelle Orderbook von der Börse zu verarbeiten und eigene Orders zu platzieren.

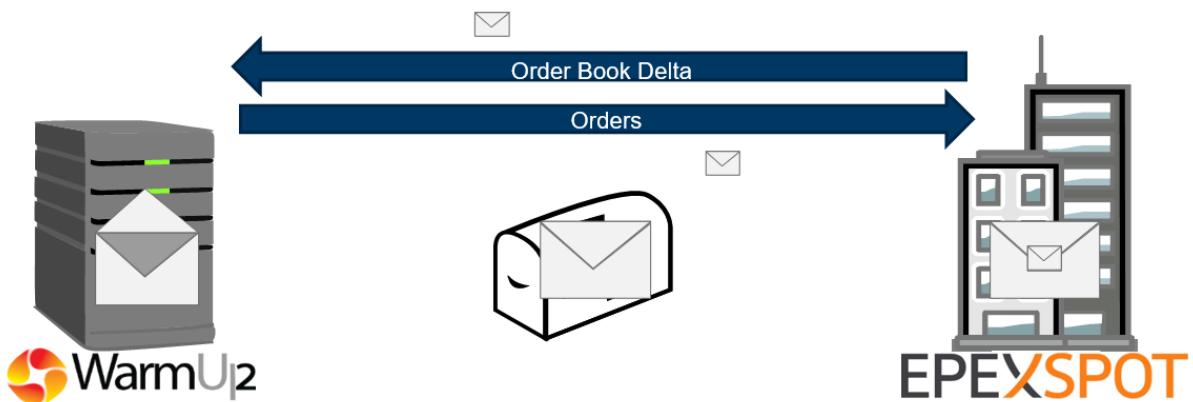
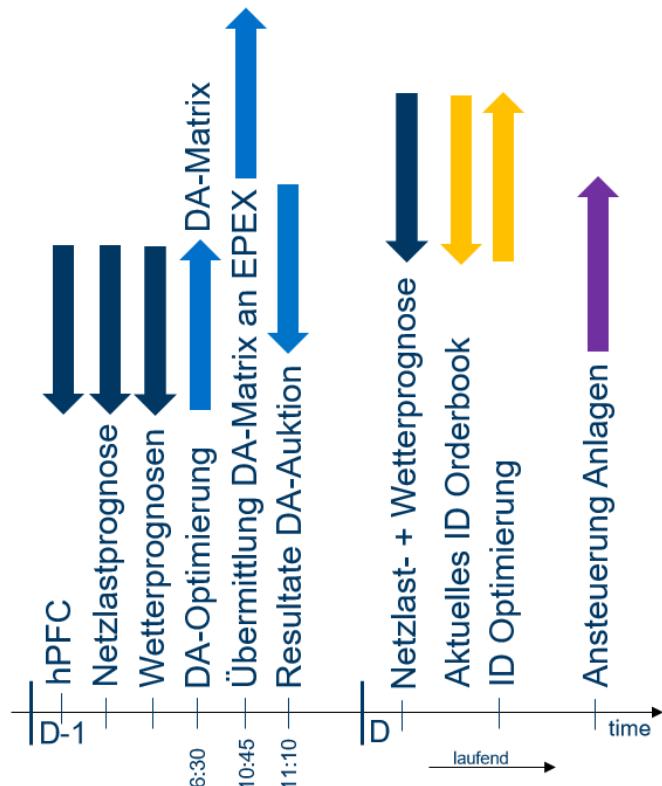


Abbildung 29: Im WarmUp Projekt wurde auch eine Schnittstelle zur Strombörse EPEX Spot entwickelt.

## 6.3 AP3 - Optimierung und Monitoring

### 6.3.1 Geschäftsprozesse

Abbildung 30 zeigt die zeitliche Abfolge der Prozesse vom Eingang der Prognosen bis hin zur Sollwert-Übersteuerung der Anlagen. Jeder dieser Prozesse besteht unter Umständen aus zahlreichen Unterprozessen. Damit die Prozesse automatisch gesteuert und überwacht werden können, wurde ein auf Geschäftsprozess-Modellierung spezialisiertes Tool in WarmUp integriert. Dank dieses Tools konnten sämtliche Geschäftsprozesse in einer graphischen Oberfläche modelliert werden. Anschließend stellt dieses Tool sicher, dass die verschiedenen Prozesse getriggert und überwacht werden. Die Integration von neuen Prozessen kann nun einfach erledigt werden.



**Abbildung 30: Zeitlicher Ablauf der Optimierungen in der Optimierungskaskade.**

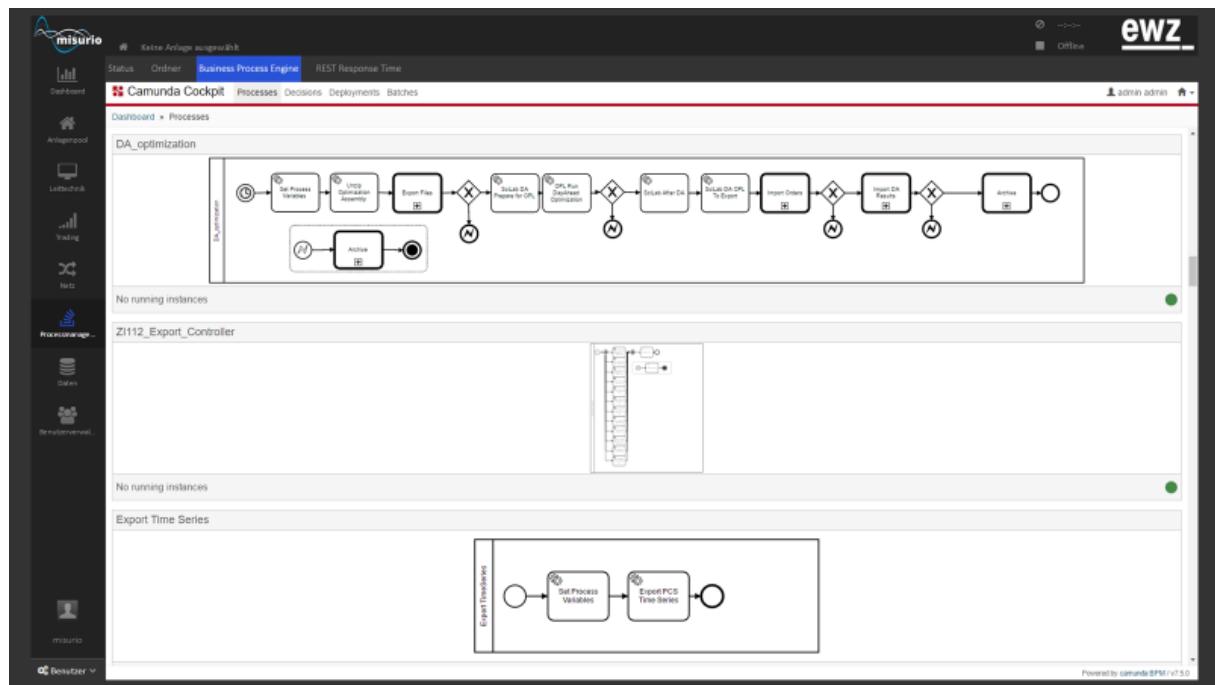


Abbildung 31: Modellierung von Geschäftsprozessen.



### 6.3.2 Optimierung

Die Optimierungskaskade aus WarmUp1 wurde weiterentwickelt. Neu hinzugekommen sind mittelfristige Zielpreisoptimierungen. In einem Zeithorizont von fünf Tagen werden optimale Zielzustände sowie Preise für die Abweichung ebendieser berechnet. Die Mittelfrist-Optimierung dient einer vorausschauenden Betriebsweise der Anlagen. Die Resultate werden als Soft Constraints in den Day-Ahead- und Intraday-Optimierungen verwendet.

Die Day-Ahead-Optimierung aus WarmUp1 wurde überarbeitet. Es wurden zahlreiche neue Soft Constraints ergänzt. Die Intraday-Optimierung wurde ebenfalls überarbeitet. Komplett neu erstellt wurde die kurzfristige Einsatzplanung. Dieses Element fehlte in WarmUp1. In der kurzfristigen Einsatzplanung werden aus den elektrischen Fahrplänen thermische Sollwerte generiert, sowie die kritischen Zustände überwacht.

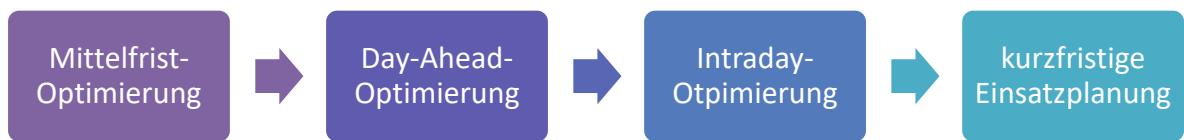


Abbildung 32: Abfolge der Optimierungen in WarmUp2.

### 6.3.3 Webapplikation

Die Webapplikation ist die zentrale Schnittstelle von WarmUp. Primär dient die Webapplikation dem Monitoring der Optimierungskaskade. Dabei werden die Entscheidungen der Optimierungen sowie die Entscheidungsgrundlagen grafisch dargestellt. Es wurden unterschiedliche Benutzergruppen definiert. In jeder Benutzergruppe können unterschiedliche Rechte vergeben werden. Nachfolgend werden einige Printscreens der Webapplikation präsentiert und kurz beschrieben.

