

Optimiertes Regelungs- und Betriebsverhalten thermisch aktivierter Gebäude zukünftiger Stadtquartiere (ÖKO-OPT-AKTIV)

D. Muschick, V. Kaisermayer,
A. Moser, M. Gölles,
R. Heimrath, D. Brandl,
T. Mach, C. Ribas-Tugores,
T. Ramschak, S. Oswald,
M. Polster, F. Lackner,
K. Eibisberger, M. Nebel

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

60/2023

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Optimiertes Regelungs- und Betriebsverhalten thermisch aktivierter Gebäude zukünftiger Stadtquartiere (ÖKO-OPT-AKTIV)

Daniel Muschick, Valentin Kaisermayer, Andreas Moser, Markus Gölles
BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH

Richard Heimrath, Daniel Brandl, Thomas Mach
Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz

Carles Ribas-Tugores, Thomas Ramschak
AEE – Institut für nachhaltige Technologien

Stefan Oswald, Martin Polster
TB-Starchel Ingenieurbüro GmbH

Franz Lackner
PMC Gebäudetechnik Planungs GmbH

Karl Eibisberger
ISWAT GmbH

Markus Nebel
Markus Nebel Handelsvertretung GmbH

Graz, Jänner 2022

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	12
4	Projekthalt	21
5	Ergebnisse	24
5.1.	Thermische Modellierung von thermisch aktivierten Gebäudeverbänden (D2.1)	24
5.1.1.	Gebäudemodell - Detaillierungsgrad 1 (einfach)	27
5.1.2.	Gebäudemodell - Detaillierungsgrad 2 (detailliert)	28
5.1.3.	Gebäudemodell – Zusatzmodelle	29
5.2.	Energetische Modellierung eines Stadtquartiers (D2.2)	30
5.2.1.	Anlagenmodell einfach	32
5.2.2.	Anlagenmodell detailliert	32
5.2.3.	Schnittstelle zur Regelung	34
5.3.	Ökonomische Modellierung von thermisch aktivierten Gebäudeverbänden (D2.3)	35
5.3.1.	Emissionen von CO ₂ -Äquivalenten	35
5.3.2.	Wärmegestehungskosten	36
5.4.	RC-Ersatzmodell thermisch aktivierter Gebäude für die modellprädiktive Regelung (D3.1)	39
5.4.1.	Automatisierte RC-Ersatzmodellerstellung mit Hilfe der BRCM-Toolbox	41
5.4.2.	Vereinfachte Raummodelle	44
5.5.	Modellprädiktive Regelung eines thermisch aktivieren Gebäudes (D3.2)	45
5.6.	Regelungstechnisches Gesamtkonzept des Stadtquartiers (D3.3)	47
5.6.1.	Verteilte Optimierung	48
5.7.	Automatische Parametrierung der RC-Ersatzmodelle (D3.4)	50
5.7.1.	Klassische Lineare Systemidentifikation: Abbildung als Übertragungssystem	51
5.7.2.	Model-predictive-control-relevant Identification	51
5.7.3.	Extended Kalman Filter	52
5.8.	Bewertung der Simulationsergebnisse (D4.1)	54
5.8.1.	Methodik	55
5.8.2.	Kosteneinsparungen	57
5.8.3.	Wachstum	61
5.8.4.	Erwartete und unerwartete Ausfälle	65
5.8.5.	Prognosefehler	66
6	Schlussfolgerungen	68
7	Ausblick und Empfehlungen	69
8	Verzeichnisse	70

1 Kurzfassung

In den Bemühungen urbane Energiesysteme umweltfreundlicher und gleichzeitig kosteneffizienter zu gestalten, wurde in den vergangenen Jahrzehnten durch verbesserte Gebäudehüllen und die Einbeziehung regenerativer Energieträger ein großes Einsparungspotential aufgezeigt. Im Gegensatz dazu wurde die Gestaltung des Zusammenspiels der Energiesysteme der einzelnen Gebäude auf Ebene ganzer Stadtquartiere bisher erst in Anfängen untersucht.

Das Projekt ÖKO-OPT-AKTIV zielte darauf ab, die Regelung der Energiesysteme ganzer Stadtquartiere zu verbessern. Durch ein optimiertes Zusammenspiel der gebäudeeigenen Subsysteme, die Einbeziehung volatiler regenerativer Energieträger und durch zentrale Speicherbewirtschaftung können sowohl ökonomische als auch ökologische Verbesserungspotentiale aktiviert werden.

Anhand einer, parallel zum Projekt laufenden, Entwicklung des Energiesystems eines zukünftigen Stadtquartiers in Graz-Reininghaus wurde eine adaptive, modellprädiktive Regelung für die Energieversorgung von zukünftigen Stadtquartieren entwickelt. Die im vorangegangenen Projekt ÖKO-OPT-QUART entwickelte modellprädiktive Regelung der Energiezentrale wurde um die Kommunikation mit den Regelungen der thermischen Zonen in den Einzelgebäuden ergänzt und zu einem umfassenden, selbstlernenden regelungstechnischen Gesamtkonzept des gesamten Stadtteils erweitert. Die Einzelgebäude werden über thermisch aktivierte Bauteile beheizt und gekühlt und über ein Niedertemperatur-Nahwärmenetz sowie Kältenetz von zentralen Grundwasserwärmepumpen versorgt. Zur Versorgung bei Lastspitzen oder bei höherem Temperaturbedarf zum Durchladen dezentraler Warmwasserspeicher ist das System ferner an das Fernwärmenetzwerk angeschlossen. Ergänzend unterstützt ein urbanes photovoltaisches Kraftwerk die Versorgung mit elektrischer Energie.

Als flexibilitätsstiftender Speicher wird im Gegensatz zum Vorprojekt kein sensibler Warmwasserspeicher eingesetzt, sondern auf die thermische Trägheit der Gebäudemassen gesetzt. Um den Konfigurationsaufwand zu minimieren, werden automatisiert anhand von Messdaten thermische Zonenmodelle generiert und eingesetzt, um netzdienlich Verschiebungen der Energieversorgung durchführen zu können, ohne den Komfort in den Wohnungen oder Büros zu gefährden. Die gesamtheitliche Regelung der Energiezentrale sowie der thermischen Zonen wird über die Formulierung und Lösung eines linear-ganzzahligen mathematischen Optimierungsproblems realisiert, wobei die Skalierbarkeit des Problems durch Methoden der verteilten Optimierung und entsprechende Kommunikationsschnittstellen zwischen der Energiezentrale und den einzelnen Gebäuden und Wohneinheiten gewährleistet werden kann.

Die Entwicklungen und Analysen werden anhand detaillierter thermo-elektrischer Simulationsmodelle durchgeführt, wobei die Modellierung der thermischen Bauteilaktivierung auf den Ergebnissen des Projektes solSPONGEhigh beruht.

Die adaptive, modellprädiktive Regelung wird unerwarteten klimatischen Bedingungen, gebäudetechnischen Ausfällen und Kostensprüngen unterworfen, um ihre Robustheit zu testen und ihre Praxistauglichkeit weiterzuentwickeln.

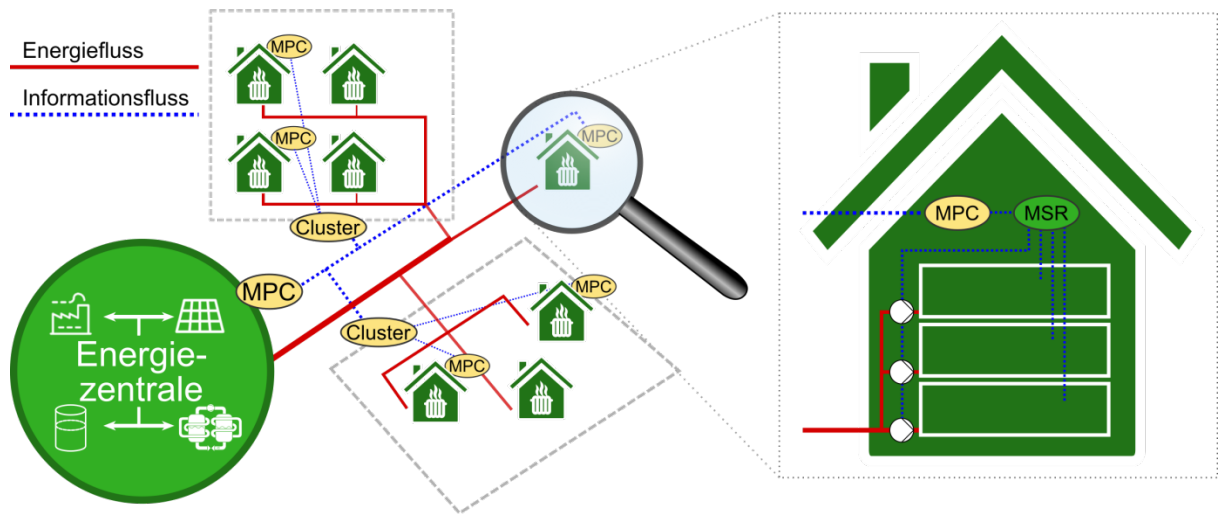


Abbildung 1: Mögliche übergeordnete Struktur des Zusammenspiels von Gebäuderegulungen und der Regelung der Energiezentrale. Zum Einsatz kommen vorausschauende, optimierende Regelungen (z.B. *model predictive control*, MPC).

Das Ergebnis ist eine adaptive, modellprädiktive Regelung, die durch die optimale Bewirtschaftung der zentralen Energiespeicher und der thermisch aktivierten Gebäude einen resilienten und kosten- bzw. emissionsminimierten Betrieb des Gesamtenergiesystems eines Stadtquartiers gewährleistet.

In Folgeprojekten (z.B. dem Vorzeigerregions-Projekt UserGRIDs) soll zukünftig eine reale Umsetzung der entwickelten Methoden erfolgen, die Sinnhaftigkeit und Leistungsfähigkeit unter realen Bedingungen unter Beweis gestellt und in weiterer Folge untersucht werden, wie die wissenschaftlichen Methoden in handelsübliche Infrastruktur, speicherprogrammierbare Steuerungen und Mess- und Regeltechnik integriert werden können.

2 Abstract

In the efforts to make urban energy systems more environmentally friendly and at the same time more cost-efficient, a large savings potential has been demonstrated in recent decades through improved building envelopes and the inclusion of renewable energy sources. In contrast, the investigation of the interplay of the energy systems of the individual buildings, on the level of entire city districts, is only in the early stages.

The project ÖKO-OPT-AKTIV aims to improve the control strategies of the energy systems of entire urban districts. Through an optimised interaction of the buildings' own subsystems, the inclusion of volatile regenerative energy sources and central storage management, both economic and ecological improvement potentials will be activated.

Based on the current development of the energy system of a future urban quarter in Graz-Reininghaus, an adaptive, model predictive control strategy for the energy supply of future urban quarters was developed. The model predictive control of the energy hub developed in the previous project ÖKO-OPT-QUART was supplemented by communication with the control systems in the individual buildings and extended to a comprehensive, self-learning overall control concept for the entire district. The individual buildings are heated and cooled via thermally activated components and supplied via a low-temperature local heating and cooling network including a central hot water storage fed by ground water heat pumps. In addition, an urban photovoltaic power plant supports the supply of electrical energy. The developments and analyses are carried out on the basis of detailed thermo-electric simulation models, where the modelling of the thermally activated components is based on the results of the solSPONGEhigh project.

The adaptive, model predictive control is subjected to unexpected climatic conditions, technical failures and variable tariffs in order to test its robustness and further develop its practical suitability.

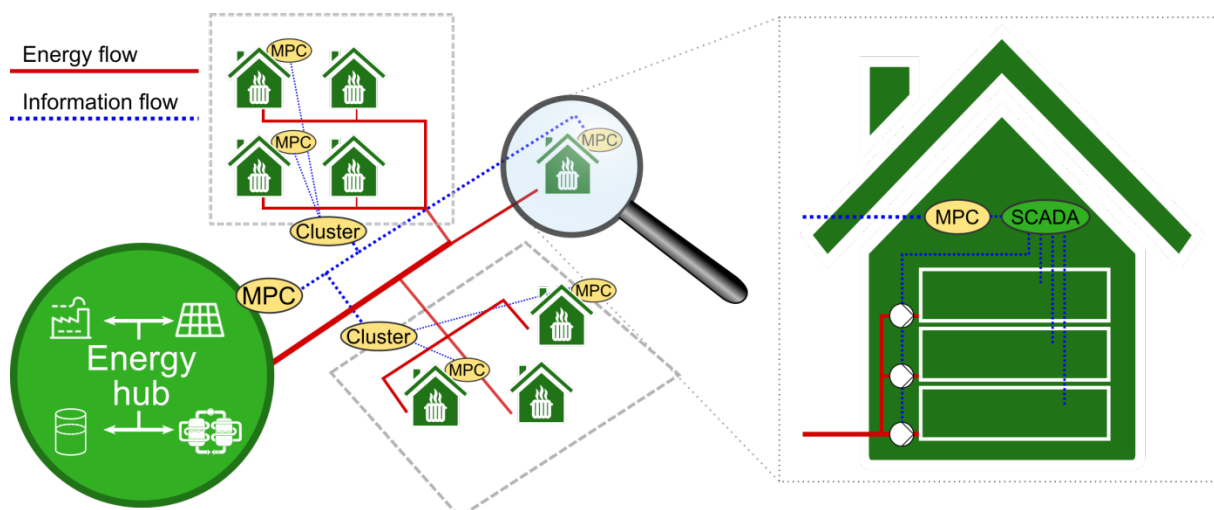


Abbildung 2: Proposed structure of the interaction between individual building control units and the controller of the energy hub. The controllers used are predictive, optimizing controllers (e.g. model predictive controllers, MPC).

The result is an adaptive, model-predictive control system that ensures resilient and cost- or emission-minimized operation of the overall energy system of a city district through optimal management of the central energy storage facilities and the thermally activated buildings.

A real implementation of the developed concepts is envisaged in follow-up projects such as the Model Region project „UserGRIDs“. There, the feasibility and practicability of the approach will be tested under real conditions. The integration of the algorithms and methods into off-the-shelf PLCs and infrastructure, their integration into existing SCADA systems will be investigated in the future.

3 Ausgangslage

Energiesysteme auf Ebene der Stadtquartiere

Um der, im Zeichen des Kostendrucks und des Klimawandels, laufend steigenden Anforderung an Energiesysteme zu entsprechen, wurden in den vergangenen Jahrzehnten laufend die Anforderungen an den Wärmeschutz der Gebäude erhöht und die Verwendung regenerativer Energieträger propagiert. Die zu erzielenden Einsparungen wurden durch unterschiedliche technologische Fortschritte immer weiter ausgebaut und gelangen immer näher an ihre physikalischen Grenzen, beziehungsweise die der ökonomischen Sinnhaftigkeit.

Demgegenüber bietet die übergeordnete Ebene des Stadtquartiers noch deutliche Einsparungspotentiale. Einerseits können regenerative energietechnische Anlagen für ganze Stadtquartiere meist deutlich kostengünstiger errichtet und betrieben werden als Kleinanlagen für Einzelgebäude. Andererseits kann durch eine intelligente Regelung des Energiesystems, in Verbindung mit der Ausnützung von Gleichzeitigkeiten und einer zentralen Speicherbewirtschaftung, eine volatile Energiebereitstellung auf Quartiersebene effizienter eingesetzt werden.

Gleichlaufend mit der Entwicklung unterschiedlicher Planungsansätze auf Quartiersebene wurden die Berechnungsmethoden zur Quantifizierung von Einsparungspotentialen vorangetrieben. Die diesbezüglich leistungsfähigste Methode ist die energietechnische Simulation, in der ein ganzes Stadtquartier, inklusive dessen Energiesystem, in einem instationären, detaillierten Simulationsmodell abgebildet wird. Eine hochwertige Methode ist die Co-Simulation, in der unterschiedliche Simulationsprogramme zu einer Simulationsumgebung gekoppelt werden. Die Co-Simulation (z.B. mittels BCVTB) bietet die Möglichkeit, für jede Teilaufgabe das am besten geeignete Werkzeug einzusetzen [1].