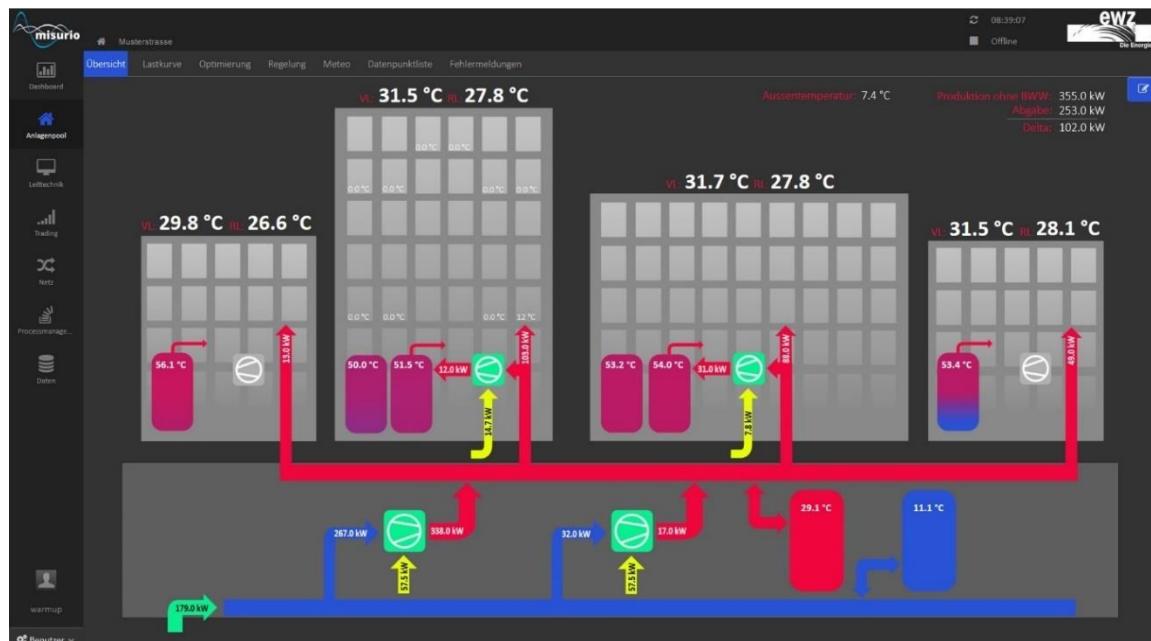


Abbildung 33: Anlagenübersicht mit Visualisierung der Energieflüsse.

Die Abbildung 33 zeigt die Anlagenübersicht in der Webapplikation. Die verschiedenen Energieflüsse sind visualisiert. Ebenso lassen sich sofort alle relevanten Zustände erkennen. Am Beispiel lässt sich erkennen, dass der Boiler in Haus 4 eine gute Schichtung hat, während die anderen durchmischt sind. Berechtigte Benutzer können in den Editor-Modus wechseln und beim Klick auf einzelne Objekte deren Parameter verändern.

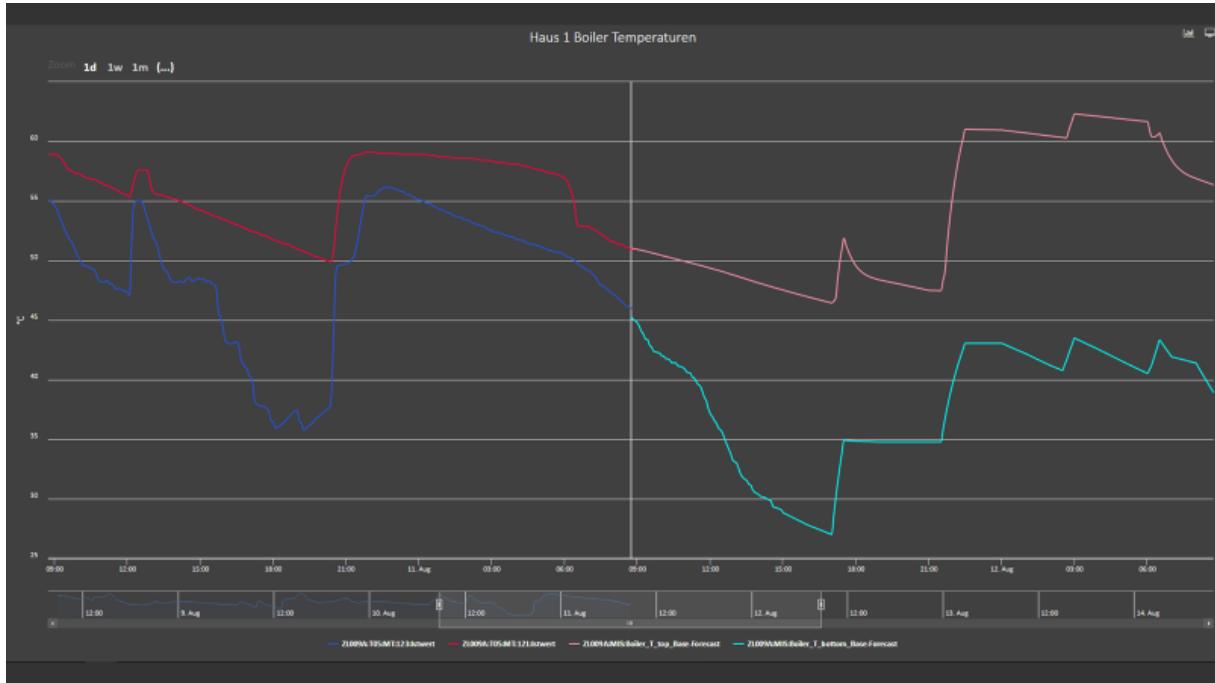


Abbildung 34: Visualisierung der Boiler-Temperaturen für die Vergangenheit und die nahe Zukunft.

In der Abbildung 34 sind Boiler-Temperaturen visualisiert. Der weisse Strich entspricht dem aktuellen Zeitpunkt. Links davon sind historische Messwerte und rechts davon Prognosen für die nahe Zukunft. Dank der Modellierung des Systems ist das Verhalten in naher Zukunft bekannt. Einerseits kann das Energiemanagement-System rechtzeitig erkennen, wenn in Zukunft ein Problem entstehen könnte und kann darauf präventiv reagieren. Andererseits sieht der Benutzer der Webapplikation, wie sich das System in Zukunft verhalten wird.

Abbildung 35 zeigt eine Visualisierung der Brauchwarmwasserprognose. Basierend auf den Messdaten der letzten 20 Wochen werden täglich neue Brauchwarmwasserprognosen erstellt. Der Bedarf an Brauchwarmwasser wird anhand der Temperaturen in den Boilern berechnet. Bei grossen Anlagen kann der Warmwasserbedarf gut vorhergesagt werden. Obwohl der individuelle Bedarf einer grossen Stochastik unterliegt, ist der Bedarf für das Gebäude insgesamt aufgrund von Verschachtelungseffekten gut prognostizierbar. Die weissen Linien in Abbildung 35 sind historische Messdaten. Man erkennt, dass der Unsicherheitsbereich relativ klein ist. Die roten Linien sind die aktuellen Prognosen. Neuere Messwerte erhalten ein grösseres Gewicht in den Prognosen.

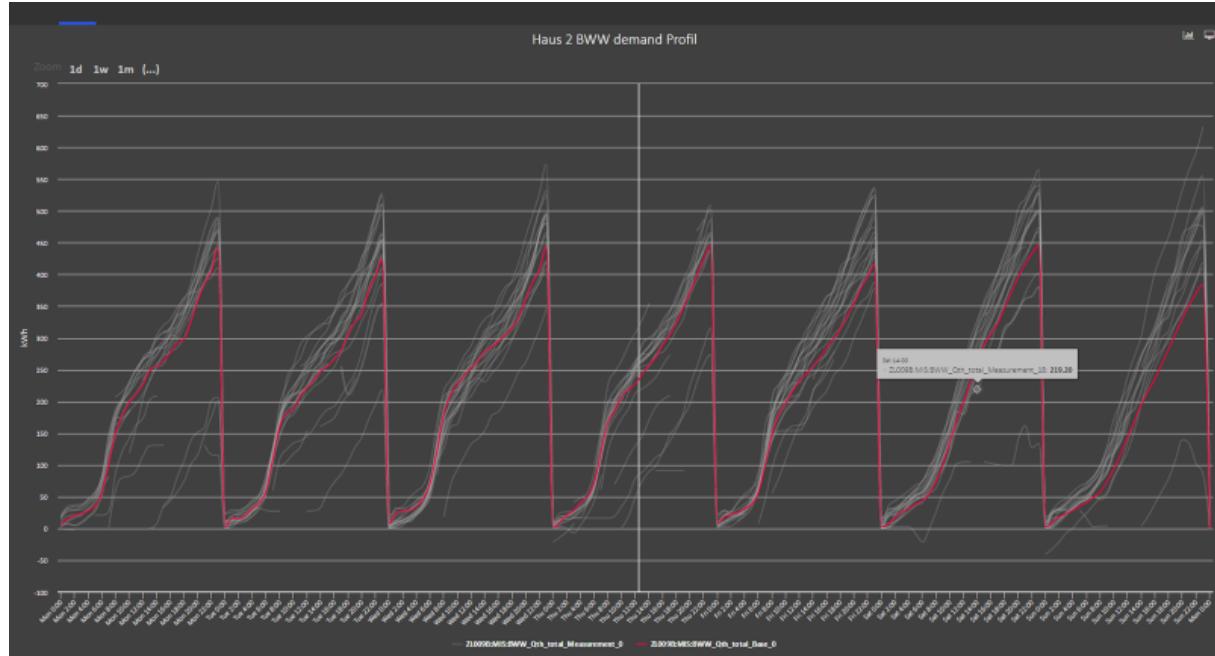


Abbildung 35: Visualisierung der Brauchwarmwasserprognose.

In der Abbildung 36 ist in der Mitte der aktuelle Zeitpunkt mit einer weißen Linie dargestellt. Links davon sind wiederum die Messdaten und rechts die Prognosen mit dem Unsicherheitsbereich dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das Integral gelegentlich abnimmt (siehe rote Linie). Dies liegt an der Diskretisierung der Schichten im Boiler entsprechend der kleinen Zahl an Sensoren und nicht linearen Effekten im Boiler bei grösseren Flussänderungen. Bei der Prognoseerstellung werden solche Effekte rausgefiltert.



Abbildung 36: Visualisierung des Brauchwarmwasserbedarfs in den vergangenen Stunden sowie der Zukunft.

Die Abbildung 37 zeigt die Visualisierung von Wetterprognosen. Einerseits werden Prognosen für die Außentemperatur und andererseits Prognosen der Globalstrahlung bezogen und in der Optimierung verwendet. Die Visualisierung zeigt, dass die Prognosen (rot) und die tatsächlich gemessenen Temperaturen (grün) in den meisten Fällen sehr gut übereinstimmen.



Abbildung 37: Visualisierung von Wetterprognosen.

In der Abbildung 38 sind die thermischen Energieflüsse in und aus dem Gebäude dargestellt. Die dunkelblauen Flächen entsprechen den internen Gewinnen, die gelben den solaren Gewinnen und die rosafarbene Fläche der zugeführten Heizleistung. Die grüne Fläche wiederspiegelt die Transmissionsverluste und die hellblauen Flächen sind der Wärmeentzug durch Kühlung. Als Quelle für die Brauchwasser-Wärmepumpe dienen die TABS in den Wohnungen, wodurch es auch im Winter zu kurzen Kühlungsphasen kommen kann, wenn die Boiler nicht gleichzeitig geladen werden, wie die Heizung läuft.

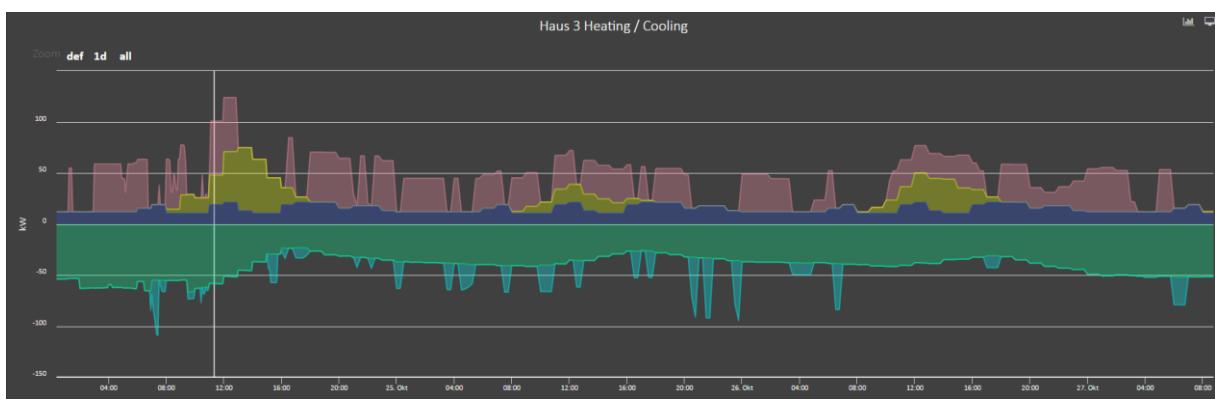


Abbildung 38: Visualisierung der Energieflüsse in und aus dem Gebäude.

Abbildung 39 zeigt historische Messungen für die Rücklauftemperatur (grün). Durch Klicken auf den Chart können die Grenzen für die minimale (blau) und maximale (rot) Rücklauftemperatur definiert



werden. Diese Grenzen fliessen in die Optimierung ein. Es ist möglich, die Grenzen strenger zu definieren, als der historische Betrieb war. Insofern können einzelne Ausreisser der Messdaten ausserhalb des aktuellen Toleranzbereiches sein.



Abbildung 39: Visualisierung der historischen Messdaten und der eingestellten Temperaturgrenzen.

In der Abbildung 40 ist die minimale und maximale tägliche Heizenergie dargestellt. Der Bereich dazwischen stellt die tägliche Flexibilität dar. Mit Berücksichtigung der Limitierungen der Wärmeabgabe verwertet die Optimierung diese Flexibilität. Die Grenzen können anhand von historischen Daten und der Prognose der Aussentemperatur berechnet werden.

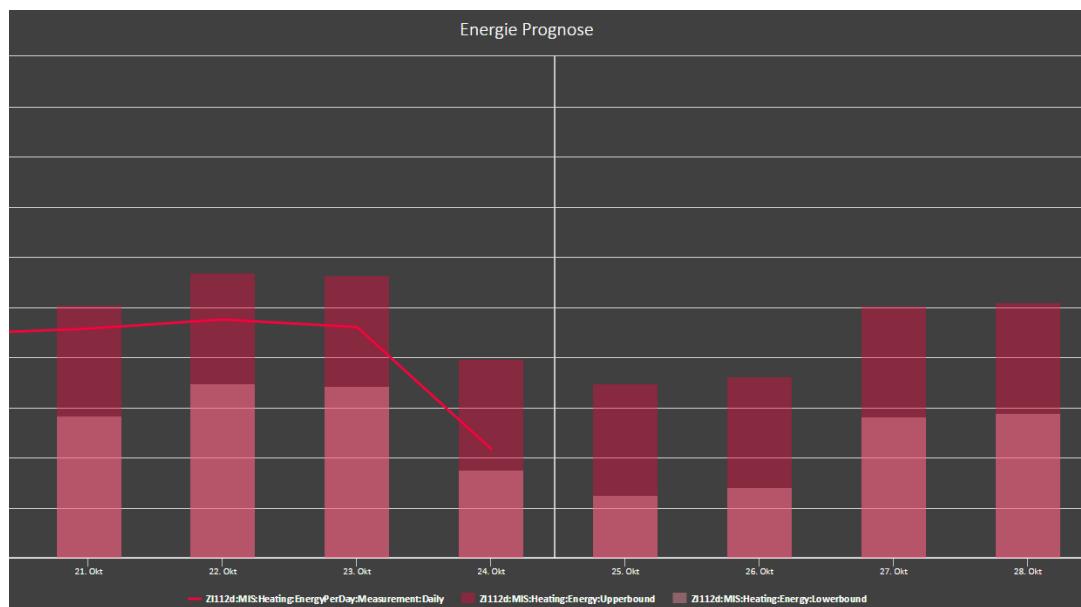


Abbildung 40: Grafische Darstellung der minimalen und maximalen täglichen Heizenergie. Der Bereich dazwischen (dunkelrot) wiederspiegelt die Flexibilität auf Tagesbasis.

Abbildung 41 zeigt die Visualisierung der Inputs und Outputs der Netznutzungskosten-Prognose. Als Inputs dienen die Prognose der Netzlast (gelb), der bisherige Monatspeak (grün) sowie der historische Monatspeak (hellrosa). Obwohl die Prognosen mit den tatsächlichen Messdaten gut zu überstimmen scheinen, waren diese in den entscheidenden Zeitpunkten zu ungenau. Zum Zeitpunkt des tatsächlichen Monatspeak wurden keine Netznutzungskosten prognostiziert. Dies wird man durch ein Nachjustieren des Grenzwertes verbessern müssen.



Abbildung 41: Visualisierung der Netzdaten. Oben sind die bisherigen Messdaten sowie die Prognosen einander gegenübergestellt. Unten sind die prognostizierten Netznutzungskosten dargestellt.

Die Abbildung 42 zeigt eine Übersicht der Marktdaten, die man via EPEX-API erhält. Zu jedem gehandelten Produkt werden die Daten des Orderbuchs (siehe Abbildung 43) sowie der aktuelle Stand der zuletzt getätigten Deals geliefert. Diese Informationen fliessen in die Intraday-Optimierung ein. Anhand von Marktbewegungen und dem aktuellen Zustand der Anlagen generiert die Optimierung automatisch neue Deals, die an die Börse übermittelt werden können.