Das Gebäude als Energiespeicher

Das Gebäude selbst kann mit seiner thermischen Masse als Wärmespeicher dienen. Mit einer geeigneten Regelungstechnik ist es unter Ausnutzung der Wärmekapazität des Gebäudes möglich, Lastspitzen in der Wärmeversorgung zu senken (um 25 – 30 %), was auch in Fallstudien in Finnland, Deutschland und Schweden nachgewiesen wurde [2 3]. Die in einem Gebäude verfügbare Speichermasse in Form von Bauteilen und sonstigen Einbauten kann aktiviert werden und zur kurz- bis mittelfristigen Überbrückung von Zeiträumen ohne Wärme- bzw. Kältezufuhr genutzt werden. Hierzu kann einerseits eine passive Aktivierung der Kapazitäten des betrachteten Gebäudes gewählt werden, oder es wird andererseits eine aktive Beladung der Bauteile durchgeführt.

Eine passive Aktivierung der im Gebäude immanenten Speichermasse kann durch eine vorausschauende, rechtzeitige, aber nur geringfügige Überwärmung bzw. Abkühlung der Räumlichkeiten

¹ M. Wetter , Co-simulation of building energy and control systems with the building controls virtual test bed, J. Build. Perform. Simul. 4 (3) (2011) 185–203 .

² Seppo Kärkkäinen, Kari Sipilä, et al., „Demand side management of the district heating system“, 2004 Forschungsbericht

³ Johan Kensby, Anders Trüschel, Jan-Olof Dalenbäck, “Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test”, 2015, Applied Energy

herbeigeführt werden. Aus Studien [4 5 6 7] kann von einem Speicherpotential von etwa 0,1 kWh/m²_{BGF} und ein Lastreduktionspotential von etwa 10 - 25 %, bei gemäßigten Schwankungen der Raumlufttemperatur von ±1 K, ausgegangen werden.

Ein sehr wirkungsvoller Ansatz zur Steigerung der Speicherkapazität und der Energieeffizienz von Gebäuden ist die intelligente, aktive Nutzung von Bauteilen aus Beton (insbesondere Geschossdecken und Heizestriche). In großflächige Bauteile wird ein Rohrsystem zur Durchleitung eines Wärmeträgermediums eingelegt, mit dessen Hilfe man die Temperatur in den angrenzenden Räumen regeln kann. Dieses System ist unter dem Begriff thermische Bauteilaktivierung (TABs) bekannt. Es findet bisher vorwiegend im Bürobau als Möglichkeit zur Kühlung und als zusätzliche Wärmeabgabefläche (Grundlast) im Heizfall seine Anwendung. Erst in letzter Zeit, einhergehend mit der deutlichen Reduktion des spezifischen Wärmebedarfs, findet dieses Wärmeabgabesystem auch seinen Platz im Wohnbau. Hier gibt es eine Vielzahl von Beispielen [8 9 10] im Bereich der Einfamilienhäuser, vereinzelt auch für Mehrfamilienhäuser. Weitere Anwendungsfälle wie z.B. Fertigungshallen und Büros sind aus den Projekten in AUT und DE [11 12 13] zu entnehmen.

Eine Kopplung der TABs mit Fern- bzw. Nahwärmeanschlüssen unter der Prämisse der Spitzenlastreduktion wurde bis dato noch nicht explizit untersucht. Um eine Reduktion der Spitzenlast zu erreichen, ist es notwendig die Regelung der TABs-Beladung unter Einhaltung der Behaglichkeit entsprechend zu modifizieren. Die generelle Vorgehensweise zur Regelung von TABs zur Heizung bzw. Kühlung von Nichtwohn- und Wohnbauten sind unter anderem in [14 15 16] zu finden. Der Aspekt der möglichen Speicherdauer, Regelung einer Überladung und die dadurch gegebene Behaglichkeit ist in [17 18 19] nachlesbar. Zusammenfassend kann für Gebäude mit thermisch aktivierten Bauteilen davon ausgegangen werden, dass hier ein deutliches Lastmanagementpotential zur kurz- bis mittelfristigen Einspeicherung von Wärme und Kälte im Bereich von 0,1 bis 1,4 kWh/m²_{BGF} (je nach Nutzung und Gebäudemasse), gegeben ist.

⁴ Kensby J., Trüschel A., (2015): Potential of residential buildings as thermal energy storage in district heating systems – Results from a pilot test; Applied Energy 137 (2015) 773–781, Elsevier Ltd.

⁵ Olsson Ingvarson, L., Werner, S., (2008): Building mass used as short term heat storage, 11th International Symposium on District Heating and Cooling, Reykjavik, Iceland

⁶ Kärkkäinen S, et al. (2003): Demand side management of the district heating system, VTT Research Notes 2247, Finland

⁷ Johansson C., Wernstedt F. (2010): Heat load reductions and their effect on energy consumption, 12th International Symposium on District Heating and Cooling, 2010, Tallinn, Estonia

⁸ Keckeis, Energiewerkstatt: <http://energie-werkstatt.at/> (Abgerufen 02.2019)

⁹ Kuster, FIN Future is Now: <http://www.kuster.co.at/projekte.htm> (Abgerufen 02.2019)

¹⁰ Tagungsband Expertenforum Beton, (2015): focus - Energiespeicher Beton, Zement + Beton Handelsges.m.b.H., Wien

¹¹ Fink, C. et al. (2016): Wissenschaftliche Begleitforschung, Solarthermie- Solare Großanlagen, Klima- und Energiefonds

¹² Heimrath, Richard et al. (2018): „Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile im urbanen Umfeld“. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/sdz_pdf/berichte/schriftenreihe_2018-20-solSPONGEhigh.pdf.

¹³ Olivia A., et al. (2016): HeizSolar – Modellbasierte Messdatenanalyse von SolarAktivHäusern, Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWWi), Fraunhofer - Institut für Solare Energiesysteme, Freiburg

¹⁴ Tödtli, J. et al. (2009): TABS Control: Steuerung und Regelung von thermoaktiven Bauteilsystemen, FAKTOR Verlag AG, Zürich

¹⁵ Lehmann B. et al. (2009): Regelung und Steuerung von thermoaktiven Bauteilsystemen (TABS), Bauphysik, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

¹⁶ Schranzhofer H. et al. (2017): MPC boxes - Model Predictive Control von aktiven Bauteilen und Messungen in zwei Test-Boxen, Endbericht Haus der Zukunft, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

¹⁷ Krec K. (2016): Energiespeicher Beton, Berichte aus Energie- und Umweltforschung 2/2016, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien

¹⁸ Heimrath R., et al., (2017): Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile, Institut für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz, Studie im Rahmen des Zukunftsfonds, Steiermark, Graz, 2017

¹⁹ Handler S. (2014): Increasing energy efficiency of small residential buildings by solarthermal activation of concrete ceilings, Dissertation an der TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, Wien

Die Modellierung thermischer Bauteilaktivierung

Die energetische Gebäude- und Anlagensimulation ermöglicht die dynamische Berechnung des energetischen Verhaltens von Gebäuden unter Einfluss nutzungsbezogener und klimatischer Randbedingungen. Um ein der Realität möglichst nahes Abbild zu schaffen, müssen diejenigen Aspekte des realen Systems, welche im Zentrum des Interesses stehen, hinreichend genau modelliert werden. Das Ergebnis sind Zeitreihen thermischer Größen wie z.B. Raum-, Oberflächen-, Vor- und Rücklauftemperaturen und Zeitreihen energetischer Größen wie Heiz- und Kühlleistungen.

Derzeit können unterschiedliche Simulationsprogramme für die Berechnung von TABS genutzt werden [20]. Diese basieren in der Regel auf einem von zwei Modellierungsansätzen. Der Kausalmodellierungsansatz wird in traditionellen Gebäudeenergiesimulationstools wie z.B. TRNSYS eingesetzt. Im Gegensatz dazu beschreiben die akausalen (gleichungsbasierten) Modellierungsansätze (IDA ICE, Modelica, Neutral Model Format) die auf Gleichungen basierenden Komponenten ohne klare Zuordnung von Eingangs- und Ausgangsvariablen. Die Komponenten sind daher einfach zu erstellen und zu modifizieren, aber diese Modelle erfordern ausgefeilte Methoden, um sie zeiteffizient zu simulieren [21 22]. Im Rahmen dieses Projektes wurde das Simulationsprogramm IDA ICE verwendet.

Hinsichtlich der Modellierung von TABS gibt es verschiedene Ansätze, die in den unterschiedlichen Simulationsprogrammen genutzt werden [23]. Neben den Ansätzen nach Strand [24], Glück [25], Laouadi [26], Weitzmann [27] und Karlsson [28], gibt es jene Methode von Koschenz und Lehmann [29], die von den gängigsten Simulationsprogrammen genutzt wird. Dabei wird das dreidimensionale, instationäre Wärmeleitungsproblem unter geringfügigen Einschränkungen mit einer eindimensionalen Variante approximiert. Das erstellte Modell erlaubt die thermische Berechnung von Rohrsystemen im Bauteilkern (TABS) unter Zuhilfenahme der instationären Berechnungsgleichungen für eine ebene Wand. Dabei werden die Einflüsse der im Bauteil eingelegten Rohre sukzessive in äquivalente thermische Widerstände umgerechnet, sodass eine Beziehung zwischen der Vorlauftemperatur in den Rohren und der mittleren Temperatur des Bauteils in der Rohrebene entsteht. Die Validierung mit Messdaten des Ansatzes von Koschenz und Lehmann, auch im Vergleich zu anderen Methoden, ist in der Literatur [30 31 32] zu finden. Die Validierungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung im Vergleich mit Messdaten

²⁰ Nageler, P.J., Schweiger G., Pichler M., Brandl D., Mach T., Heimrath R., Schranzhofer H. und Hochenauer C. (2018) Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS). Energy and buildings 168: 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.025>.

²¹ Wetter M., Haugstetter M. (2006). Modelica versus TRNSYS – A Comparison between an Equation-Based and a Procedural Modeling Language for Building Energy Simulation, in: Proceedings of the 2nd SimBuild Conference, Cambridge, MA, USA, pp. 262–269.

²² Zimmer, D. (2010): Equation-based modeling of variable-structure systems, Swiss Federal Institute of Technology, PhD Diss .

²³ Heimrath R., Ramschak T., Daniel Brandl, Jürgen Suschek-Berger, und Thomas Mach. (2017): „Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile“. Endbericht 7008. Studie im Rahmen des Zukunftsfonds Steiermark. Graz, Gleisdorf.

²⁴ Strand R.K. (1995): Heat source transfer functions and their application to low temperature radiant heating systems. Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign, United States

²⁵ Glück, B. (1999): Thermische Bauteilaktivierung – Nutzen von Umweltenergie und Kapillarrohren; C.F. Müller Verlag, Heidelberg, ISBN 3-7880-7674-7

²⁶ Laouadi A. (2004): Development of a radiant heating and cooling model for building energy simulation software. Building and Environment, 39(4), 421-431

²⁷ Weitzmann P. (2004): Modelling Building Integrated heating and cooling systems. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

²⁸ Karlsson H. (2011): Embedded water-based surface heating, Part 2: Experimental validation; Journal of Building Physics 34(4)

²⁹ Koschenz M., Lehmann B. (2000): Thermoaktive Bauteilsysteme TABS, 1. Auflage, EMPA, Dübendorf

³⁰ Friembichler F., Bednar T., Handler S., Gladt M., Neusser M., Hofer R., Schöberl H. (2014): Thermische Bauteilaktivierung. Entwicklung eines Rechenkerns. Berichte aus Energie- und Umweltforschung 11/2014, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

³¹ Nageler, P., Schweiger G., Pichler M., Brandl ., Mach T., Heimrath R., Schranzhofer H. und Hochenauer C. (2018): „Validation of dynamic building energy simulation tools based on a real test-box with thermally activated building systems (TABS)“. Energy and buildings 168: 42–55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.025>.

³² Heimrath R., Lerch W., Ramschak T., Mach T., und Fink C. (2018): „Hohe solare Deckungsgrade durch thermisch aktivierte Bauteile im urbanen Umfeld“. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. <https://nachhaltigwirtschaften.at/>.

aus realisierten Anlagen mit aktivierter Betondecke, Betonboden und Fußbodenheizung. So kann unter der Verwendung der erwähnten Simulationsmethoden eine optimale Systemkonfiguration und Betriebsweise unter Berücksichtigung erneuerbarer volatiler Energien für das zu betrachtende Quartiers-Energiesystem ermittelt werden.

Regelung urbaner Energieverbünde

Auf dem Gebiet der zukünftigen Stadtentwicklung stellt insbesondere die Regelung und Koordination komplexer Energieverbünde innerhalb eines Stadtquartiers eine große Herausforderung dar. Bisher erfolgte die übergeordnete Regelung dieser Systeme meist auf relativ einfache Art und Weise durch die Betrachtung mehrerer entkoppelter Regelkreise (z.B. Heizungs- und Warmwasserregelkreis), dem Auswerten simpler Regelbedingungen (z.B. Pufferspeicher vollgeladen ja/nein) und dem Einsatz konservativer Regelungsmethoden (z.B.: Proportional-Integral (PI) Regler).

Solche Regelungen können jedoch bei weitem nicht das volle Potential eines solchen komplexen Systems ausschöpfen, da sie das dynamische Verhalten der verschiedenen thermischen Quellen und Senken und insbesondere die vorhandenen Energiespeicher nicht geeignet berücksichtigen. Besonders der Koordination von elektrischen und thermischen Speichern in Verbindung mit volatilen erneuerbaren Energien und Wärmepumpen wurde bislang wenig Achtung geschenkt. Dazu ist es unter anderem notwendig, Gebrauch von Verbrauchs- und Ertragsprognosen zu machen, wozu bestehende Regelungen nicht oder nur eingeschränkt fähig sind.

Das Potential, aber auch die Herausforderungen erhöhen sich noch zunehmend, wenn die thermische Speicherfähigkeit von Gebäuden und damit die Möglichkeiten zur zeitlichen Verschiebung der thermischen Lasten (sowohl bei der Kühlung als auch beim Heizen) berücksichtigt werden.

Im kleineren Maßstab, im Bereich der Regelung von Gebäuden oder Gebäudeabschnitten, wurde deshalb in den letzten Jahren national wie international zunehmend geforscht und der Einsatz verschiedener moderner Regelungstechniken untersucht, z.B. [33 34], unter denen vor allem modellprädiktive Regelungen (MPC), z.B. [35 36 37], hervorzuheben sind. Diese Art der Regelung kann unter Einsatz vereinfachter mathematischer Modelle, welche Verkoppelungen zwischen einzelnen Größen explizit berücksichtigen sowie das dynamische Verhalten der Systeme beschreiben, und unter Zuhilfenahme von Prognosedaten vorausschauend agieren. Die MPC berechnet dabei laufend (z.B. alle 15 Minuten) die optimalen Sollwerte für einen Prognosehorizont (z.B. 48 Stunden) mit dem Ziel, eine definierte Kostenfunktion (z.B. den Primärenergieeinsatz oder den Emissionsausstoß) zu minimieren. Die für den ersten Zeitschritt berechneten Sollwerte werden danach auf das System aufgeschaltet und die Berechnung durch die MPC beginnt von neuem. Dabei können auch gleichzeitig Beschränkungen der Stell-, Regel- und Zustandsgrößen oder Benutzerinteraktionen wie z.B. die Eingabe von

³³ Heimberger, M., Chochole, M., Schlager, R., Zeilinger F.(2013). Der Nutzen von aktiven Bürogebäuden für Mittelspannungsnetze - Vorstellung des Projektes „SmartCityGrid:CoOpt“

³⁴ Dimitrios G., et al., (2010). Use of Weather and Occupancy Forecasts for Optimal Building Climate Control (OptiControl). Final Report of the Project *OptiControl*

³⁵ Mayer, B., Killian, M., Kozek, M., (2015). Management of hybrid energy supply systems in buildings using mixed-integer model predictive control. *Energy Conversion and Management*, Band 98, S. 470-483

³⁶ Privara, S., et al., (2011). Role of MPC in Building Climate Control. *Computer Aided Chemical Engineering*. Band 29, S. 728-732

³⁷ Oldewurtel, F., et al., (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, Band 45, S. 15-27

Abwesenheitszeiten berücksichtigt werden. Ferner kann sehr einfach auf variable Rahmenbedingungen wie sich ändernde Strompreise oder Einspeisetarife reagiert werden.

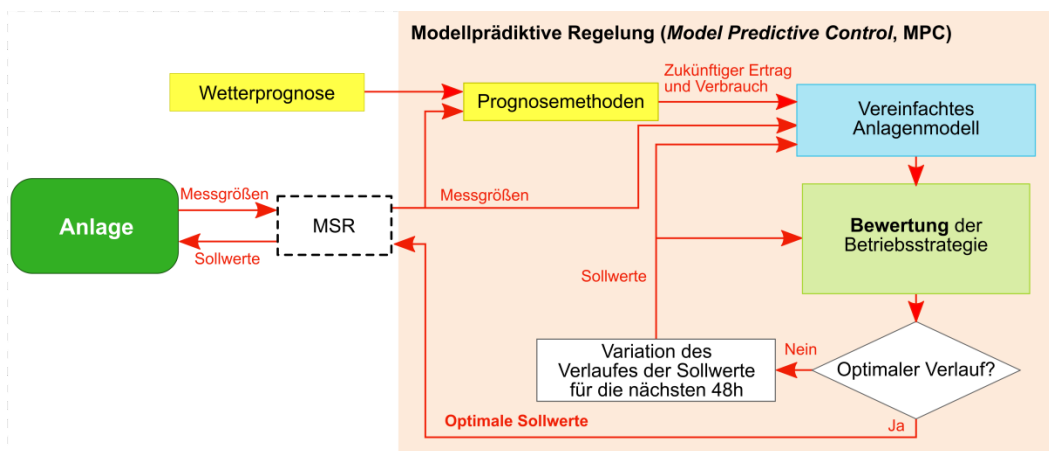


Abbildung 3: Prinzipielles Schema einer modellprädiktiven Regelung für eine Energieversorgungs-zentrale/Anlage.

Im Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART wurde eine solche modellprädiktive Regelung für die Energieversorgung eines Stadtquartiers entwickelt und mittels detaillierter ökonomischer Modelle sowie einem Vergleich mit einer konventionellen, für das reale Quartier geplanten Regelung auf deren Potential untersucht [38]. Dabei wurde insbesondere das Potential von thermischen Speichern offensichtlich, welche nicht nur zur Abfederung temporärer Lastspitzen verwendet werden können, sondern auch Flexibilität im Zusammenspiel zwischen den Sektoren (Wärme, Kälte, Strom) bieten sowie andere Beschränkungen im System ausgleichen können, so dass einzelne Komponenten kleiner dimensioniert werden könnten.

Das Projekt ÖKO-OPT-QUART fokussierte seine Betrachtung des Energieverbundes auf die Energiezentrale, die Wechselwirkung mit den einzelnen Regelungen der Gebäude beschränkte sich auf das Bereitstellen der von diesen geforderten Kühl- und Heizleistungen bei den gewünschten Temperaturniveaus sowie der Berücksichtigung der sich daraus ergebenden Rücklauftemperaturen. Dadurch konnte jedoch nicht das Potential der thermischen Speicherwirkung der Gebäude genutzt werden und es mussten zusätzliche thermische Speicher eingesetzt werden. Derartige Wärme- und insbesondere Kältespeicher benötigen große Volumina, sind daher verhältnismäßig teuer und werden daher selten eingesetzt. Eine vorausschauende Regelung, welche thermische Modelle der Gebäude integriert und somit die Auswirkung von reduzierten oder erhöhten Heiz- bzw. Kühlleistungen auf die Raumtemperaturen abschätzen kann, kann die Speicherwirkung der Gebäude quasi kostenlos nutzen.

Die meisten technischen Einrichtungen zum Zweck der thermischen Konditionierung von Gebäuden basieren auf einfachen Differenzreglern mit Hysterese oder PI-Reglern. Ein Grund für die weite Verbreitung der einfachen Regler ist deren unkomplizierte programmiertechnische Umsetzung. Ein thermisch aktiviertes Bauteil führt jedoch aufgrund der thermischen Trägheit dieses Wärmeemissionssystems zu großen Zeitkonstanten, die es schwierig machen auf kurzfristige

³⁸ Moser, A.; Muschick, D.; Gölles, M.; Nageler, P.; Schranzhofer, H.; Mach, T.; Tugores, C. R.; Leusbrock, I.; Stark, S.; Lackner, F. & Hofer, A. (2020): "A MILP-based modular energy management system for urban multi-energy systems: Performance and sensitivity analysis". Applied Energy.

Sollwertänderungen dynamisch zu reagieren. TABs sind aus diesen Gründen mit einer konventionellen Regelung schwer in den Griff zu bekommen und für eine prädiktive Regelung prädestiniert.

Modellprädiktive Regelungen als Teil eines Gebäudemanagementsystems (BMS) wurde bereits zahlreich in internationalen Forschungsprojekten untersucht [³⁹ ⁴⁰ ⁴¹ ⁴² ⁴³]. Auch von Teilen des Konsortiums wurden dazu in den Projekten *soSPONGEhigh* und *MPC-BOXES* Untersuchungen angestellt, die das Potential einer modellprädiktiven Regelung zumindest für den Heizbetrieb bereits dargelegt haben.

Der Fokus dieser Untersuchungen und Regelungen liegt meist in der Minimierung der zugeführten Energie und konzentriert sich auf ein einzelnes Gebäude. Im Zusammenspiel mit einer Energiezentrale sowie der Einbindung von erneuerbaren Energiequellen kann aber auch ein absolut höherer Energiebedarf optimal sein, der dafür zu Zeiten besserer, billigerer oder kostenloser Verfügbarkeit anfällt. Für eine MPC in Verbindung mit TABs, einer Wärmepumpe und einer Photovoltaikanlage mit dem Ziel der Eigenstromverbrauchsmaximierung siehe etwa [⁴⁴].

Über die Integration mehrerer Gebäude in ein übergeordnetes Regelungskonzept des Energieverbundes ist noch wenig bekannt. Das H2020-Projekt STORM [⁴⁵] versucht zwar durch aktive Manipulation der Regelungen von Häusern, die an ein Wärmenetz angeschlossen sind, die Lastspitzen im Netz zu minimieren; eine bidirektionale Verbindung mit der Regelung der Energiezentrale ist jedoch nicht vorgesehen.

Parametrierung der Gebäudemodelle

Ein geeignetes (Dynamik-)modell der Regelstrecke ist das Herzstück einer MPC. Für die Regelung der Gebäudeklimatisierung ist die Regelstrecke ein beheiztes oder gekühltes Gebäude, das in Wechselwirkung mit der realen Umgebung (Wetter) steht. Das vom Regler verwendete Modell ist grundsätzlich ein einfaches thermisches Gebäudemodell - im Unterschied zum detaillierten Gebäudesimulationsmodell, welches z.B. in IDA ICE oder TRNSYS implementiert wird. Für MPC-Anwendungen werden hier lineare, zeitinvariante Modelle bevorzugt, sogenannte RC-Modelle, in welchen die Speicherfähigkeit von Komponenten durch Kapazitäten, die Wärmeleitfähigkeit durch Leitwerte abgebildet wird.

³⁹ Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., and Morari, M. (2012). Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energy and Buildings*, 45(0):15 – 27

⁴⁰ Gwerder, M., Gyalistras, D., Sagerschnig, C., Smith, R., and Sturzenegger, D. (2013). Final Report: Use of Weather And Occupancy Forecasts For Optimal Building Climate Control – Part II: Demonstration (OptiControl-II). Technical report

⁴¹ Killian, M., Mayer, B., and Kozek, M. (2014). Hierarchical Fuzzy MPC Concept for Building Heating Control. Preprints of the 19th World Congress The international Federation of Automatic Control

⁴² Mayer, B., Killian, M., and Kozek, M. (2015). Management of hybrid energy supply systems in buildings using mixed-integer model predictive control. *Energy Conversion and Management*, 98:470 – 483

⁴³ Kepplinger, P., Huber, G., and Petrasch, J. (2016). Field testing of demand side management via autonomous optimal control of a domestic hot water heater. *Energy and Buildings*, 127:730 – 735

⁴⁴ Pichler, M. F., Heinz, A., and Rieberer, R. (2017). MODEL PREDICTIVE HP- AND BUILDING CONTROL TO MAXIMIZE PV-POWER ON SITE USE. 12th IEA Heat Pump Conference

⁴⁵ Vanhoudt D. et al., (2017) Status of the Horizon 2020 Storm Project. 15th International Symposium on District Heating and Cooling

Zum Thema Gebäudemodell und der damit eng zusammenhängenden Parameterschätzung gab es in den letzten Jahren bereits einige Veröffentlichungen [46 47 48 49 50 51 52]. Die Modellierungsansätze reichen von physikalischen Modellen (*white box*-Modelle) bis zu empirischen, datengetriebenen *black box*-Modellen. Im Projekt MPC-BOXES wurde ein physikalisch motiviertes, aber datengetriebenes lineares Modell dritter Ordnung als sinnvoller Kompromiss zwischen Komplexität und Handhabbarkeit für die Verwendung in modellprädiktiven Regelungen identifiziert (ein sogenanntes *gray box*-Modell). Die Ermittlung der Parameter anhand von Messdaten war ein eigener, intensiver Punkt des Projektes [53]. Ein wesentlicher Punkt bei vereinfachenden Modellen ist immer, dass die Modellgüte stark von den Trainingsdaten abhängt und z.B. saisonalen Schwankungen unterworfen ist. Eine Abhilfe könnte eine kontinuierliche Adaptierung der Parameter anhand neuester Messdaten bieten [54].

Eine Alternative stellt die automatisierte Ermittlung des vereinfachten Modells aus detaillierten Gebäudemodellen dar [55]. Dafür muss aber zunächst ein detailliertes Gebäudemodell vorliegen, welches mit realen Messdaten validiert wurde; selbst dann kann aber nicht garantiert werden, dass das vereinfachte Modell noch immer eine gute Übereinstimmung mit der Realität bieten kann.

WISSENSSTAND IM KONSORTIUM

Das Institut für Wärmetechnik der Technischen Universität Graz (**IWT**) hat eine lange Tradition in der Bearbeitung energietechnischer Fragestellungen. Neben der Forschungstätigkeit auf der Ebene einzelner Energiesysteme (Biomasse, Solarthermie, Wärmepumpe, Brennstoffzelle) werden übergeordnete Energiesysteme modelliert, analysiert und publiziert [56].

Insbesondere liegt die Herausforderung in der Entwicklung und EDV-technischen Beherrschbarkeit von Simulationsmodellen, die in der Lage sind, sowohl den Verbraucher (Gebäudebestand) als auch die gesamte Energietechnik detailliert, zeitlich hochaufgelöst und dynamisch abzubilden. In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Projekten durchgeführt, in denen die detaillierte energietechnische Modellierung von Energieverbänden weiterentwickelt werden konnte. Für das gegenständliche Projekt sind diesbezüglich insbesondere die in den Projekten EnergySimCity und ÖKO-OPT-QUART entwickelte Methode der Co-Simulation und die im Projekt soSPONGEhigh entwickelte Methode zur Modellierung thermischer Bauteilaktivierung relevant.

⁴⁶ Karlsson, H. (2010). Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems - supply temperature optimisation and self-regulating effects. PhD thesis, Chalmers University of Technology. Professor Bjarne Olesen, Technical University of Denmark

⁴⁷ Zacekova, E., Privara, S., and Vana, Z. (2011). Model predictive control relevant identification using partial least squares for building modeling. In Australian Control Conference, Melbourne.raturverzeichnis

⁴⁸ Privara, S., Vana, Z., Zacekova, E., and Cigler, J. (2012). Building modeling: Selection of the most appropriate model for predictive control. Energy and Buildings, 55(0):341 – 350. Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World

⁴⁹ Sturzenegger, D., Gyalistras, D., Morari, M., and Smith, R. S. (2012). Semi-Automated Modular Modeling of Buildings for Model Predictive Control. Buildsys'12 Proceedings, Toronto, ON, Canada

⁵⁰ Sourbron, M., Verhelst, C., and Helsen, L. (2013). Building models for model predictive control of office buildings with concrete core activation. Journal of Building Performance Simulation, 6(3):175–198

⁵¹ Privara, S., Cigler, J., Zdenek, V., Oldewurtelb, F., Sagerschnig, C., and Zacekova Eva (2013). Building modeling as a crucial part for building predictive control. Energy and Buildings, 56:8–22

⁵² Coninck, R. D. (2015). Grey-Box Based Optimal Control for Thermal Systems in Buildings – Unlocking Energy Efficiency and Flexibility. PhD thesis, KU LEUVEN, Arenberg Doctoral School Faculty of Engineering

⁵³ Pichler M. und Görtler G. undSchranzhofer H. (2016). Test buildings with TABS for MPC-performance evaluation - Comparability and System Identification. European Control Conference 2016

⁵⁴ Steindl G. und Stangl V. und Kastner W. (2018). Comparison of Thermal Lumped Capacitance Models for Model Predictive Control. 3rd South East European Conference on sustainable development of energy, water and enviromental systems.

⁵⁵ Sturzenegger D. (2014) Model Predictive Building Climate Control - Steps Towards Practice. Doktorarbeit, ETH Zürich

⁵⁶ <https://graz.pure.elsevier.com/en/organisations/institute-of-thermal-engineering-3070/publications/>

Die AEE - Institut für nachhaltige Technologien (**AEE INTEC**) beschäftigt sich mit der Erforschung naturwissenschaftlich-technischer Grundlagen der Solarenergienutzung, mit der Entwicklung von energieeffizienten Energieversorgungssystemen für Gebäude und Wärmeversorgungsgebiete sowie mit der Energieeffizienzsteigerung in industriellen Prozessen. Ein spezieller Fokus liegt in der Bearbeitung ganzheitlicher Betrachtungen und der Bewertung von domänenübergreifenden Versorgungsnetzen, Integration erneuerbarer Energieträger in netzgebundene Energiekonzepte, innovative thermische Energiespeicher und der Regelungsoptimierung von thermischen Systemen (z.B. prädiktive Regelung). Im Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART war die AEE INTEC federführend an der Entwicklung des instationären ökonomischen Modells, welches zur Bewertung der modellprädiktiven Regelung herangezogen wurde, beteiligt.

Im Bereich der mathematischen Modellierung als Basis für modellbasierte Regelungsstrategien hat BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH (**BEST**; vormals BIOENERGY 2020+, kurz BE2020) vor allem im Bereich von Biomassefeuerungen bereits viel Erfahrung gesammelt und basierend auf diesen Modellen mehrere fortschrittliche Regelungen entwickelt sowie an realen Anlagen mit sehr guten Ergebnissen implementiert. Im Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART wurde ein energiebasiertes, sektorübergreifendes, modellprädiktives Regelungskonzept für die Energiezentrale eines Stadtquartiers entwickelt, welches im COMET-Projekt Smart Heating Grids weiterentwickelt und real umgesetzt wurde, und zu Beginn der Projektlaufzeit gerade in ersten Inbetriebnahmeversuchen sowohl in einem Gebäudeverbund als auch an einem Industriestandort getestet wurde. Im Laufe des Projektes konnte die Regelung im Gebäudeverbund beinahe durchgehenden Betrieb vorweisen, und parallel fand eine Weiterentwicklung insbesondere im Bereich der Fernwärmenetzwerke statt (siehe u.a. das Projekt Vorzeigeregions-Projekt ThermaFLEX mit der Kopplung der Fernwärmenetze Tillmitsch, Leibnitz und Leibnitzerfeld).

TB-STARCHEL Ingenieurbüro-GmbH (**TB-STARCHEL**) ist seit mehr als 3 Jahrzehnten in der Gebäudetechnik und insbesondere dem Bereich Heizen/Lüften/Klima samt den zugehörigen Mess- und Regelungsaufgaben tätig, und verfügt somit über umfassende Markterfahrung zu den in diesem Projekt zu beleuchtenden wärmetechnischen – d.h. heiz-, klima- und lüftungstechnischen – sowie zugehörigen mess- und regelungstechnischen Fragestellungen.