Short Name	Area	High Price	Low Price	Last Price	Price Direction	Spread	Buy Price	Sell Price	Buy Order Quantity	Sell Order Quantity	Total Order Count	Buy Order Count	Sell Order Count	Details
13Q4	CH					10.50 €	16.00 €	26.50 €	961.1 MW	734.9 MW	52	20	32	<a href="#">Details</a>
14-15	CH	26.40 €	20.00 €	23.40 €	▼	0.30 €	23.40 €	23.70 €	1954.5 MW	1752.6 MW	79	35	44	<a href="#">Details</a>
14Q1	CH					9.30 €	15.20 €	24.50 €	1012.7 MW	923.7 MW	49	24	25	<a href="#">Details</a>
14Q2	CH					9.80 €	15.20 €	25.00 €	957.8 MW	966.8 MW	48	22	26	<a href="#">Details</a>
14Q3	CH					11.80 €	25.50 €	37.30 €	971.7 MW	997.1 MW	52	24	28	<a href="#">Details</a>
14Q4	CH					11.70 €	25.30 €	37.00 €	970.5 MW	1010.7 MW	52	23	29	<a href="#">Details</a>
15-16	CH	26.00 €	23.30 €	23.30 €	▼	0.10 €	23.30 €	23.40 €	1935.5 MW	2126.5 MW	85	36	49	<a href="#">Details</a>
15Q1	CH					9.60 €	16.00 €	25.60 €	986.5 MW	947.3 MW	49	25	24	<a href="#">Details</a>
15Q2	CH					0.60 €	25.00 €	25.60 €	957.3 MW	947.5 MW	47	22	25	<a href="#">Details</a>
15Q3	CH					21.40 €	15.60 €	37.00 €	940.3 MW	963.3 MW	47	19	28	<a href="#">Details</a>
15Q4	CH					6.40 €	25.60 €	32.00 €	992.3 MW	984.4 MW	53	23	30	<a href="#">Details</a>
16-00	CH					7.20 €	24.40 €	31.60 €	200.0 MW	225.0 MW	5	2	3	<a href="#">Details</a>
16-17	CH	24.10 €	23.80 €	23.80 €	▼	0.90 €	23.80 €	24.70 €	1930.3 MW	1998.3 MW	78	37	41	<a href="#">Details</a>
16Q1	CH					5.80 €	19.90 €	25.70 €	1004.9 MW	955.1 MW	48	25	23	<a href="#">Details</a>
16Q2	CH					4.70 €	21.00 €	25.70 €	948.1 MW	948.7 MW	47	22	25	<a href="#">Details</a>
16Q3	CH					16.10 €	15.70 €	31.80 €	963.3 MW	977.9 MW	47	20	27	<a href="#">Details</a>
16Q4	CH					11.10 €	25.90 €	37.00 €	1006.1 MW	968.3 MW	50	24	26	<a href="#">Details</a>

Abbildung 42: Auflistung der Marktdaten aus der EPEX API.

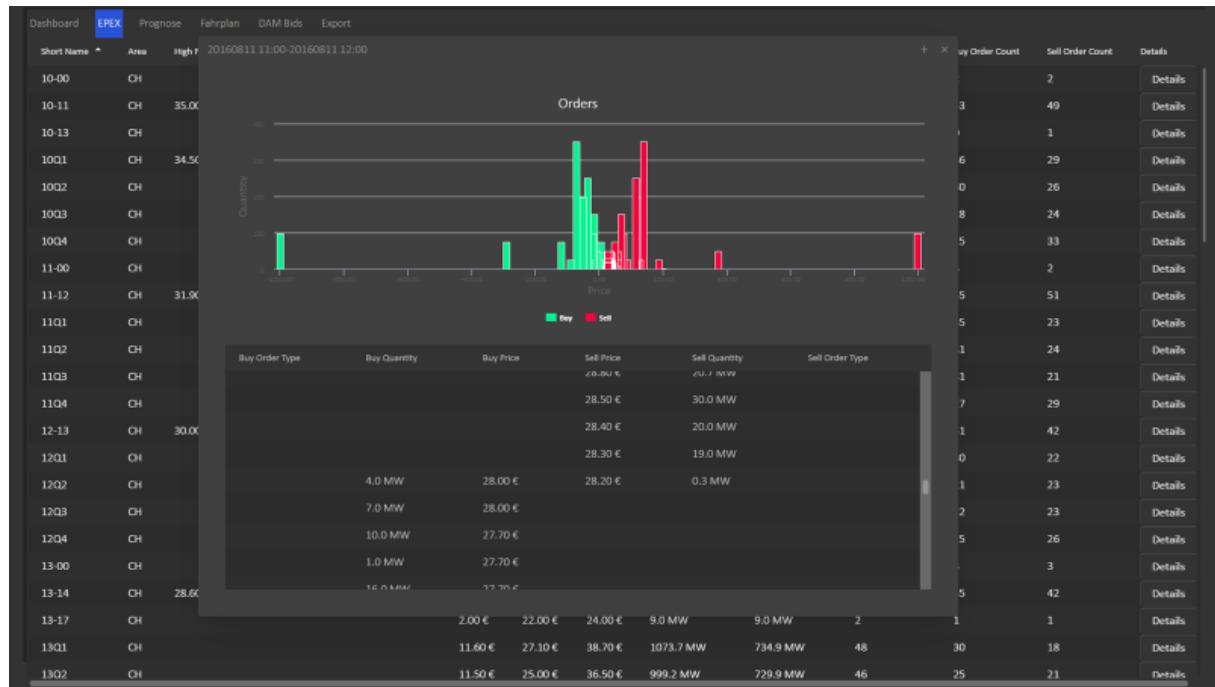


Abbildung 43: Visualisierung eines Orderbooks.

## 6.4 AP4 - Test und Inbetriebnahme

Das Arbeitspaket 4 umfasst die ersten Tests der Anbindung an die bestehende Gebäudeautomation sowie die Inbetriebnahme der Pilotanlage. Die Tests und die Inbetriebnahme der Pilotanlage wurden abgeschlossen. Abbildung 44 zeigt eine Auswertung eines Tests während 29 Stunden im WarmUp-Modus auf der Pilotanlage. Der weiss hinterlegte Bereich ist jene Zeit, in der WarmUp aktiv war. Gelb ist der Fahrplan (Soll) und rot ist die tatsächliche Leistung (Ist). Es ist zu erkennen, dass der WarmUp-Modus gut funktioniert. Die Fahrpläne und die tatsächliche Leistung stimmen sehr gut überein. Während der Testphase gab es keinerlei Verletzungen von Randbedingungen. In den nächsten Monaten wird es darum gehen, möglichst immer online zu sein und einen stabilen Betrieb über längere Zeiten nachzuweisen.

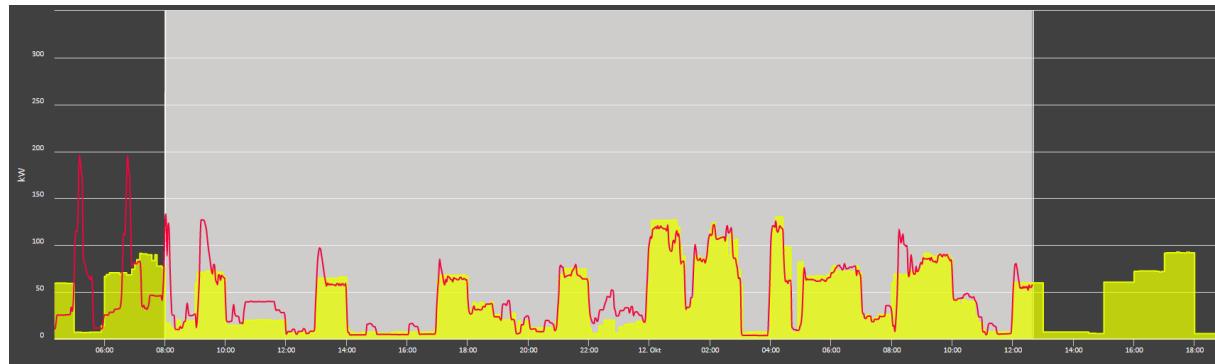


Abbildung 44: Test des WarmUp-Systems während 29 Stunden auf der Pilotanlage. Der weiss hinterlegte Bereich ist jene Zeit, in der WarmUp aktiv war. Gelb ist der Fahrplan (Soll) und rot ist die tatsächliche Leistung (Ist).

## 6.5 AP5 – Erfolgskontrolle

In Arbeitspaket 5 soll der Mehrwert von WarmUp quantifiziert werden. Die Resultate bilden Grundlagen zur Erarbeitung von neuen Dienstleistungen und Tarifen. Abbildung 45 zeigt an einem konkreten Beispiel, wie das Lastmanagement funktioniert. Die weiss hinterlegte Fläche zeigt wiederum die Zeit, in der WarmUp aktiv war. Während der inaktiven Zeit (01:00 – 06:45) lässt sich der tatsächliche Strombedarf mit dem geplanten Fahrplan vergleichen, um festzustellen, was WarmUp in dieser Zeit gemacht hätte. Man kann erkennen, dass ein Teil der Last von 02:00 – 04:00 Uhr vor auf 01:00 Uhr verschoben worden wäre. Ein anderer Teil wäre nach hinten auf etwa 05:30 Uhr verschoben worden.

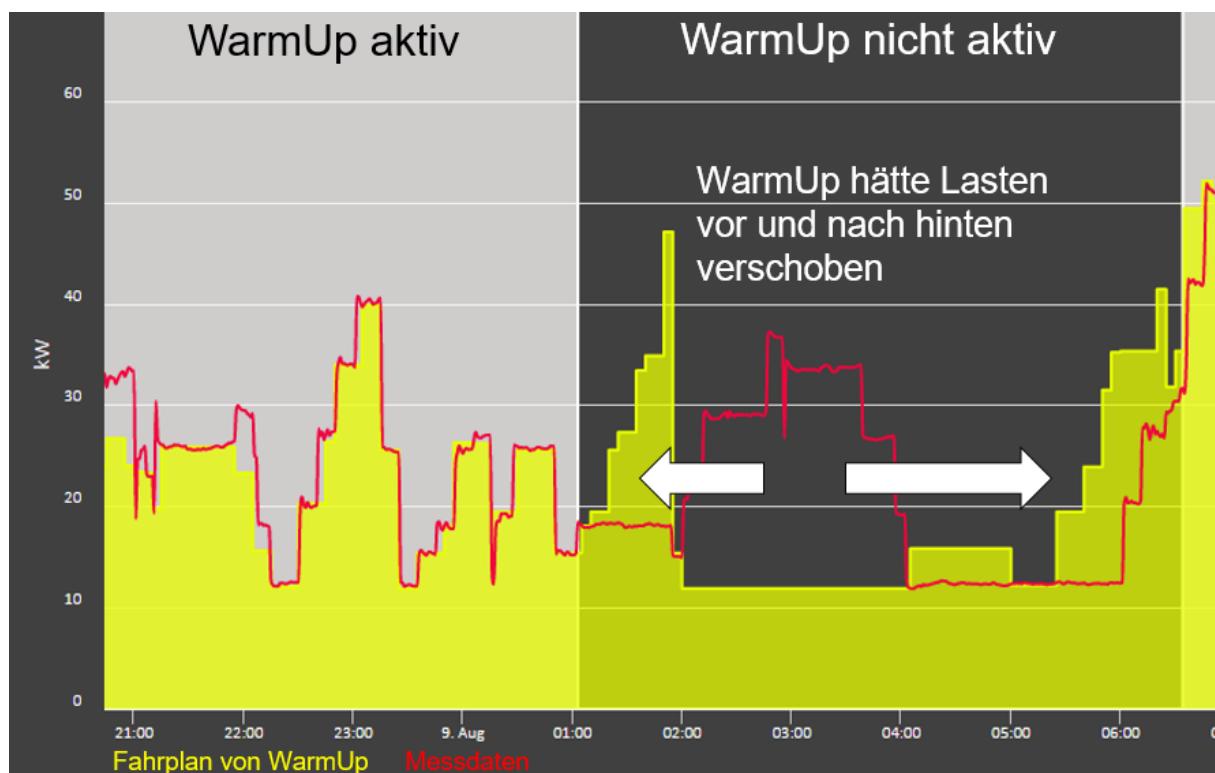


Abbildung 45: Die Idee des Lastmanagements an einem konkreten Beispiel visualisiert. WarmUp hätte einen Teil der Last vor- und einen Teil nach hinten verschoben.

In Zeiten, wo WarmUp aktiv ist, ist es schwieriger, einen Vergleich mit dem klassischen Betrieb durchzuführen. Theoretisch könnte man den klassischen Betrieb modellieren und simulieren. Da dies aber erstens aufwendig, zweitens nur ein theoretischer Vergleich ist und drittens keinen Mehrwert in sich birgt, wurde darauf verzichtet. Man hat sich entschieden, einen Vergleich anhand von Key Performance Indikatoren mit historischen Daten durchzuführen. Schwierigkeit hierbei ist es, dass der Einfluss des Wetters aus den Daten bereinigt werden muss. In kalten Wintern ist wesentlich mehr Heizwärme und zudem höhere Vorlauftemperaturen notwendig, um den Komfort gewährleisten zu können. Diese beiden Effekte müssen korrigiert werden, damit Verbrauchsdaten aus unterschiedlichen Jahren miteinander verglichen werden können.



### 6.5.1 KPI

Nachfolgend werden die relevanten Key Performance Indikatoren (KPIs) erläutert. Grundsätzlich gibt es vier Dimensionen, an denen der Erfolg von WarmUp gemessen werden kann: Kosten, Effizienz, Ökologie und Komfort. Letzteres ist schwierig zu quantifizieren. Man könnte die Raumtemperaturen mit den Komfortvorgaben vergleichen und die Abweichungen mit der Dauer multiplizieren und aufsummieren. Daraus ließe sich ein Vergleich mit historischen Daten anstellen, sofern die Raumtemperaturen gemessen wurden. Weil in der Pilotanlage keine Raumtemperatur-Messungen durchgeführt werden, kann die Dimension Komfort nicht quantifiziert werden und wird nachfolgend nicht weiter betrachtet. Bei den anderen drei Dimensionen wurden nachfolgende KPIs definiert:

#### Kosten

- Energietarife aus Sicht ewz
- Netznutzungskosten aus Sicht ewz
- Stromtarife aus Kundensicht

#### Effizienz

- ETV: Wie viel Strom ist notwendig, um 1 kWh Wärme zu erzeugen (inkl. aller Hilfsbetriebe)?
- COP: Leistungszahl pro Wärmepumpe
- JAZ: Arbeitszahl pro Wärmepumpe
- Wie viel Wärme muss pro Heizgradtag produziert werden?

#### Ökologie

- CO<sub>2</sub>-freier Deckungsgrad bei bivalenten Anlagen

Bei der Berechnung der Stromkosten wird zwischen der Sichtweise von ewz und der Kundensicht unterschieden. Aus Sicht ewz werden die Energiekosten aus dem Verbrauchsprofil der Pilotanlage multipliziert mit den Börsenpreisen berechnet. Für die Netznutzungskosten wird die Last der Pilotanlage während dem Zeitpunkt des Monatspeaks mit dem Netztarif von Swissgrid verrechnet. Aus Sicht der Endkunden wird der Stromtarif aus Hoch- und Niedertarif für die Energie und das Netz und den Abgaben berechnet. Die Abbildung 46 und die Abbildung 47 zeigen diesen Sachverhalt grafisch. Damit unterschiedliche Jahre miteinander verglichen werden können, müssen die jährlichen Durchschnittspreise der einzelnen Komponenten indexiert werden.

Bei der Berechnung der Effizienz geht es vor allem um unterschiedliche Systemgrenzen. Man kann nur die Wärmepumpe alleine (COP) anschauen oder die Hilfsbetriebe (JAZ/ETV) mitberücksichtigen. Für einen Contractor ist letztlich entscheidend, wie viel er für den Strominput bezahlen muss, um die thermische Energie zu produzieren. Aufgrund dieser Fragestellung gilt es deshalb, sämtliche Hilfsbetriebe mit zu berücksichtigen.

Bei der Ökologie kann der CO<sub>2</sub>-freie Deckungsgrad mit und ohne WarmUp verglichen werden. Weil die Pilotanlage keine fossil betriebenen Heizkessel enthält und man sich bei diesen KPIs nur auf lokale Systemgrenzen konzentriert, wird auf diese Dimension vorerst verzichtet (Vermeidung von fossilen Regelkraftwerken wird beispielsweise nicht angerechnet). Bei einer nächsten Anlage wird diese Dimension auch optimiert werden können.

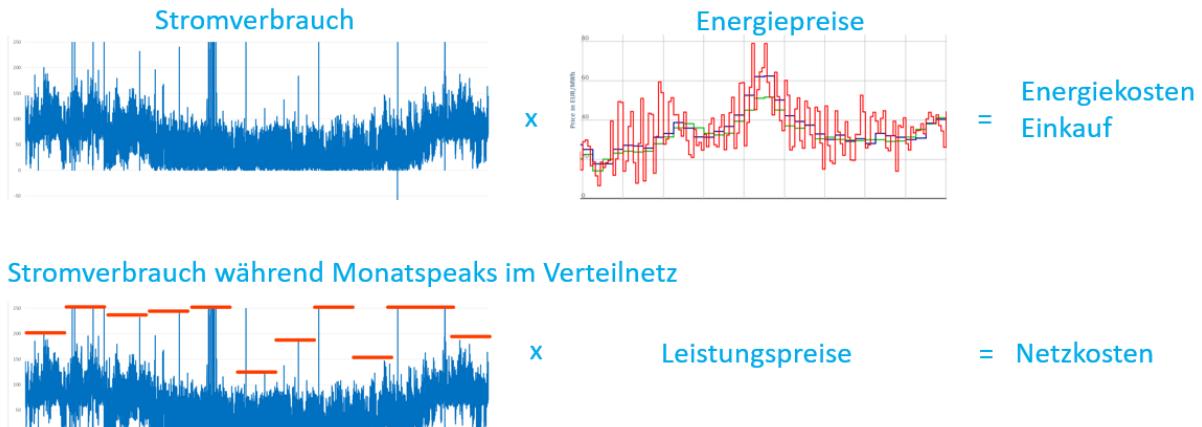


Abbildung 46: Berechnung der Energie- und Netznutzungskosten aus Sicht ewz.