Markus Nebel Handelsvertreter GesmbH (**MN**) ist seit 1996 mit der Erstellung und Umsetzung von Projekten im Bereich der Bauteilaktivierung tätig. Als Handelsvertreter der Firma UPONOR, dem Weltmarktführer in Bezug auf Bauteilaktivierung und Projektpartner im Vorprojekt solSPONGEhigh, verfügt Markus Nebel über jahrzehntelange Erfahrung mit erfolgreich durchgeführten Bauprojekten und den Feinheiten, positiven Aspekten und Schwierigkeiten beim Betrieb von aktivierten Bauteilen.

PMC - Gebäudetechnik Planungs GmbH (**PMC**) ist Spezialist für elektrische Gebäudetechnik bzw. Haustechnik und die zugehörige MSR-Technik und verfügt somit über umfassende Markterfahrung zu den in diesem Projekt theoretisch zu beleuchtenden elektrotechnischen sowie daraus abgeleiteten mess- und regelungstechnischen Fragestellungen.

ISWAT GmbH (**ISWAT**) ist seit über 10 Jahren in verschiedenen Bereichen der automatisierungstechnischen Praxis tätig und konzentriert sich dabei mitunter auch auf die Verbreitung von Sonderelektronik für spezifische Anwendungen und auch die Verbreitung von Softwarebibliotheken. Im Themenbereich des beantragten Projektes sind dabei Projekte im Bereich der industriellen Klimatechnik und insbesondere ein Forschungsprojekt im Bereich der Heizungsregelung unter Verwendung von Wetterprognosedaten zu erwähnen.

Die Firmen TB-STARCHEL und PMC sind die Planer der Energieversorgung der Quartiere 1 und 4a des Entwicklungsgebietes Graz-Reininghaus, welche in diesem Projekt teilweise exemplarisch betrachtet wurden. Sie und die Firma ISWAT haben zudem bereits im Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART mit ihrer Expertise eine kritische Analyse der Ergebnisse garantiert.

4 Projektinhalt

Das übergeordnete Ziel des Projektes ÖKO-OPT-AKTIV ist eine modellprädiktive Regelung für die thermische Bauteilaktivierung in den Gebäuden eines Stadtquartiers zu entwickeln und diese mit der im Projekt ÖKO-OPT-QUART entwickelten modellprädiktiven Regelung der Energiezentrale zu einer modellprädiktiven Gesamtregelung des Stadtquartiers auszubauen (Abbildung 4). Wie im Vorprojekt sollen darauf aufbauend detaillierte Simulationsstudien durchgeführt werden, um das Potential der entwickelten Methode aufzuzeigen. Im konkreten Fall geht es also darum, eine Aussage über das Energieverschiebungspotential – und damit indirekt Kosteneinsparungspotential – einer im Großen und Ganzen softwareseitigen Erweiterung eines existierenden Energiesystems zu treffen, um zukünftigen Interessenten an einem entsprechenden intelligenten Regelungskonzept eine Entscheidungsgrundlage liefern zu können und die Sinnhaftigkeit der Methode zu untermauern.

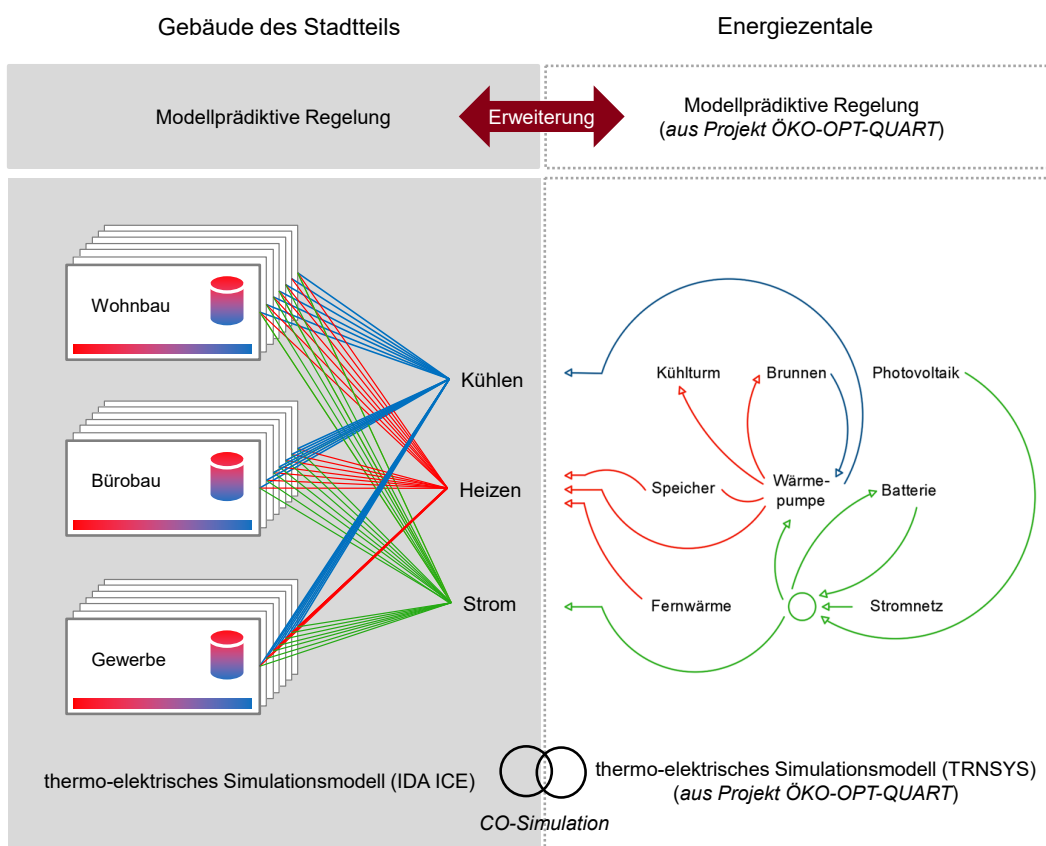


Abbildung 4: Modellprädiktives Regelungssystem der Energiezentrale aus dem Projekt ÖKO-OPT-QUART (rechts) und dessen Erweiterung auf die thermisch aktivierbaren Bauteile eines Stadtquartiers (links). In ÖKO-OPT-AKTIV wurde auf den Batteriespeicher sowie den thermischen Speicher in der Energiezentrale verzichtet, um sich ganz auf die Speicherwirkung der Gebäudemassen konzentrieren zu können.

Für das Erreichen dieses Zieles waren mehrere unterlagerte Ziele zu erreichen. An erster Stelle stand die Weiterentwicklung der modellprädiktiven Regelung, um thermische Modelle der individuellen thermischen Zonen (z.B. Räume mit Wohnraumregelungen) in der Einsatzplanung der Energiezentrale mit berücksichtigen zu können. Dies erforderte zunächst die Entwicklung entsprechender

vereinfachter thermischer Modelle, die einer Optimierung zugänglich sind, aber dennoch das reale Verhalten hinreichend genau widerspiegeln. Die größte Herausforderung hierin besteht in der Parametrierung der Modelle, also dem Ermitteln der thermischen Kapazitäten, Leitwerte und Wärmedurchgangskoeffizienten. In einem weiteren Schritt müssen die Freiheitsgrade der Optimierung festgelegt werden, also die Temperaturbänder, in welchen die einzelnen Zonen betrieben werden dürfen, und bestimmt werden, wie dies in der Optimierung abgebildet werden soll – vom Prinzip stehen dafür entweder strenge (Ungleichungs-)Nebenbedingungen oder „Bestrafungskosten“ zur Verfügung, welche eine Zonenverletzung mit höheren Betriebskosten gleichsetzen.

Die neuen Freiheitsgrade stellen der gesamtheitlichen Optimierung der Energiezentale mitsamt aller Gebäude die nötige Flexibilität zur Verfügung, um den Energiebedarf kurz- oder mittelfristig verschieben zu können und somit die Wärme- oder Kälteproduktion zu Zeiten mit niedrigen Energiekosten oder gar eigenem Solarertrag forcieren zu können. Dies resultiert in niedrigeren Betriebskosten und höherer Eigenbedarfsabdeckung durch erneuerbare Energien.

Für die Skalierung auf Quartiersebene musste untersucht werden, ob und wie eine zentrale, globale Optimierung, welche mit der Vielzahl der einzelnen, zu optimierenden Zonen überfordert sein könnte, durch Methoden der verteilten Optimierung auf Quartiersebene hochskaliert werden kann. Die größte Herausforderung dabei ist die nicht garantierte Konvergenz der Verfahren bei nicht-konvexen Optimierungsproblemen (wie es gemischt-ganzzahlige Optimierungsprobleme von Natur aus sind). Es wurden Modifikationen an den Algorithmen vorgenommen, die das Konvergenzverhalten verbessern, aber dennoch nicht vollständig garantieren können. Für den praktischen Einsatz erwiesen sie sich jedoch als durchaus tauglich.

Um den Ergebnissen mehr Gewicht zu verleihen, beziehungsweise deren Glaubwürdigkeit zu erhöhen, müssen die entsprechenden Regelstrategien zumindest in einem realitätsnahen, detaillierten thermo-elektrischen Gesamtmodell des Quartiers validiert werden. Dazu wurde das Speicherverhalten thermisch aktivierter Bauteile eines ganzen Stadtteils detailliert in einem bereits validierten Simulationsprogramm, IDA ICE von EQUA Simulation AB, nachgebildet. Eine zentrale Herausforderung war die große Anzahl der Einzelsysteme und deren Modellierung in einem einzigen Simulationsmodell. Um den zeitlichen Aufwand bei den Simulationsstudien zu minimieren, wurde erarbeitet, wie die bis ins Detail der Einzelräume aufgelösten Modelle einzelner Stockwerke und Gebäude aggregiert werden können, ohne wesentlichen Detailverlust in den Ergebnissen befürchten zu müssen. Hierbei wurden detaillierte Modelle zur Validierung der aggregierten Modelle herangezogen.

Die Entwicklung der Simulationsumgebung und deren modellprädiktiver Regelung wurde anhand eines konkreten Quartiers in Graz-Reininghaus durchgeführt. Das gesamte Quartier Q1 wurde basierend auf zu Projektbeginn gültigen Plandaten abgebildet, wobei unterschiedliche Gebäude zur Performanceverbesserung in unterschiedlichen Detailgraden abgebildet wurden. Die Gebäude wurden, da dies in den Originalplänen nicht so vorgesehen war, optional um aktivierte Bauteile erweitert. Die so erstellten Modelle wurden für eine Validierung der modellprädiktiven Regelung vorbereitet und entsprechende Schnittstellen für die Co-Simulation mit der Optimierung bereitgestellt.

Ergänzend zum energietechnischen Modell wurde ein ökonomisches Modell für den gegebenen Energieverbund unter der speziellen Berücksichtigung gebäudeimmanenter Energiespeicher entwickelt. Zu diesem Zweck werden die bestehenden ökonomischen Modelle aus ÖKO-OPT-QUART um die einzelnen Komponenten der dezentralen Gebäudetechnik sowie der dezentralen Wärme- und

Kältespeicher weiterentwickelt, welche die gesamten Lebenszykluskosten, also Investitionskosten wie auch betriebsabhängige Kosten bis hin zu Entsorgungskosten berücksichtigen.

Mit Hilfe der thermischen und ökonomischen Modelle wurde die modellprädiktive Regelung von Energiezentrale und einzelnen Zonen in zahlreichen Simulationsstudien untersucht und bewertet. Hier war das ausdrückliche Ziel, die durch vorausschauende Regelung erreichbaren Vorteile einerseits quantitativ beschreiben zu können, aber auch kritisch zu hinterfragen und mögliche Schwachstellen aufzuzeigen. Daher wurden auch Szenarien untersucht, in denen die Optimierung zu Nachteilen führen kann (z.B. bei unerwarteten Ausfällen der Energiezentrale).

5 Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes sind im Folgenden angeführt und an die ausgearbeiteten *Deliverables* angelehnt, was durch den Zusatz in Klammer am Ende jedes Titels angedeutet wird („Dx.y“, wobei x das Arbeitspaket und y die Nummer des Deliverables darstellt). Sie stellen einen Beitrag zum Themenfeld „Digitales Planen, Bauen und Betreiben“ des Programmes „Stadt der Zukunft“ dar. Die Simulation von thermisch aktivierten Gebäudeverbänden, sowie die ökonomische Bewertung der Energieversorgung, liefert einen Beitrag zum digitalen Planen, die modellprädiktive Regelung kann den Betrieb sowohl ökonomischer als auch ökologischer gestalten und unterstützt somit die strategischen Ziele des nachhaltigen Energiesystems genauso wie der Reduktion der Klimawirkung. Mit dem resultierenden Know-how wird zudem eine Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Planer:innen und Automatisierungsunternehmen sowie natürlich der wissenschaftlichen Organisation erreicht.

5.1. Thermische Modellierung von thermisch aktivierten Gebäudeverbänden (D2.1)

Zur thermischen Modellierung der thermisch aktivierten Gebäudeverbände wird die Software „IDA ICE“ (EQUA Simulation AB, 2022) verwendet, mit der sich sowohl das bauphysikalische Verhalten des Gebäudes als auch die Anlage zur Energieversorgung abbilden lässt. Es handelt sich dabei um eine dynamische und multizonale Simulationsmethode, mit der es möglich ist, einen „virtuellen Zwilling“ eines realen Quartiers zu erzeugen. Koppelt man über eine spezielle Schnittstelle ein Gebäude- und Anlagensimulationsmodell mit einem neu entworfenen Regler oder Regelalgorithmus, kann man bereits vor der realen Umsetzung des Bauvorhabens detaillierte Aussagen über die Wirksamkeit bestimmter Regelstrategien in Kombination mit der geplanten Anlage zur Energieversorgung treffen und im Zweifelsfall auch noch Änderungen in der Regelung und in der Anlage selbst vornehmen.

Eine solche gekoppelte Simulation wurde am Bauvorhaben „ENW-Reininghaus-Q1“ getestet, welches sich während der Projektlaufzeit in der Bauphase befand (siehe Abbildung 5). Der Gebäudeaufbau (Wandaufbauten, Boden und Deckenaufbau) wurde mit Hilfe der Daten aus dem bauphysikalischen Nachweis der Bauphysiker (Rosenfelder & Höfler consulting engineers GmbH, 2020) in der Simulationssoftware IDA ICE umgesetzt. Die Gebäudegrundflächen wurden anhand der Grundrisse und Geschossflächen aus dem Hauptschema zur Energieversorgung für das Quartier Q1 (TB-STARCHEL Ingenieurbüro-GmbH, 2020) im Simulationsmodell umgesetzt.

Für das Bauvorhaben „ENW-Reininghaus-Q1“ sind 10 Gebäude geplant (bestehend aus acht neuen und zwei renovierten Gebäuden), die über eine Energiezentrale mit warmem Wasser zum Heizen und Warmwasserbereitung oder mit kaltem Wasser zum Kühlen versorgt werden. Täglich gibt es dabei zwei Zeitfenster, in denen die Heizung bzw. Kühlung deaktiviert wird und die Beladung der dezentralen Warmwasserspeicher stattfindet, sofern dies notwendig ist. Die Beladung der Warmwasserspeicher erfolgt in diesem Fall über dasselbe Verteilnetz, das auch zum Heizen und Kühlen verwendet wird.