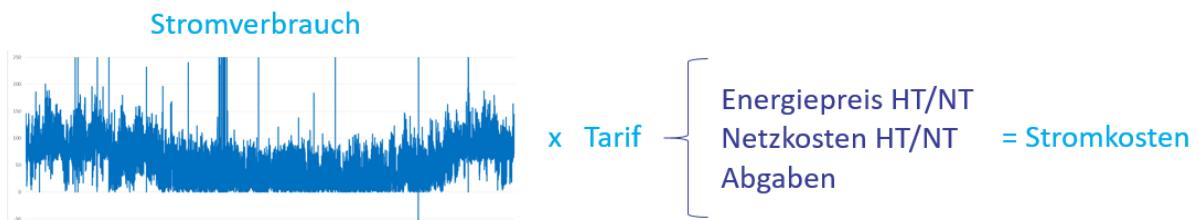


Abbildung 47: Berechnung der Stromkosten aus Kundensicht.

### 6.5.2 Qualitative Einschätzung des Potentials nach aktuellem Stand

Die Abbildung 48 zeigt eine qualitative Einschätzung des Potentials der verschiedenen Anwendungen nach aktuellem Wissensstand. Day-Ahead besteht ein gutes Potential. Dieses liegt vor allem darin, dass man die Boiler-Ladungen und die Heizphasen auf Zeiten niedriger Energiepreise schiebt. Die Abwicklung geschieht durch eine tägliche Übermittlung einer Gebots-Matrix und ist somit einfach realisierbar.

Während in WarmUp1 der Intraday-Day Markt noch das grösste Potential aufwies, hat der Intraday-Markt aktuell etwas an Attraktivität verloren. Hauptgrund hierfür ist die Einführung einer Nachmittagsauktion mit Viertelstundenkontrakten im Deutschen Marktgebiet. Dies hat zur Folge, dass ein grosser Teil der Vermarktungsfehler der PV-Produktion aus der Morgenauktion nachmittags ausgeglichen werden kann und somit nicht mehr im kontinuierlichen Intraday-Markt vermarktet werden. Das Volumen an Viertelstundenkontrakten im kontinuierlichen Markt hat deshalb abgenommen. Aktuell haben Schweizer Akteure keinen Zugang zur Nachmittagsauktion. Aufgrund bescheidener PV-Produktion in der Schweiz ist das Bedürfnis noch zu wenig gross. Dies ist vor allem deshalb schade, weil thermische Speicher im Viertelstunden-Bereich sehr viel Flexibilität anbieten könnten. Trotzdem ist davon auszugehen, dass der viertelstündliche Markt zukünftig wieder attraktiver werden dürfte. Einer-



seits werden Fahrplanabweichungen vermehrt kurzfristig am Markt ausgeglichen, anstatt Ausgleichsenergie zu beziehen und andererseits dürfte das Trading im Energiesektor, analog zu jenem in der Finanzbranche, zunehmend automatisiert werden, so dass auch kleinere Kontrakte gehandelt werden können. Aufgrund des personellen Aufwandes sind kleine Kontrakte heute meist nicht interessant und werden selten gehandelt.

Je grösser ein Pool an Lasten ist, desto mehr profitiert dieser von Verschachtelungseffekten, wodurch die Ausgleichsenergie relativ zur installierten Leistung kleiner ausfällt als bei einzelnen Anlagen. Aufgrund der Tatsache, dass vorerst nur eine Anlage mit 4 Gebäuden eingebunden ist, gibt es vorerst keine Verschachtelungseffekte und folglich ist der Impact auf die Ausgleichsenergie negativ. Bei grösseren Anlagepools besteht das Potential zur Reduktion von Ausgleichsenergie weiterhin. Allerdings muss man hier festhalten, dass im Versorgungsgebiet von ewz die Ausgleichsenergie mit nur etwa 3 % (energetisch) praktisch keinen Einfluss auf das Business hat.

Bei Tertiärregelleistung sind die Preise komplett eingebrochen. Insofern lohnt sich eine Teilnahme zurzeit nicht. Sollte sich dies zu einem späteren Zeitpunkt wieder ändern, kann diese Anwendung in Betracht gezogen werden. Allerdings gibt es zurzeit keine Anzeichen hierfür.

Bei den Netznutzungskosten besteht ein gutes Potential zur Kostenreduktion. Einerseits sind die Netznutzungskosten in den vergangenen Jahren kontinuierlich gestiegen und andererseits steht aufgrund des Verzichts auf Regelleistung mehr Flexibilität für die Reduktion der Netznutzungskosten zur Verfügung.

Das Potential für die Nutzung von Synergien mit anderen Energieträgern wird neutral bewertet. Einerseits bestehen ökonomische Vorteile aufgrund der aktuell sehr tiefen Preise für fossile Energieträger und CO<sub>2</sub>-Zertifikate. Andererseits widersprechen sich ökonomische und ökologische Ziele.

Für alle Anwendungen gilt, dass das Potential mit einem grösseren Pool tendenziell besser wird.

-  **Day-Ahead-Optimierung**  
einfache Abwicklung
-  **Intraday-Optimierung**  
Volatilität hat seit Einführung der Nachmittagsauktion in DE abgenommen
-  **Ausgleichsenergie reduzieren**  
kaum Verschachtelungseffekte bei kleinem Pool
-  **Tertiärregelleistung /-Energie**  
zu kleiner Pool, unattraktive Preise
-  **Netzkosten optimieren**  
Mittagspeaks können ziemlich gut umgangen werden
-  **Synergien mit anderen Energieträgern**  
gute Möglichkeit CO<sub>2</sub> Emissionen zu reduzieren

**Abbildung 48: Qualitative Bewertung der Anwendungen nach aktuellem Wissenstand.**



## 6.6 AP6 - Betriebsphase

Für die vorhergehend beschriebenen KPIs liegen noch keine Resultate vor. Im Rahmen des Folgeprojekts WarmUp3 ist geplant, vom 1.1.2017 – bis 31.12.2017 eine einjährige Betriebsphase im WarmUp-Betrieb durchzuführen. Anschliessend werden die KPIs für das Jahr 2017 berechnet und mit historischen Werten verglichen. Die Resultate werden im Q1/2018 publiziert.

Die Inbetriebnahme der Pilotanlage wurde abgeschlossen und die Anlage läuft so oft wie möglich im WarmUp-Betrieb. Die Fahrpläne und die tatsächliche Leistung stimmen sehr gut überein. In den nächsten Monaten wird es darum gehen, möglichst immer online zu sein und einen stabilen Betrieb über längere Zeiten nachzuweisen. Die aktuelle Herausforderung ist das Finetuning einzelner Parameter. Beispielsweise sind die Abschaltkriterien noch etwas zu streng definiert, so dass bereits bei kurzer Latenz fälschlicherweise ein Unterbruch detektiert wird, wodurch WarmUp automatisch abgeschaltet wird. Die Kunst liegt darin, eine kurze Latenz zu überbrücken und bei tatsächlichen Ausfällen möglichst rasch auszuschalten. Weil die beiden Ereignisse nicht zu unterscheiden sind, braucht es etwas Erfahrung, um die korrekten Parameter und Regeln zu definieren.

## 6.7 Zusammenfassung der durchgeführten Arbeiten

In WarmUp1 wurde ein Simulator für Potentialanalysen entwickelt. Basierend auf den Erkenntnissen aus der Phase 1 wurde in Phase 2 ein Online-System zur automatischen Near-Time-Optimierung aufgebaut. Die Anbindung an das Gebäudeleitsystem und der konkrete Eingriff in die Steuerung der Wärmepumpen ist weitaus anspruchsvoller als die Erstellung eines Simulators. Damit alle «Puzzle-Teilchen» zusammenpassen und das Gesamtsystem am Ende funktioniert, bedarf es vieler kleiner Zwischenschritte und viel Koordination. Ein grosser Anteil der Arbeiten ist einmaliger Aufwand und ist zukünftig nicht mehr notwendig, wenn weitere Anlagen ergänzt werden. Nachfolgend werden die durchgeführten Arbeiten in Kurzform wiedergegeben.

### 6.7.1 Gesamtkonzept

Der ganzheitliche Ansatz des Projekts hat zur Folge, dass bei der Projektabwicklung intern und extern viele verschiedene Abteilungen und Personen involviert sind. Um die verschiedenen Abhängigkeiten und Zuständigkeiten transparent darzustellen, wurde ein Gesamtkonzept erarbeitet. Im Gesamtkonzept wurden sämtliche Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Systemen spezifiziert. Neben dem Wissen um die beteiligten Akteure hilft dies auch bzgl. der effizienten Koordination von Aufträgen an externe Dienstleister.

### 6.7.2 Funktionsbeschrieb

Zusammen mit ewz wurde für die Pilotanlage ein ausführlicher Funktionsbeschrieb erarbeitet. Im Funktionsbeschrieb wird erläutert, an welcher Stelle konkret auf welche Art in das bisherige Regelsystem eingegriffen wird. Neben den Eingriffsmöglichkeiten wurden hier auch die Randbedingungen für die Optimierung quantitativ bestimmt. Nach einer internen Machbarkeitsanalyse durch ewz-Spezialisten wurde der Funktionsbeschrieb auch von externen Spezialisten begutachtet.