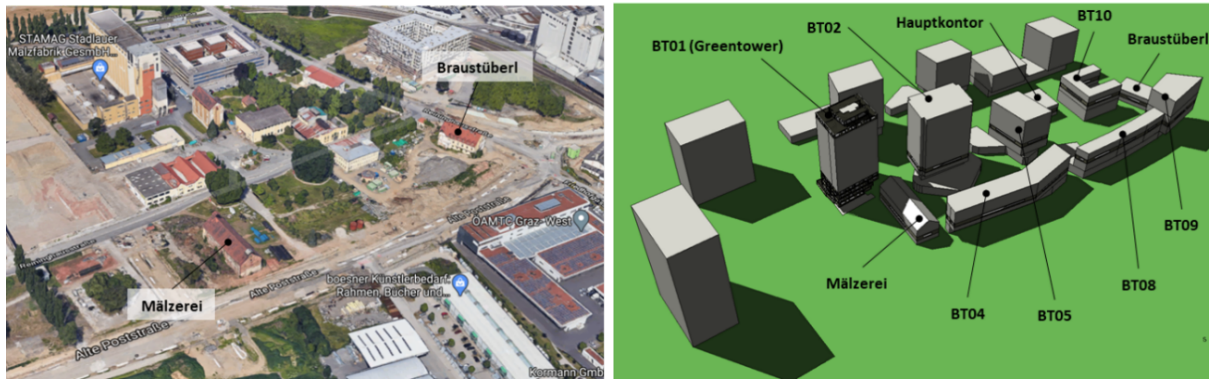


Abbildung 5: Links: Foto des Baugrunds für das Bauvorhaben „ENW-Reininghaus-Q1“ (Quelle: <https://www.google.at/maps>). Rechts: 3D-Modell von Q1 in der Simulationsumgebung IDA ICE.

Aus der Planübersicht des Q1, die in Abbildung 6 dargestellt ist, geht hervor, wie viele Stockwerke ein Gebäude besitzt. Zusätzlich gibt es eine Aufteilung der Nutzung der Fläche des gesamten Gebäudes in m² für Büro/Gewerbe und für das Wohnen. Außerdem ist diesem Plan die flächenspezifische Heiz- und Kühlleistung für Büro und Wohnungsnutzung angeführt, die in allen Gebäudemodellen umgesetzt wurde. Für die Wohnungsnutzung beträgt die geplante flächenspezifische Heizleistung 50 W/m², für die Büro- bzw. Gewerbenutzung hingegen 60 W/m². Die flächenspezifische Kühlleistung beträgt laut Plan 25 W/m² für Wohnungen und 80 W/m² für Gewerbe und Büros.

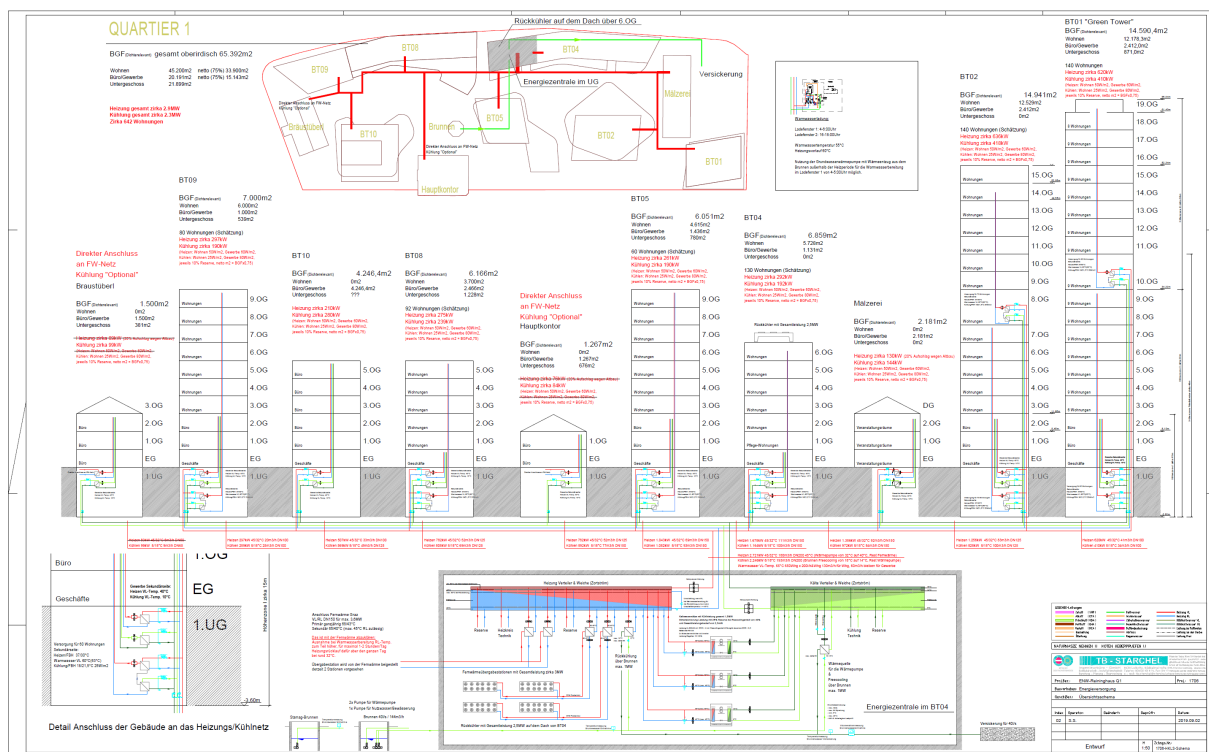


Abbildung 6: Energieversorgungs-Hauptschema des Bauvorhabens „ENW-Reininghaus-Q1“ (TB-STARCHEL Ingenieurbüro-GmbH, 2020)

In dieser gezeigten Quartiers-Übersicht sind auch die wichtigste Information über die Energieversorgung des Areals in Form eines groben Fließbildschemas enthalten. In Tabelle 1 sind die für das Simulationsmodell wichtigsten Eckdaten zusammengefasst.

Tabelle 1: Eckdaten der Gebäude des geplanten Bauvorhabens „ENW-Reininghaus-Q1“

Gebäude	Geschosse	Bruttogeschossfläche <i>m²</i>	Büro/Gewerbe <i>m²</i>	Wohnen <i>m²</i>	Heizen <i>kW</i>	Kühlen <i>kW</i>
BT01 (Greentower)	20	14590	2412	12178	620	410
BT02	16	14941	2412	12529	636	418
Mälzerei	3	2181	2181	-	130	144
BT04	7	6859	1131	5728	292	192
BT05	10	6051	1436	4615	261	190
Hauptkontor	2	1267	1267	-	Fernwärme	84
Braustüberl	4	1500	1500	-	Fernwärme	99
BT08	6	6166	2466	3700	275	239
BT09	10	7000	1000	6000	297	190
BT10	6	4246	4246	-	210	280

Um die Berücksichtigung von internen Wärmelasten in den Zonen über den Tag variabel zu gestalten, sind in den Modellen mehrere Nutzungsprofile definiert. Diese werden in der Software IDA ICE „*Time Schedules*“ genannt, ein paar exemplarische Lastverläufe sind in Abbildung 7 dargestellt. Der definierte Wert aus diesen *Schedules* dient als Multiplikator für die je Zone und Kategorie als maximal auftretende definierte Wärmelast. Liegt der Wert in den *Time Schedules* bei „1“, tritt zu diesem Zeitpunkt die volle Wärmelast in dieser Kategorie (Personen, elektronische Geräte oder Beleuchtung) auf. Bei einem Wert von „0“ wird von dieser Kategorie keine Wärmebelastung berücksichtigt.

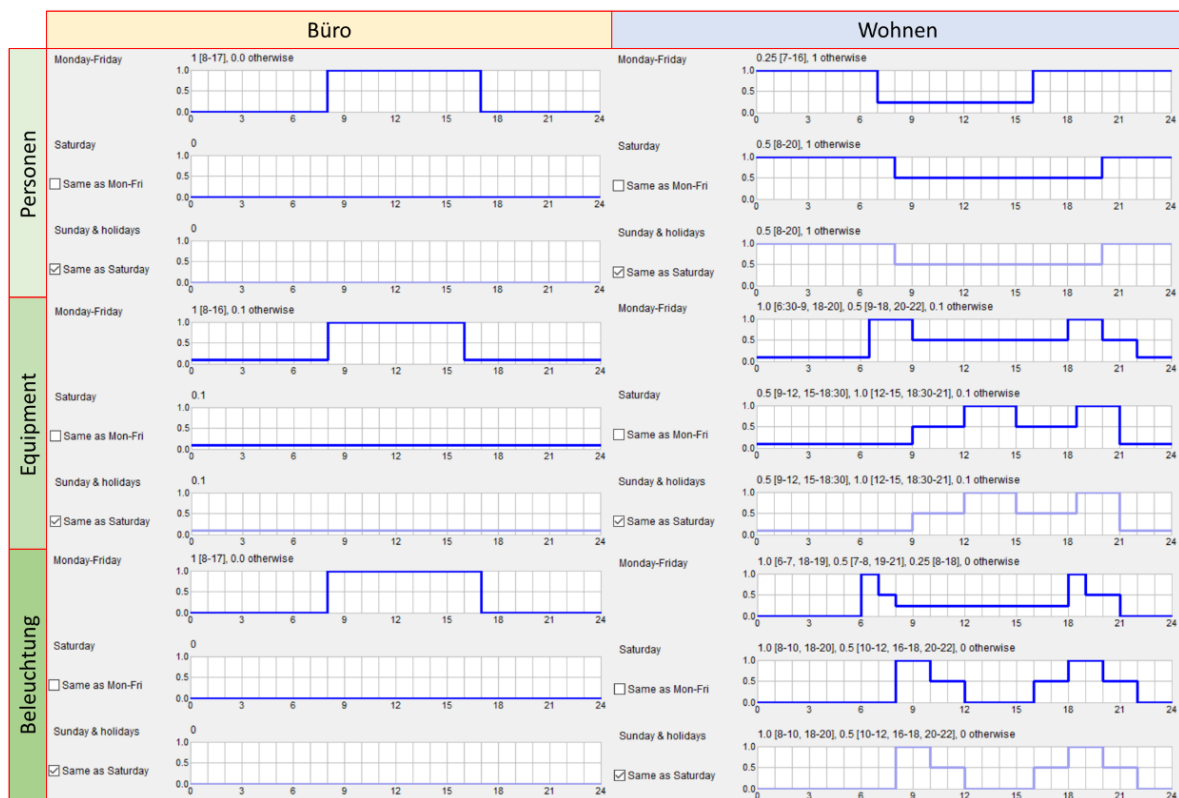


Abbildung 7: Darstellung der vordefinierten Lastverläufe (interne Wärmelasten) für Personenanwesenheiten, elektronische Geräte und Beleuchtung in den Zonen mit Büro- und Wohnungsnutzung, wie sie im Modell mit dem Detaillierungsgrad 1 verwendet werden.

Grundsätzlich wurde versucht, in Summe ein mögliches realistische Nutzerverhalten für Büros und Wohnen festzulegen. In der Praxis gestalten sich die Zusammenhänge noch komplexer und könnten z.B. mit zufällig generierten Lastfällen simuliert werden (dies ist aber nicht Inhalt dieses Forschungsprojekts). Es besteht aber zumindest die Möglichkeit, die Nutzungsprofile nachträglich über

die Schnittstelle in der Regelung zu verändern, um die Auswirkung von Änderungen der internen thermischen Lasten in einer Zone detailliert betrachten zu können.

Mit Hilfe der Software IDA ICE lässt sich das thermische Verhalten von einzelnen Räumen, Wohnungen, eines Gebäudegeschosses, eines ganzen Gebäudes oder sogar eines ganzen Stadtteils darstellen, wenn man entsprechende Vereinfachungen (Reduktion des Detaillierungsgrades) im Modell trifft. Im Rahmen des Projektes wurden Modelle mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad erstellt, welche in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden; für die langfristigen Simulationen gemeinsam mit dem Energiemanagementsystem wurde das vereinfachte Modell des gesamten Stadtquartiers herangezogen, da es die wesentlichen Dynamiken hinreichend genau abbildete.

Grundsätzlich gibt es für alle in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Simulationsmodellen zwei Ausführungen, die sich in der Art der thermischen Konditionierung der Gebäude unterscheiden:

1. Alle thermischen Zonen besitzen eine Fußbodenheizung über welche auch die Möglichkeit besteht, die thermische Zone zu kühlen. Die Verlegetiefe der Rohrleitungen im 6 cm starken Zementestrich beträgt 3 cm.
2. In der zweiten Variante wurde eine Bauteilaktivierung modelliert, in der die Rohrleitungen in 10 cm Tiefe im Betonboden verlegt sind.

5.1.1. Gebäudemodell - Detaillierungsgrad 1 (einfach)

Im ersten Modell, das aus den Bauplänen von „ENW-Reininghaus-Q1“ abgeleitet wurde, wurden die größten Vereinfachungen getroffen. Für jedes Gebäude, in dem sich sowohl Büros als auch Wohnungen befinden, wurden im Modell zwei thermische Zonen abgebildet. Das heißt, dass es je Gebäude für jede Nutzungsart je ein Modell der thermischen Zone, die das entsprechende Nutzungsverhalten repräsentiert, gibt (siehe Abbildung 8). Von den 10 Gebäuden gibt es vier, in denen keine Wohnungen vorgesehen sind, es sind dort nur Büros vorgesehen und benötigen daher nur eine thermische Zone im Modell (BT10, Braustüberl, Hauptkontor und Mälzerei; siehe Abbildung 8).

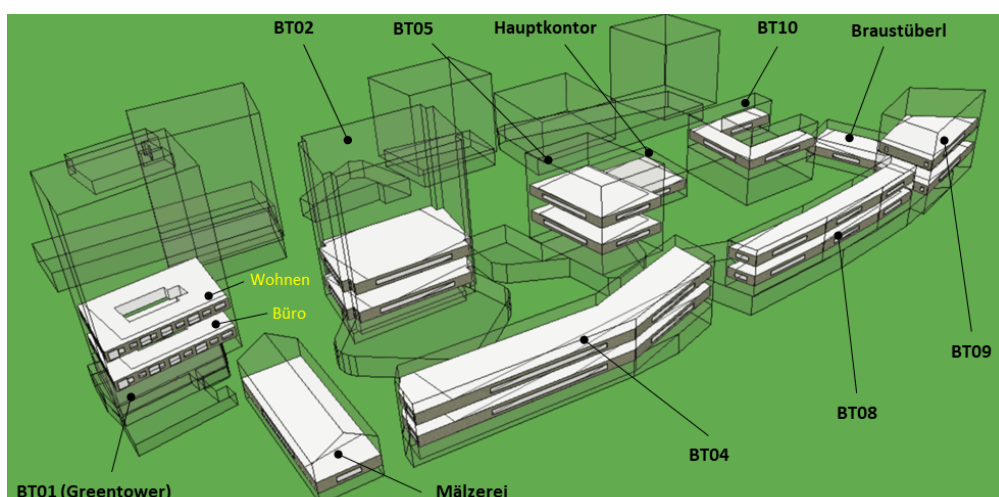


Abbildung 8: 3D Modell des Gebäudemodells - „ENW-Reininghaus-Q1“ im Detaillierungsgrad 1

Ursprünglichen war nur eine Zone je Gebäude vorgesehen, für die ein gemischtes Verhalten aus Wohn- und Büronutzung ermittelt bzw. abgeschätzt wurde und die das thermische Verhalten für das gesamte

Gebäude repräsentieren sollte. Da dadurch jedoch relevante Leistungsspitzen zu stark gedämpft wurden, musste diese zusätzliche Vereinfachung der Modellierung verworfen werden.

Gemäß der Aufteilung (Flächenanteile Büro/Gewerbe und Wohnen in m²) in Tabelle 1 wird über den in der Simulationssoftware verfügbaren Zonenmultiplikator die gesamte geplante Nutzfläche auf Quartiersebene in der Simulation aufsummiert betrachtet. Das Gebäudemodell mit dem Detaillierungsgrad 1 (einfach) besteht demnach aus 16 simulierten thermischen Zonen, wobei in den Zonen die Fenster vereinfacht dargestellt werden, da alle Fensterflächenanteile je Zone von je einem Fenster je Fassade und Himmelsrichtung repräsentiert werden. Tabelle 2 zeigt die so ermittelten Zonenmultiplikatoren sowie den Vergleich von Bruttogeschossfläche, Heiz- und Kühlleistung zwischen Modell und Plandaten.