Die Pilotanlage gehört zum Pool der ewz-Contracting-Anlagen. Diese Anlagen verfügen bereits über eine Kommunikation zu einem Server und sind mit einem eigenen Gebäudeleitsystem ausgestattet. Das WarmUp-System von Misurio lässt sich an das bestehende System ankoppeln, so dass keine



neue Kommunikationsinfrastruktur notwendig ist. Die Einrichtung einer neuen Schnittstelle ist nur einmal notwendig und kann danach für weitere Anlagen verwendet werden. Zusammen mit dem bisherigen Lieferanten wurde die Schnittstelle spezifiziert und entwickelt.

### 6.7.3 Modelle der thermischen Speicher und Verbraucher

Eine der grossen Kernkomponenten dieses Projektes ist die Modellierung der Anlagen. Misurio hatte bereits viel Erfahrung aus der Phase 1 des Projekts. Zahlreiche Modelle wurden weiter verfeinert und bezüglich einer höheren Performance in der Optimierung verbessert.

Die Anlage war bereits vor dem Projekt mit vielen Sensoren ausgestattet. Dies bietet eine optimale Voraussetzung, um zahlreiche Analysen der bisherigen Betriebsweise durchzuführen und Optimierungspotentiale zu identifizieren. Misurio hat viel Zeit in die Analyse dieser Daten investiert. Zukünftig ist es denkbar, diese Analysen zu automatisieren. Ein Teil der Modelle ist bereits heute so programmiert, dass sie das Verhalten der Bewohner mitlernen. Beispielsweise adaptiert die Brauchwarmwasserprognose automatisch ein geändertes Nutzerverhalten.

Wie sich im Verlaufe des Projektes gezeigt hat, fehlten die zentralen Sensoren für die Erfassung der Speicherzustände. Dies hat die Identifikation der Modell-Parameter massiv erschwert und wesentlich aufwendiger gemacht, als ursprünglich gedacht. Während in der Anlage aus WarmUp1 diese Sensorik vorhanden war, fehlten diese nun in der Pilotanlage. Es wurde versucht, einzelne Raumtemperatursensoren nachzurüsten. Allerdings hat die Stärke des Funksignals nicht ausgereicht, um die dicken Wände zu durchdringen. Folglich mussten die Parameter aufwendig durch manuelle Iterationen erarbeitet, getestet und wiederum nachjustiert werden. Mittlerweile sind gute Resultate erzielt worden.

### 6.7.4 Installation Webserver

Das WarmUp-System läuft als Service auf einem Server und kommuniziert über Internet mit den Anlagen. Dazu wurde auf einer virtuellen Maschine in einem grossen Rechenzentrum ein Webserver installiert. Das Rechenzentrum verfügt über eine redundante Anbindung ans Internet und eine Notstromversorgung. Mittels Firewalls und Site-To-Site VPN-Verbindungen wird der Sicherheit Rechnung getragen.

Auf dem Webserver wurden mehrere Datenbanksysteme installiert. Bei den Datenbanken setzt Misurio auf die Erfahrung von IBM und hat entsprechende skalierbare Systeme lizenziert.

Trotz der Notstromversorgung ist es im Frühling 2016 zu einem Stromausfall im Rechenzentrum gekommen. Dabei wurden Teile der Hardware beschädigt. Der Ersatz dieser Hardware hat länger gedauert, als ursprünglich gedacht. Während der Zeit, bis die neue Hardware eingetroffen ist, war die verbleibende Hardware oft am Limit und die Performance liess zu wünschen übrig. Als Folge davon musste Mehraufwand geleistet werden, um Prozesse performanter zu machen, so dass die Tests fortgeführt werden konnten. Mittlerweile wurde die neue Hardware geliefert und installiert.

### 6.7.5 Webapplikation

Die Webapplikation ist die zentrale Schnittstelle im Projekt. In beinahe Echtzeit kann der Anlagezustand überwacht werden. Ansprechende grafische Visualisierungen vermitteln dem Betrachter in kür-



zester Zeit das notwendige Wissen über den Zustand der Anlage. Zudem ist ersichtlich, welche Entscheidungen die Optimierungen für die nächsten Stunden (bis zu 5 Tage) getroffen hat und auf welcher Basis diese beruhen.

### 6.7.6 Weiterentwicklung Optimierungen

Aufbauend auf den Arbeiten der Phase 1 des WarmUp-Projektes wurden die Optimierungen verfeinert und ergänzt. Als neue Optimierungen sind die Mittelfrist-Optimierung und die kurzfristige Einsatzoptimierung entwickelt worden. Erstere gewährleistet eine vorausschauende Betriebsweise über mehrere Tage und die Einsatzplanung optimiert kurzfristig die Anlage und berechnet aus den elektrischen Fahrplänen, thermische Sollwerte, die von der Anlage befolgt werden können. Im letzten Schritt sind sehr detaillierte Modelle notwendig, damit alle Gegebenheiten berücksichtigt werden können.

### 6.7.7 Nationale Zusammenarbeit

Das Projekt wird in enger Zusammenarbeit mit ewz durchgeführt. Die Spezialisten von ewz bringen mit ihrem Erfahrungsschatz viel Knowhow in das Projekt. Das Projekt profitiert stark von der Tatsache, dass ewz sowohl im Netz, im Wärme/Kälte-Contracting, wie auch im Handel seit vielen Jahren aktiv ist und viel Erfahrung aufgebaut hat. Ein gutes Zusammenspiel dieser Akteure ist auch ausserhalb der technischen Schnittstellen äusserst wertvoll.

In einzelnen Gebieten wurden bisherige Lieferanten und externe Spezialisten der Firmen MST Systemtechnik AG, Burkhalter Group, KWT Kälte-Wärmetechnik AG, Hoval AG und Boxler MSRL Engineering AG beigezogen.

Misurio verfügt über gute Kontakte zu Hochschulen in der Schweiz und ist in mehreren Projekten in Begleitgruppen vertreten.

### 6.7.8 Internationale Zusammenarbeit

Misurio beteiligt sich am europäischen FP7<sup>1</sup> Forschungsprojekt SEMIAH<sup>2</sup>. Am Projekt beteiligen sich insgesamt 12 Partner aus Norwegen, Dänemark, Deutschland und der Schweiz. SEMIAH dauert von 2014 bis 2016 und wird von der EU mit einem Betrag von 3.8 Mio. Euro unterstützt. Ähnlich wie im WarmUp2 Projekt handelt es sich um ein „Demand Response“-Projekt mit dem Ziel, die Flexibilität von Verbrauchern zu nutzen. Im Rahmen des Projekts wird ein kostengünstiges Smart Gateway für Haushalte entwickelt. Es werden Piloten in Norwegen und der Schweiz mit je 100 Haushalten installiert und in Betrieb genommen. Misurio wird im SEMIAH Projekt mit Simulationen mögliche Geschäftsmodelle evaluieren.

### 6.7.9 Externe Kommunikation

Das Projekt wurde in zahlreichen Präsentationen und Publikationen der Öffentlichkeit vorgestellt. Im Rahmen einer Medienmitteilung informierte ewz die Öffentlichkeit über den Start des Projektes. Diese wurde u.a. vom Tagesanzeiger und der NZZ aufgenommen. In einer Publikation in dem neu geschaffenen Magazin 50,2 wurde über das Projekt berichtet [7]. Das Magazin richtet sich an Akteure der

---

<sup>1</sup> FP7: Framework Programme 7

<sup>2</sup> SEMIAH: Scalable Energy Management for the Integration of households



Stromwirtschaft in der Region Deutschland-Österreich-Schweiz. ewz hat für interessierte Kunden einen Flyer mit Infos zum Projekt erstellt [8]. Zudem wurde das Projekt an verschiedenen Veranstaltungen präsentiert (z.B. Innovationsforum Energie, European Power Tagung, Energie-Apéro Schwyz, Smart Grids Week Graz, SCCER FEEB&D Midterm Session an der EMPA, Nationale PV-Tagung, BFE-Forschungstagung Flexibilität in Biel, Präsentation vor Fachgruppe im Projekt CombiVolt an der HSR Rapperswil).

## 7 Schlussfolgerungen

Thermische Speicher bieten ein attraktives Potential für Lastmanagement. Das Speichervermögen von Gebäuden und eine vorausschauende Betriebsweise versprechen einen grossen Nutzen für die dezentrale Speicherung von Energie. Thermische Speicher sind eine naheliegende Option, da diese bereits heute in einer grossen Anzahl vorhanden sind. Daneben wird es zukünftig auch andere Technologien, wie beispielsweise Batteriespeicher brauchen. Heute sind die thermischen Speicher in vielen Punkten im Vorteil gegenüber anderen Technologien. Je nach Preisentwicklung kann sich diese Bewertung zukünftig ändern. Lastmanagement an und für sich ist nichts Neues. Neu ist, dass die Preise nicht mehr per se während des Tages hoch und während der Nacht günstig sind. Aufgrund der zunehmenden Einspeisung von neuen Erneuerbaren Energien verändern sich die Preismuster am Strommarkt.