Der Vorteil dieses Modells besteht in den kurzen Rechenzeiten: Für die Berechnung des Verhaltens eines ganzen Jahres benötigt man mit diesem Modell ca. 30 Minuten (Notebook mit 2,6 GHz Prozessorleistung). Auch wenn man dadurch auf Informationen über das Detailverhalten einzelner Wohnungen verzichtet, bekommt man einen sehr guten Überblick über das thermische und energetische Verhalten auf Quartiersebene. Dieses Modell eignet sich unter anderem auch, um möglichst viele unterschiedliche Regelstrategien auf Quartiersebene zu entwickeln und testen zu können.

Tabelle 2: Vergleich von Bruttogeschossfläche, Heiz- und Kühlleistung zwischen Modell und Plandaten.

Gebäude	Bruttogeschossfläche [m ²]			Ermittelte Zonenmultiplikatoren		Heizleistung in [kW]				Kühlleistung in [kW]			
	Gebäudemodell		Plandaten	Büro	Wohnen	Gebäudemodell			Plandaten	Gebäudemodell			Plandaten
	Geschoss	Gesamt	Gesamt			Büro	Wohnen	Gesamt	Gesamt	Büro	Wohnen	Gesamt	Gesamt
BT01	586	14591	14590	4.5	19.0	29.9	24.9	608	620	39.8	12.5	416	410
BT02	919	14941	14941	2.6	13.6	44.9	38.4	641	636	59.8	19.2	419	418
Mälzerei	732	2181	2181	3.0	-	44.0	-	131	130	48.9	0.0	146	144
BT04	1296	6859	6859	0.7	4.5	66.1	55.1	300	292	88.1	27.5	191	192
BT05	624	6051	6051	2.3	7.4	31.2	26.0	264	261	41.6	13.0	192	190
Hauptkontor	611	1267	1267	2.1	-	-	-	-	-	40.7	0.0	84	84
BT08	651	6166	6166	3.8	5.7	32.0	26.9	274	275	42.7	13.5	238	239
BT09	626	7000	7000	1.6	9.6	31.4	26.2	301	297	41.9	13.1	192	190
BT10	575	4246	4246	7.4	-	28.7	-	212	210	38.3	0.0	283	280
Braustüberl	470	1500	1500	3.2	-	-	-	-	-	31.0	0.0	99	99

5.1.2. Gebäudemodell - Detaillierungsgrad 2 (detailliert)

Basierend auf dem Simulationsmodell im Detaillierungsgrad 1 wurde für ein Gebäude (BT01, Greentower) eine detailliertere Zonierung vorgenommen (siehe Abbildung 9). Die Büros und das Gewerbe in den ersten 3 Geschossen wurden jeweils in einer Zone dargestellt. Für die Wohnungen in OG03 und OG04 wurde jede einzelne Wohnung ebenfalls mittels je einer thermischen Zone abgebildet. Laut Plan ist der Grundriss der Wohnungen von OG04 bis OG17 ident, was bedeutet, dass die Wohnungen von OG05 bis OG17 mittels Zonenmultiplikator aller Zonen aus OG04 im Modell berücksichtigt werden können, ohne Details in dessen thermischen Verhalten einzubüßen. Die beiden letzten Stockwerke des Greentowers weisen in der Zonierung wieder Unterschiede zur Aufteilung in OG04 auf und es wird wiederum je eine thermische Zone für jede Wohnung modelliert.

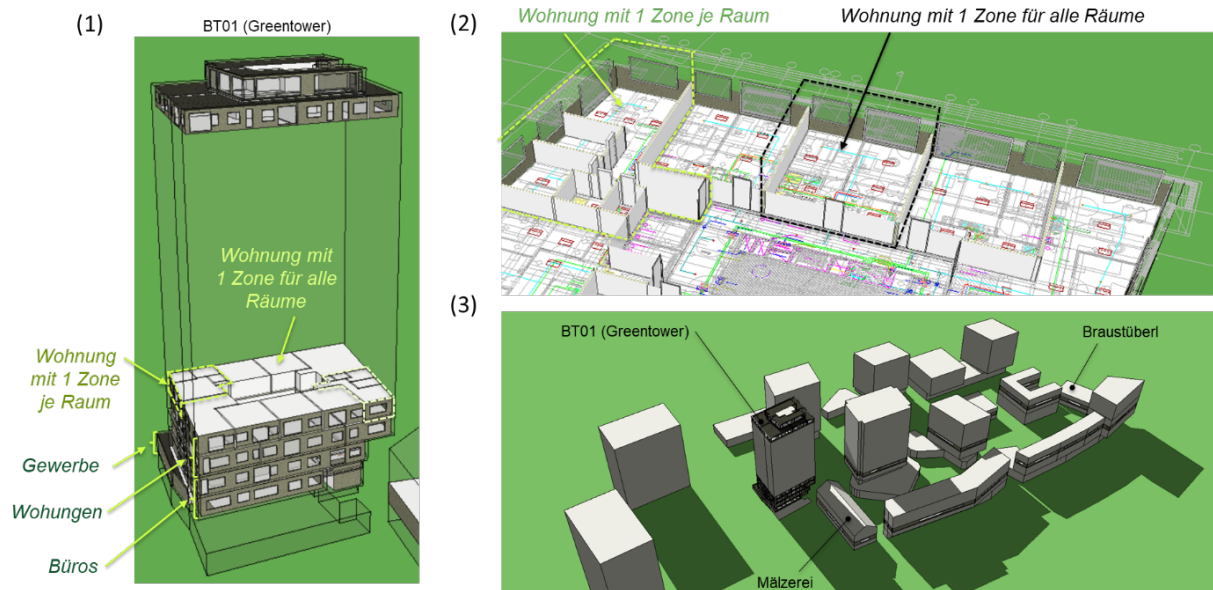


Abbildung 9: Ausschnitte vom 3D Modell des Gebäudemodells des „ENW-Reininghaus-Q1“ im Detaillierungsgrad 2 - (1) Greentower, (2) Zonierung der Wohnungen, (3) gesamtes Quartier Q1

Um zusätzlich auch das thermische Verhalten der einzelnen Räume innerhalb einer Wohnung betrachten zu können, wurde exemplarisch für 2 Wohnungen aus OG04 der Detailgrad weiter erhöht und je eine thermische Zone für jeden Raum gebildet. Eine Verfeinerung weiterer Wohnungen im Modell war aufgrund der Annäherung an die in der Software gegebenen Grenzen (Limitierung des Arbeitsspeichers für IDA ICE) nicht zielführend.

Für alle modellierten Wohnungen bzw. Büros wurden die Grundrisse aus den Bauplänen übernommen, wobei auch die Fenster laut Plan detailliert für BT01 positioniert wurden. In Summe ergeben sich so für das Simulationsmodell im Detaillierungsgrad 2 in Summe 51 thermische Zonen. Mit diesem Modell kann nicht nur das thermische Verhalten auf Quartiersebene virtuell nachgebildet werden, sondern auch repräsentativ und exemplarisch die thermische Dynamik innerhalb von Gebäuden, Geschossen und Wohnungen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Regelstrategien lassen sich in diesem Fall somit für einzelne Räume darstellen, allerdings sind aufgrund der längeren Berechnungsdauer nur wenige Tests unterschiedlicher Regelstrategien möglich. Auf einem Notebook mit 2,6 GHz Prozessorleistung liegt für diese Variante die Dauer einer Jahressimulation bei ca. 3,5 Stunden.

5.1.3. Gebäudemodell – Zusatzmodelle

Aufgrund des Interesses an der raumweisen Betrachtung und um dafür möglichst viele Varianten in der Regelung des thermischen Verhaltens betrachten zu können, wurden die beiden Wohnungen aus dem Modell Detaillierungsgrad 2 extrahiert und daraus jeweils ein Zusatzmodell für weitere Untersuchungen erstellt. Für die Berechnung des Verhaltens für ein Jahr benötigt man mit diesen Modellen ca. 1 Minute (Notebook mit 2,6 GHz Prozessorleistung).

Im Unterschied zu den anderen Simulationsmodellen ist hier in diesen Modellen auch der Warmwasserverbrauch und die Beladung der Warmwasserspeicher im Anlagenmodell integriert.

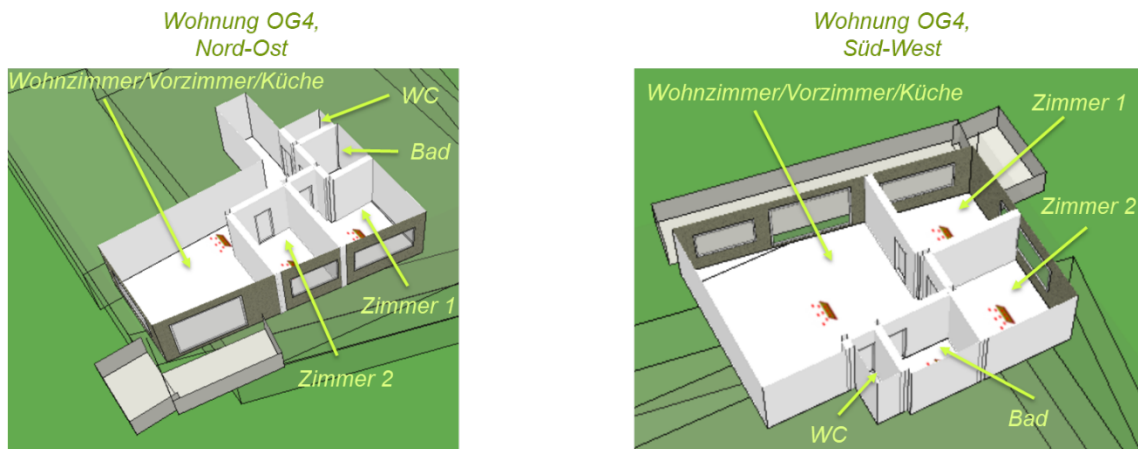


Abbildung 10: Ausschnitt (der 3 D Modelle) aus den Simulationsmodellen der beiden Wohnungen aus dem BT01 (Greentower)

Diese detaillierten Modelle dienen hauptsächlich der Entwicklung der Zonenregler (siehe Abschnitt 5.4).

5.2. Energetische Modellierung eines Stadtquartiers (D2.2)

Die energetische Modellierung des Stadtquartiers umfasst die Abbildung der Energiezentrale sowie die Wärme- und Kälteversorgung der einzelnen Gebäude. Als Wärme- bzw. Kältequellen kommen dabei entsprechend der ursprünglichen Pläne für das Quartier in Reininghaus Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen zum Einsatz, welche über spezielle hydraulische Weichen der Marke Zortström⁵⁷ Wärme bzw. Kälte in das Nahwärmenetz einspeisen. Als Wärmequelle bzw. -senke wird lokales Grundwasser über einen Brunnen genutzt, wobei hier die Leistungsaufnahme und -abgabe ebenso wie die Temperaturen limitiert sind. Der Brunnen kann auch – unter Umgehung der Kältemaschine – für sogenanntes *freecooling* herangezogen werden. Im Sommer steht zur Rückkühlung überdies ein Kühlturm zur Verfügung, der elektrisch angetrieben wird.

Der Warmwasserbedarf wird abgedeckt, indem die Warmwasserspeicher der enerboxx'en in den jeweiligen Wohneinheiten zweimal täglich innerhalb vorbestimmter Zeitfenster aufgeladen werden. Dafür ist ein höheres Temperaturniveau nötig als für die Versorgung der Heizungen; im Sommer müssen bei den Wohneinheiten mangels Vierleitersystem die Rohre ganz vom Kühlbetrieb in den Warmwasserbetrieb umgestellt werden (die kommerziellen Einheiten verfügen über eine Vierleiterversorgung und müssen teilweise gleichzeitig gekühlt und beheizt werden). Zur Abdeckung dieses höheren Temperaturniveaus und allfälliger Spitzenlasten ist neben den Wärmepumpen eine Anbindung an das Fernwärmenetz der Stadt Graz vorgesehen, wo unter anderem Abwärme aus dem naheliegenden Stahl- und Walzwerk Marienhütte genutzt wird.

⁵⁷ <https://www.zortea.at/produkte/zortstroem/>

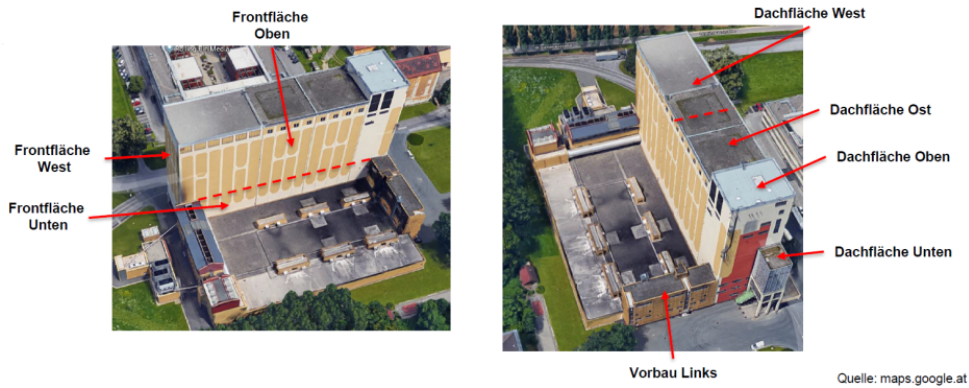


Abbildung 11: Turm der Mälzerei und für die Photovoltaik berücksichtigte Flächen.

Für die elektrische Versorgung der Kompressionswärmepumpen bzw. Kältemaschinen wird laut Planung Strom aus dem Städtetz bezogen. Bereits im Vorprojekt wurde zudem die Ausstaffierung des am Gelände stehenden Turmes der ehemaligen Mälzerei mit Photovoltaik-Paneele untersucht. Im Gegensatz zum Vorprojekt wurde in ÖKO-OPT-AKTIV auf die Abbildung des elektrischen Lastprofils der Gebäude verzichtet, da der Betreiber der Energiezentrale im Allgemeinen nicht als Stromversorger der Mietparteien auftritt. Daher wurde in diesem Projekt davon ausgegangen, dass der Solarertrag alleine der Versorgung des Energiebedarfs der Energiezentrale dient und überschüssiger Strom in das Stromnetz eingespeist wird. Dies hat aus Sicht des Forschungsgegenstandes den wesentlichen Vorteil, dass eine aktive Verschiebung der thermischen Lasten nun direkt zu einem monetären Vorteil führen kann, wenn dadurch der Eigenverbrauch erhöht wird. Würden die elektrischen Lasten der Gebäude mitberücksichtigt, würde es – bis auf wenige Ausnahmen im Sommer – nie zu einer Überschussleistung kommen, sondern der Eigenbedarf würde den Ertrag meist übersteigen. Der Mehrwert der Flexibilisierungsmaßnahmen wäre damit deutlich geschmälert.

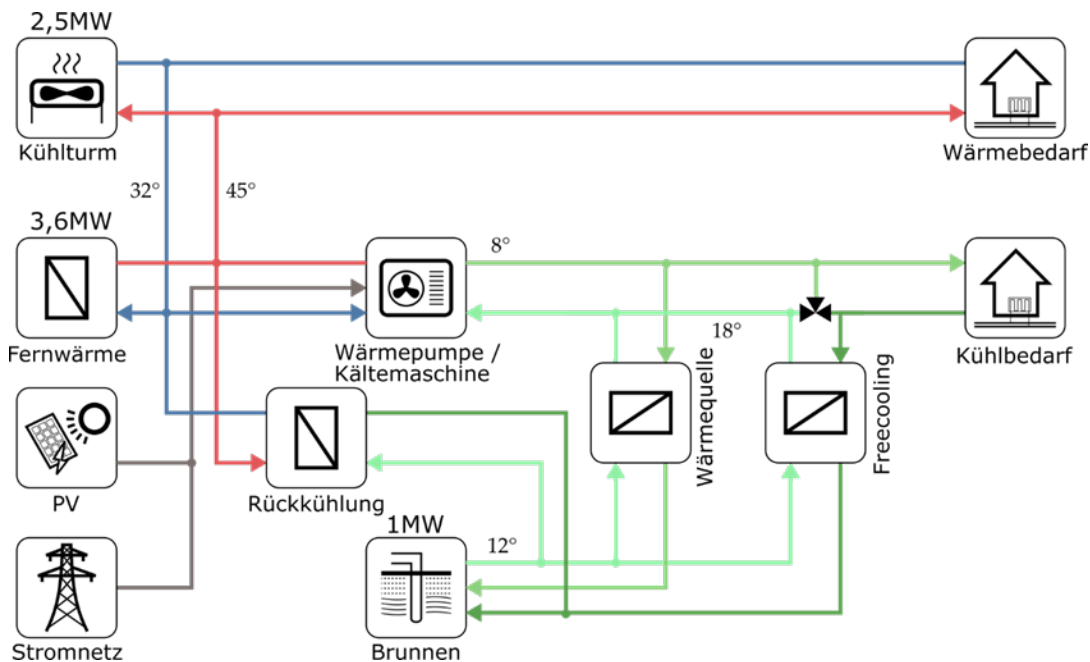


Abbildung 12: Schematische Abbildung der in der Optimierung berücksichtigten Energiezentrale. Der Wärme- und Kühlbedarf können durch aktive Lastverschiebung beeinflusst werden. Das Ertragsprofil aus der Photovoltaik ergibt sich aus der solaren Einstrahlung.

Die Simulation der geplanten Energieversorgung für das Quartier „ENW-Reininghaus-Q1“ erfolgt wie die des bauphysikalischen Modells mit der Software IDA ICE. Auch hierfür werden die Daten aus dem Übersichtsschema-Energie, das in Abbildung 6 dargestellt ist, genutzt, um die für das Quartier geplante zentrale Energieversorgung so realitätsgetreu wie möglich nachzubilden. Ähnlich wie beim Gebäudemodell gibt es auch hier ein vereinfachtes und ein detailliertes Modell.

5.2.1. Anlagenmodell einfach

Im einfachen Anlagenmodell gibt es lediglich zwei Anlagenblöcke, über welche die verfügbare Energie zum Heizen (max. 2,9 MW; COP = 4,0) und Kühlen (max. 2,3 MW; EER = 6,5) jederzeit bereitgestellt werden kann.

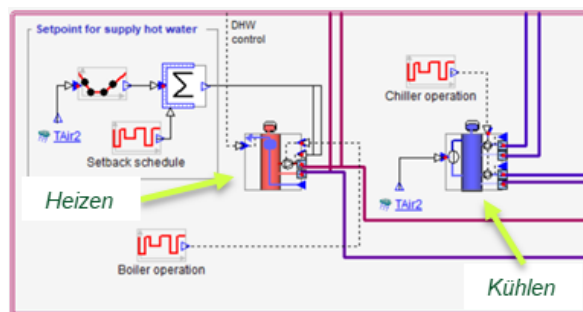


Abbildung 13: Blockschaltenschema des vereinfachten Anlagenmodells in IDA ICE

Über sogenannte „Time Schedules“ (das sind die Blöcke mit der Bezeichnung *Boiler- und Chiller-Operation* im Anlagenschema in Abbildung 13) erfolgt die Steuerung zur Energiebereitstellung. Zum Beispiel ist dort die tägliche Deaktivierung des Heiz- und Kühlsystems zur Warmwasserbeladung zwischen 4 und 6 sowie 16 und 18 Uhr enthalten. Da die Beladung der Warmwasserspeicher ausschließlich über die Fernwärme erfolgt, werden die Warmwasserspeicher und auch der Warmwasserverbrauch in den Simulationsmodellen nicht mit betrachtet.

5.2.2. Anlagenmodell detailliert

Im detaillierten Anlagenmodell wurde in IDA ICE das sogenannte „ESBO-Plant“-Tool verwendet, welches das einfache Anlagenmodell aus Kapitel 5.2.1 ersetzt. Dieses Tool bietet eine bestimmte Auswahl von Anlagenkomponenten, die, je nachdem welche Auswahl getroffen wird, die gewählten Komponenten miteinander kombiniert und ein fertiges Anlagenmodell erstellt, wie es in Abbildung 14 dargestellt ist. Obwohl das Anlagenmodell in dieser automatisch generierten Version bereits funktionsfähig ist, müssen bzw. können noch eine große Zahl an Parametern angepasst werden bzw. sogar Komponenten hinzugefügt werden, falls dies zur Adaptierung der zu realisierenden Anlage notwendig sein sollte.

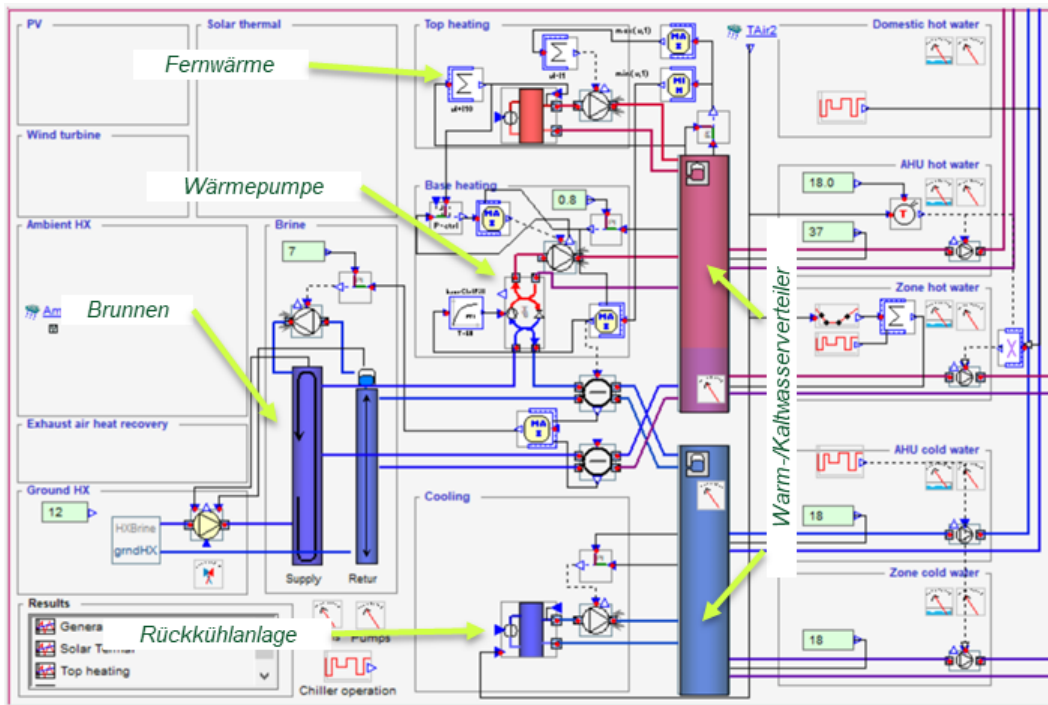


Abbildung 14: Blockschaltenschema des detaillierten Anlagenmodells in IDA ICE, erstellt mit Hilfe des ESBO-Plant Tools

Die folgenden sechs Anlagenkomponenten wurden in der Modellierung der Energiezentrale für das Quartier „ENW-Reininghaus-Q1“ umgesetzt:

- Fernwärmeversorgung
- Wärmepumpensystem
- Brunnenanlage
- Rückkühlanlage
- Warm- und Kaltwasserverteilsystem
- Lüftungsanlage (ist nicht im ESBO-Plant Modell enthalten, es gibt dafür ein eigenes Modell)

Grundsätzlich gibt es in jedem ESBO-Plant Modell einen Warmwasser- und einen Kaltwasserspeicher, über welche die Energieversorgung zur Konditionierung der Zonen des Gebäudemodells bewerkstelligt wird. In diesem Anlagenmodell sind die Speicher so dimensioniert, sodass sie lediglich als hydraulische Weiche von Heiz- und Kühlwasser dienen. Von diesen als Verteiler konfigurierten Speichermodellen sind die Sollvor- und -rücklauftemperaturen zum Heizen und Kühlen der Gebäude in den Plandaten des Anlagenmodells vorgegeben. Für das Heizen beträgt die Vorlauftemperatur 37 °C, zum Kühlen ist eine Vorlauftemperatur von 18 °C im Modell vorgesehen.

Die drei Wärmepumpen zu je 600 kW wurden mittels eines bestehenden Wärmepumpenmodells abgebildet, das in der Software IDA ICE zur Verfügung steht. Die Wassertemperaturen für Vor- und Rücklauf auf Kondensatorseite (VL = 40 °C, RL = 45 °C) und Verdampferseite (VL = 14 °C, RL = 8 °C) des Wärmepumpenmodells wurden entsprechend der Plandaten im Modell realisiert.

Weiters steht im IDA ICE ESBO Plant Modell ein Erdreich-Wasserspeicher-Modell zur Verfügung, welches in dieser Anlage genutzt wird, um den Brunnen, der für die Energiezentrale geplant ist, in der Simulation mitberücksichtigen zu können.

Zudem ist auch die geplante Rückkühlanlage am Dach der Energiezentrale mit einer Kühlleistung von 3,0 MW im Anlagenmodell integriert.

Der Effekt der Anbindung ans Fernwärmenetz ist ebenfalls im Anlagenmodell integriert, dazu wurde ein Heizkesselmodell mit einer Heizleistung von 3,6 MW verwendet, das je nach Bedarf ein Heizungsmedium zur Verfügung stellt, wie es über das Fernwärmenetz bewerkstelligt werden würde.

Für die Lüftung bzw. zur Berücksichtigung von Lüftungseffekten gemäß den vorgeschriebenen Luftwechselraten in der Simulation gibt es parallel zum verwendeten ESBO-Plant Modell noch ein Lüftungsanlagenmodell. Die Luftwechselraten (0,4-facher Luftwechsel für Wohnen und 1,5-facher Luftwechsel für Büros) werden dabei in den jeweiligen Zonen im Gebäudemodell definiert.

5.2.3. Schnittstelle zur Regelung

Es gibt in der Software IDA ICE die Möglichkeit, über eine speziell dafür entwickelte Schnittstelle mit Programmen von außerhalb der Software auf die laufende Simulation Einfluss zu nehmen, indem Routinen in einer 32bit DLL aufgerufen werden. Vor der Einbindung des Reglers wurde die Schnittstelle mit Hilfe eines Matlab-Skripts getestet. Später wurde die Schnittstelle in Julia implementiert und, um ansonsten in 64 arbeiten zu können, ein eigener Simulationsserver implementiert, welcher die Optimierung in 64bit mit der Simulation in 32bit verband. In Abbildung 15 ist die Beschreibung der Schnittstelle schematisch dargestellt.

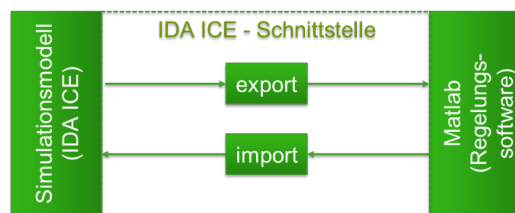


Abbildung 15: Schematische Darstellung zur Beschreibung der Schnittstelle zwischen der Simulationssoftware und der Regelung

Im Simulationsmodell kann man die beiden Blöcke „export“ und „import“ ins Blockschaltchema des Anlagenmodells integrieren und die gewünschten Parameter definieren. Mögliche Imports sind unter anderem die Vorgabe der Heizleistung, der Vorlauftemperatur im Heizsystem, die maximale Temperatur im Warmwasserspeicher oder auch Sollwerte für Temperaturen, die im Raum herrschen sollen. Mögliche Exports aus der Simulation für die Regelung sind beispielsweise die aktuellen Temperaturen bestimmter Schichten im Speicher, die aktuellen Raumtemperaturen oder auch die aktuelle Außentemperatur.

Für die langfristigen Simulationsstudien wurde das Energiezentralen-Modell weiter vereinfacht, um vereinzelt auftretende Probleme, welche die Jahressimulation zum Absturz brachten, zu vermeiden. Die Energiezentrale wurde daher stark vereinfacht modelliert, ohne die wesentlichen Einschränkungen (Beladungsfenster der dezentralen Warmwasserspeicher, Leistungsbegrenzungen) und Zusammenhänge (COP der Wärmepumpen bzw. Kältemaschinen) zu vernachlässigen. Das resultierende Modell der Energiezentrale ist in Julia abgebildet, die Schnittstelle zum thermischen Modell sind die Massenströme, Vor- und Rücklauftemperaturen von der Energiezentrale in des Nahwärmenetz und von diesem retour. Der Ertrag aus der Photovoltaik errechnet sich aus dem in der

Simulation berücksichtigten solaren Einstrahlungsprofil und wird als gewöhnliche Zeitreihe in der Optimierung berücksichtigt.

5.3. Ökonomische Modellierung von thermisch aktivierten Gebäudeverbänden (D2.3)

Die in Vorprojekten angewandte Methodik zur ökonomischen Bewertung von Energiekonzepten wurde analysiert und deren Anwendbarkeit auf das vorliegende Projekt diskutiert. Basierend auf Ergebnissen vom Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART wurde die Entscheidung getroffen, sich auf die Hauptkosten zu fokussieren. Diese sind die Investitions- und die Betriebskosten (inkl. Wartungskosten). Darüber hinaus erfolgt die Bewertung der Ergebnisse mit Hilfe von Key Performance Indikatoren (KPIs). Diese sind zum einen Wärmegestehungskosten (englisch „*Levelized cost of heat*“, LCOH) und Emissionen von CO₂-Äquivalenten, siehe Definitionen unten. Darüber hinaus hat sich das Konsortium mit potentiellen zukünftigen Indikatoren beschäftigt, konkret mit *Smart Readiness Indikatoren* (SRI). Da SRI zurzeit in der Entwicklung sind und diese ein sehr breites Spektrum von Technologien im Gebäudebereich betrachten, wurde entschieden diese nicht direkt anzuwenden und stattdessen lediglich ausgewählte Aspekte zu betrachten.

5.3.1. Emissionen von CO₂-Äquivalenten

Emissionen des Energiesystems im Sinne von CO₂-Äquivalenten werden mit Hilfe folgender Gleichung berechnet:

$$\text{CO}_2 = E_s \cdot f_s + E_{fw} \cdot f_{fw}$$

Dabei sind

- E_s und E_{fw} der Energieverbrauch von Strom bzw. Fernwärme (wobei die Werte aus den energetischen Simulationsergebnissen entnommen wurden)
- f_s und f_{fw} die Emissionsfaktoren von CO₂-Äquivalenten von Strom bzw. Fernwärme. Die hier verwendeten Faktoren sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

In Österreich wird ein hoher Anteil des Stromes durch den Einsatz erneuerbarer Energieträger (insbesondere Wasserkraft und Wind) produziert. Die Stromproduktion aus erneuerbaren Energieträgern ist jedoch jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Hinzu kommt der jahreszeitliche Heizwärmebedarf, der in den Wintermonaten am höchsten ist und somit auch der Strombedarf der Heizungsanlagen, welche Elektrizität in Wärme umwandeln. Aufgrund der Unstetigkeit des Wärmebedarfs und der Stromgestehung werden die Bewertungszeiträume auf Monatsbasis verkleinert. Die nachfolgende Tabelle 3 bildet den zugrunde gelegten Jahresgang der ökologischen Daten auf die Stromerzeugungsbasis ab.