Flexibilität hat im Moment relativ wenig Wert. Dies vor allem deshalb, weil die Spreads an der Börse stark abgenommen haben. Die PV-Einspeisung hat die bisherigen Mittagsspitzen in den Spotpreisen wegradiert. Nimmt die PV-Einspeisung weiter zu, so wird man bald über Mittag günstigere Preise als in der Nacht haben. Damit wird der Spread wieder ansteigen. Hinzu kommt die Tatsache, dass mit zunehmender Einspeisung von wetterabhängiger Einspeisung auch die Rampen steiler werden. Ein weiterer interessanter Punkt wird der Ausstieg aus der Atomkraft sein. Der Strom in Zeiten ohne Einspeisung von erneuerbaren Energien könnte dadurch wesentlich teurer werden. Bereits heute sieht man beispielsweise an kalten Wintertagen mit wenig Windeinspeisung hohe Preise in den Abendstunden. Kommen hier irgendwann Elektroautos hinzu, welche alle am Abend nach der Arbeit angeschlossen und wieder aufgeladen werden wollen, so ist ein ausgeklügeltes Lastmanagement entscheidend.

Ein wichtiger Aspekt ist auch der Einfluss der vermehrt dezentralen Einspeisung (Netzebene 7). Die tieferen Netzebenen sind historisch nicht dafür ausgelegt worden. Grosse Einspeiseleistungen führen bereits heute zu notwendigen Netzverstärkungen. Kann dieser Ausbaubedarf mit Lastmanagement verringert oder zumindest zeitlich ausgezögert werden, profitieren alle davon. Da die Energie sowieso dezentral verbraucht wird, ist es zudem sinnvoll, diese auch dezentral speichern zu können und nicht über lange Distanzen zu transportieren. So wird der dezentrale Ausgleich eine weitere Möglichkeit darstellen, die Flexibilität von thermischen Speichern zu verwerten.

Das Effizienzstreben der Gebäudetechnik steht in gewisser Weise im Widerspruch zu den aktuellen Entwicklungen am Strommarkt, wo immer öfter Zeiten mit sehr niedrigen und teilweise sogar negativen Preisen auftreten. Zusätzlich wird beim Erbringen von Regelleistung primär ein übergeordnetes Ziel verfolgt (Stabilität des Netzes). Ertragsmöglichkeiten auf dem Markt können lokal einen Mehrverbrauch an Energie zur Folge haben. Sämtliche Verluste sind zustandsabhängig modelliert und werden in der Optimierung berücksichtigt. Die Zeiten mit negativen Strompreisen sind sehr rar. Insofern erhält die Effizienz in den meisten Zeiten weiterhin einen wichtigen Stellenwert, obgleich dieser in den letz-



ten Jahren aufgrund sinkender Energiepreise an Wert verloren hat. Im Zuge der Integration erneuerbarer Energien muss man sich sowieso daran gewöhnen, dass zukünftig das Paradigma gilt, die Energie dann zu nutzen, wenn sie vorhanden ist. Dies wird lokal nicht immer die grösste Energieeffizienz zur Folge haben. Ganzheitlich betrachtet ist es aber wesentlich sinnvoller, manchmal einen etwas schlechteren COP zu fahren, anstatt Solaranlagen abzuregeln und die Energie komplett zu verlieren.

Daneben dürfen auch die Bewohner der Liegenschaften nicht vergessen werden. Der Komfort steht an erster Stelle und muss auf jeden Fall gewährleistet bleiben. Dank der ganzheitlichen Sichtweise der Optimierung wurde all diesen Aspekten Rechnung getragen.

Ziel von WarmUp2 war es, das Konzept aus WarmUp1 auf einer Pilotanlage zu realisieren. Dies ist gelungen. Das Konzept konnte umgesetzt werden und 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 bevorstehende Probleme. Dank der vorausschauenden Betriebsweise ist es dem WarmUp System möglich, frühzeitig präventiv Anpassungen vorzunehmen, so dass Probleme möglichst vermieden werden. Es konnte praktisch nachgewiesen werden, dass die Flexibilität existiert und 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.

Das bestehende Regelsystem war nicht optimal für das vorliegende Projekt. Dennoch ist es gelungen, an die Regelung anzudocken und einen stabilen Betrieb zu erreichen. Die Zusammenarbeit mit den bisherigen Stakeholdern war anspruchsvoll, konnte aber zur Zufriedenheit aller Beteiligten erledigt werden. Das Projekt hat eindrucksvoll aufgezeigt, welche unterschiedlichen Interessen und Denkweisen in den unterschiedlichen Abteilungen vorherrschen. Damit zukünftig Anlagen einfacher eingebunden werden können, wurden Empfehlungen erarbeitet. Dank den WarmUp-ready Kriterien kann zukünftig beim Bau neuer Anlagen eine einfachere Einbindung der Anlagen in WarmUp erreicht werden.

Abgesehen von zwei Punkten, konnten alle Ziele des WarmUp2 Projektes erreicht werden. Der eine noch ausstehende Punkt ist die Quantifizierung des Werts der Flexibilität. Um diesen Punkt zu erledigen, wird im Rahmen des Folgeprojekts WarmUp3 vom 1.1.2017 bis 31.12.2017 eine einjährige Betriebsphase im WarmUp-Modus durchgeführt. Anschliessend werden die Resultate mit der historischen Betriebsweise verglichen und der Wert der Flexibilität ausgewiesen. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass aus monetärer Sicht aktuell vor allem die Optimierung der Beschaffung den grössten Mehrwert liefern wird. Die Wärmepumpen können in vielen Zeiten des Jahres dann betrieben werden, wenn die Strompreise günstig sind.

Der zweite Punkt ist die Frage, wie viel Aufwand notwendig ist, um weitere Anlagen in WarmUp zu integrieren. Wesentliche Anteile des Projektes WarmUp2 sind einmalige Aufwände. Bei der Wahl der Anlagen hat man sich bewusst für eine grössere Anlage entschieden. Es wurde davon ausgegangen, dass grössere Anlagen im Betrieb wirtschaftlicher sind als kleine. Im Gegenzug sind grösseren Anlagen aber wesentlich komplizierter als kleine Anlagen. Folglich war der Aufwand für die ausgewählte Anlage grösser als angenommen. Es stellt sich zudem die Frage, ob die Erfahrungen aus einer einzelnen Anlage allgemein gültig sind. Damit die Skalierbarkeit der Lösung bewertet werden kann, braucht es Erfahrungen mit weiteren Anlagen. Aus diesem Grund wurde eine dritte Phase von WarmUp aufgegliedert (WarmUp3). In der dritten Phase wird man zudem eine Anlage mit einem Vergleichsobjekt einbinden, so dass auch die Erfolgsquantifizierung einfacher vonstatten gehen kann.



Das vorliegende Pilotprojekt hat einen grossen Innovationsgrad und zahlreiche Schnittstellen zu internen und externen Akteuren. Diese Koordination war anspruchsvoll. Umso mehr ist man erfreut über das bisher Erreichte und die Tatsache, dass das Konzept nun auf weitere Anlagen ausgedehnt wird.

Es waren zahlreiche Akteure am Projekt beteiligt. Ein grosser Dank gilt all jenen, die wertvolle Beiträge zum Gelingen des Projektes beigesteuert haben. Jedes Projekt lebt von Menschen, die es vorwärtsbringen.

## 8 Ausblick

Mit dem Start von WarmUp3 im Jahr 2016 wurde die dritte Phase des Projektes in Angriff genommen. Das Projekt soll aufzeigen, wie das System von einer auf mehrere Anlagen erweitert werden kann. Ziel von WarmUp3 ist es, einen Pool bestehend aus mehreren Anlagen aufzubauen und dadurch mehr Erfahrungen und grössere Handelsvolumen zu erreichen. Es ist geplant, insgesamt etwa fünf Anlagen aus dem Pool der ewz Contracting Anlagen einzubinden. Die Anlagen sind von unterschiedlicher Grösse und unterschiedlicher Komplexität. Anhand dieser Erfahrungen wird sich zeigen, wie die Lernkurve bei der Einbindung weiterer Anlagen verläuft.

Während einer einjährigen Betriebsphase im WarmUp-Modus wird anhand von Key Performance Indikatoren ein Vergleich mit der klassischen Betriebsweise durchgeführt. Dadurch wird es möglich sein, den Wert der Flexibilität zu quantifizieren. Basierend auf den Erkenntnissen bezüglich der Lernkurve und dem Wert der Flexibilität können Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Das Projekt wird in Fachpublikationen und Vorträgen an Konferenzen und Seminaren präsentiert werden. 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.

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.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Prognos AG, Infras 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] Öko-Institut e.V., Dr. F. Ch. Matthes, „Jahresdauerlinien PowerFlex“.
- [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] 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].
- [7] Samuel Pfaffen, Florian Kienzle, „Gebäude als Energiespeicher,“ 50,2 - das Magazin für intelligente Stromnetze; 1/2014.
- [8] ewz, „WarmUp2 - Intelligente Vernetzung und Steuerung von Wärmepumpenanlagen; Projektflyer,“ Juli 2014.
- [9] 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].
- [10] M. Räsänen et al., „Identification of consumers' price responses in the dynamic pricing of electricity,“ Otakaari 1, FIN-02150 Espoo, 1995.
- [11] S. Pfaffen, „Tertiärregelenergie im Wärmepool für den Schweizer Markt, Master's thesis PSL 1221, Power Systems Laboratory, ETH Zürich,“ August 2012.