Tabelle 3: Zusammenfassung der verwendete Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme. Werte für Strom wurden aus OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz OIB-330.6-027/19,

Energieträger	Zeitraum	CO ₂ - Faktoren in kg/MWh
Strom	Januar	296
	Februar	295
	März	274
	April	195
	Mai	131
	Juni	135
	Juli	152
	August	158
	September	203
	Oktober	266
	November	276
	Dezember	301
Fernwärme	Jahr	190

5.3.2. Wärmegestehungskosten

Die Gleichung zur Ermittlung der Wärmegestehungskosten (englisch „*Levelized cost of heat*“, LCOH) basiert auf Richtlinie VDI 6025:

$$p = \left(A_0 + \sum_{t=1}^T \frac{A_t}{q^t} - \frac{R_T}{q^T} \right) \cdot \frac{q - 1}{Q_a \cdot (1 - q^{-T})}$$

Dabei sind:

- p : Wärmegestehungskosten in €/kWh, sodass der Kapitalwert 0 ergibt.
- t : Index der Periode, in diesem Fall des Jahres
- T : Betrachtungszeitraum in Jahren.
- q : $1 + i$, wobei i den Kalkulationszinsfuß bezeichnet
- A_0 : Investitionsbetrag (Anschaffungsauszahlung) in €.
- A_t : Auszahlungen der t -ten Periode, zusammengesetzt aus anteiligen kapitalgebundenen (für Instandsetzung), verbrauchsgebundenen, betriebsgebundenen und sonstigen anteiligen Auszahlungen in €.
- R_T : Restwert einer Anlagenkomponente zum Ende des Betrachtungszeitraums in €:

$$R_T = A_0 \left(1 - \frac{T}{T_N} \right).$$

Dabei ist T_N die Nutzungsdauer in Jahren.

- Q_a : Energiebedarf in kWh pro Jahr.

⁵⁸ Pichler C., und Steininger, Karl W. Das Treibhausgasbudget für die Stadt Graz. November 2019

Hier ist darauf hinzuweisen das folgende Annahmen getroffen wurden:

- Der Energiebedarf Q_a ist gleich für alle Perioden
- Der Betrachtungszeitraum T ist auf 20 Jahre festgelegt und damit geringer als die Nutzungs- bzw. Lebensdauer T_N (siehe unten).
- Der Kalkulationszinsfuß i bleibt mit 3 % konstant über den Betrachtungszeitraum.

Aufgrund der starken Kopplung zwischen Wärme- und Kälteerzeugung werden Wärmegestehungskosten für die gesamt gelieferte thermische Energie (Kälte und Wärme) ermittelt.

Um die Wärmegestehungskosten berechnen zu können, sind zusätzlich zu den oben erwähnten Annahmen weitere Informationen und Annahmen notwendig. Diese werden hier erläutert.

Bei den Investitionskosten werden die detaillierten Angaben der Projektpartner als Grundlage herangezogen. Die nicht für das Wärme- und Kälteversorgungssystem relevanten Anlagen bzw. Kostenpositionen wurden weggefiltert (Pflanzenbewässerung, Brandschutz, ...) und nur die relevanten Kostenpositionen werden betrachtet (Heizungs-Umwälzpumpen, Wärmeverteilung, ...).

Eine Übersicht der Bedeutung unterschiedlicher Kostenpositionen in % für jeweils die Energiezentrale und Gebäude ist in Abbildung 16 und Abbildung 17 zu finden.

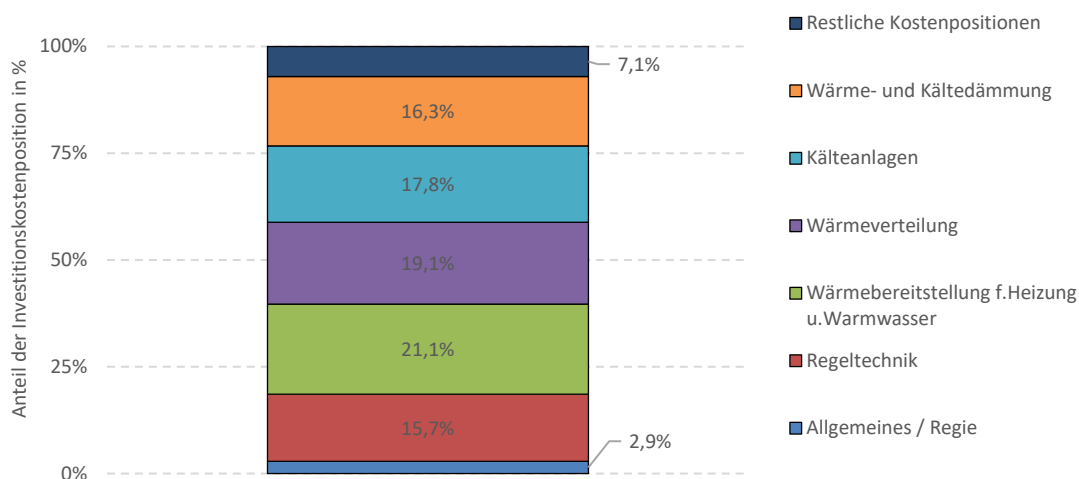


Abbildung 16: Aufteilung der Investitionskosten der Energiezentrale auf Hauptkostenpositionen

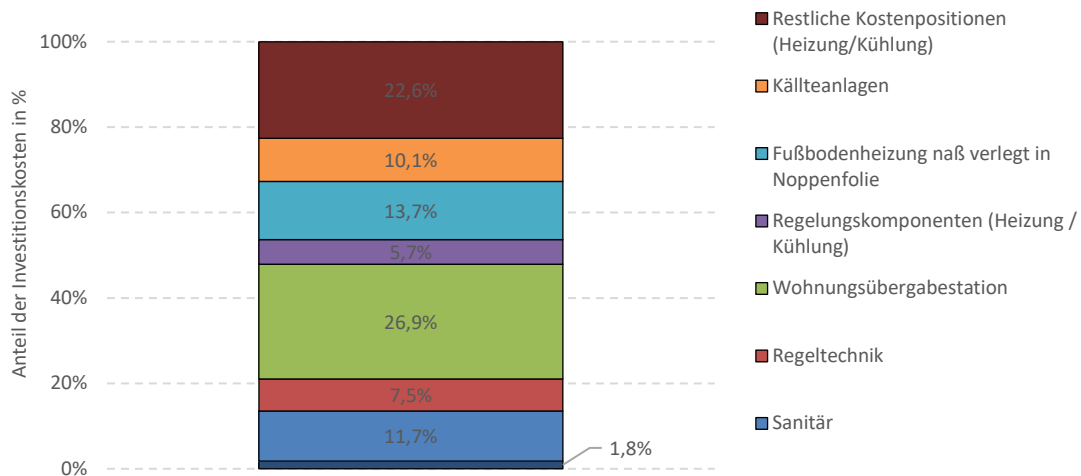


Abbildung 17: Aufteilung der für die Wärme- und Kälteversorgung relevanten Investitionskosten der Gebäude auf Hauptkostenpositionen

Jeder Kostenposition wird eine erwartete Lebensdauer zugewiesen, die auf Literaturwerten für die Lebensdauer von Bauteilen und Bauteilschichten und Erfahrungswerten der Partner beruht. Um die gesamte Lebensdauer der Anlage und Gebäude zu ermitteln, werden die einzelnen Lebensdauern mit den jeweiligen Investitionskosten gewichtet. Die Energiezentrale wird mit 2,4 Millionen Euro (davon 1,2 Millionen Euro für die PV-Anlage) und 23,8 Jahre festgelegt. Die Investitionskosten und Lebensdauer für die Gebäude (ca. 64.800 m² BGF) werden mit 6,55 Millionen Euro und 31 Jahre festgelegt.

Die Betriebskosten sind abhängig von den Ergebnissen der energetischen Simulationen, wie sie in Abschnitt 5.8 dokumentiert sind. Zu deren Berechnung wurde daher eine weitere Schnittstelle von den Ergebnissen der energetischen Simulationen zu dem ökonomischen Modell erstellt. Ferner wurden Python-Skripte zur Überprüfung und Aufbereitung der Ergebnisse (z.B. Einheiten und Zeitschritte anpassen, Zwischenrechnungen durchführen, Bilanzen ermitteln) entwickelt.

Die aufbereitete energetische Simulationsergebnisse werden mit folgenden Rahmenbedingungen ökonomisch bewertet. Die Preise für den Bezug und das Einspeisen von Strom sind in zwei Tabellen, Tabelle 4 und Tabelle 5, zusammengefasst. In Tabelle 4 sind die Preise des Stromanbieter für den Zukauf und das Einspeisen von Strom, in Tabelle 5 die gesetzlichen netzverbundenen Kosten dargestellt.

Tabelle 4: Kosten für Stromzukauf und Einspeisung. Preise aus dem Jahr 2019.

Strompreis	
Zukauf [ct/kWh]	7,2
Verkauf (Einspeisung) [ct/kWh]	4,7

Tabelle 5: Steuer- und Abgaben fürs Stromnetz. Werte für Netzebene 6 - Graz. Quelle: Daten aus Verordnungen; BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH 18.12.2020 und Verordnung der Regulierungskommission der E-Control, mit der die Entgelte für die Systemnutzung bestimmt werden - Fassung vom 12.12.2022

Netznutzungsentgelt	
Leistungspreis (LP) [ct/a]	0
Leistungspreis (LP) [ct/kW]	3,240
Sommer-Hochtarif (SHT) [ct/kWh]	2,1
Sommer-Niedertarif (SNT) [ct/kWh]	1,27
Winter-Hochtarif (WHT) [ct/kWh]	2,1
Winter-Niedertarif (WNT) [ct/kWh]	1,27
Netzverlustentgelte	
Netzverlustentgelte [ct/kWh]	0,169
Abgaben	
Elektrizitätsabgabe [ct/kWh]	1,5
Ökostromförderbeitragsverordnung	
Netznutzungsentgelt - Leistung [Euro/kW]	12,689
Netznutzungsentgelt - Arbeitspreis [ct/kWh]	0,487
Netzverlustentgelte [ct/kWh]	0,028
Ökostrompauschale [Euro/a]	1046,3
Biomasseförderbeitrag (Steiermark) (exkl. Ust.)	
Netznutzungsentgelt - Leistung [Euro/Zahlpunkt]	0
Netznutzungsentgelt - Leistung [Euro/kW]	0,60525
Arbeitspreis und Netzverlustentgelt [ct/kWh]	0,02493

Die Kosten für den Zukauf von Fernwärme sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Fernwärmekosten. Eigene Annahmen basierend auf Wert ohne USt. aus dem Preisblatt für Fernwärme der Energie Graz (gültig ab 1.12.2022)

Fernwärme	
Zukauf [ct/kWh]	7,5
Jahresleistung [ct/kW.a]	13,94
Messpreis pro Übergabestation [€/Monat]	22,5

Die Wartungskosten basieren wie die Investitionskosten auf detaillierten Angaben der Projektpartner. Wartungskosten werden lediglich für die Energiezentrale vorgesehen und werden im Bereich von 0,4 – 0,6 % der Investitionskosten angenommen. Sie stellen damit einen kleinen Teil der Gesamtkosten dar, werden aber trotzdem mitberücksichtigt.

5.4. RC-Ersatzmodell thermisch aktivierter Gebäude für die modellprädiktive Regelung (D3.1)

Die für eine möglichst realitätsnahe Simulation entwickelten thermischen Modelle aus 5.1 sind für die Nutzung in einer Optimierung nur bedingt geeignet. Sie könnten als sogenannte „Black-Box-Modelle“ zum Einsatz kommen (siehe Abbildung 18). Black-Box-Modelle sind aus Sicht des Optimierers nicht näher bekannte Systeme, die aus einer Eingangsgröße (bzw. einem Eingangsgrößenverlauf) eine Zahl

berechnen, welche die Kosten für bzw. die Güte der Lösung darstellt. Ein Black-Box-Optimierer versucht nun, die Eingangsgrößen so zu variieren, dass die zurückgelieferte Zahl einen minimalen bzw. maximalen Wert annimmt. Da keinerlei Informationen über das im Hintergrund operierende Modell existieren, müssen sowohl Informationen über die Richtung der Änderungen der Eingangsgrößen sowie über die Amplitude dieser Änderungen, welche das Ergebnis zielführend beeinflussen, durch „Probieren“ ermittelt werden. Da jede einzelne Iteration einer vollständigen Simulation über den Prädiktionshorizont entspricht und die Simulationsmodelle typischerweise sehr genau sind, kann die Zeit bis zum Erhalt einer optimalen Lösung sehr lange sein. Ohne ein konkretes Wissen über die mathematischen Zusammenhänge im Hintergrund kann auch keine global optimale Lösung erwartet werden; der Umgang mit binären oder ganzzahligen Entscheidungsgrößen erschwert das Problem noch zusehends.

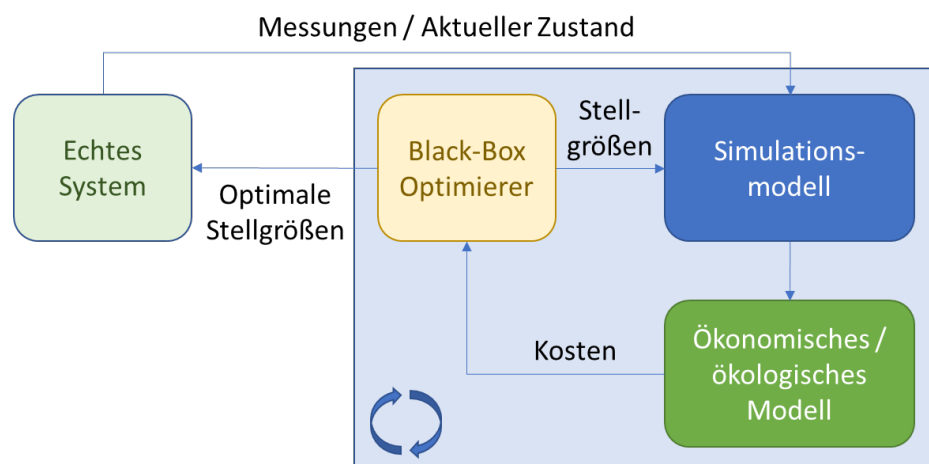


Abbildung 18: Konzept einer Optimierung mit detaillierten thermischen und ökonomischen / ökologischen Simulationsmodellen. Ein Black-Box-Optimierer variiert Stellgrößenverläufe, die an die Simulationen geschickt werden so, dass die Kosten minimiert werden.

In der Praxis versucht man daher, vereinfachte Simulationsmodelle zu finden, die dem Optimierer direkt zugänglich sind (also als Funktionen symbolisch vorliegen). Die mathematische Beschreibung einer oder mehrerer thermischer Zonen zu Zwecken der modellprädiktiven Regelung (MPC) erfolgt idealerweise als lineare Modelle, welche einfach in das MPC-Gerüst der Optimierung der Energiezentrale eingebettet werden können. Diese linearen Modelle können als RC-Ersatzschaltbilder angesehen werden, welche die Wärmeleitung zwischen thermischen Kapazitäten über thermische Widerstände beschreiben. Als Eingangsgrößen treten die Wärmeströme z.B. in den Fußboden oder die thermisch aktivierte Zone auf, Störgrößen sind die solare Einstrahlung, die Außentemperatur, interne Wärmeeinträge durch die Nutzung von Geräten oder die Anwesenheit von Personen sowie Einflüsse durch die Nachbarräume.

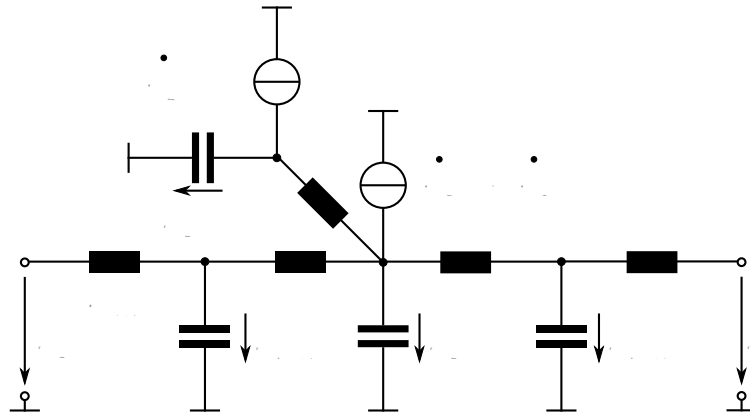


Abbildung 19: Vereinfachtes RC-Ersatzmodell eines einzelnen Raumes. Die Stromquellen repräsentieren Wärmeeinträge, Kapazitäten entsprechen Wärmespeichern. Wärmeleitung erfolgt über (thermische) Widerstände, wenn an den Knoten unterschiedliche Potentiale (=Temperaturen) vorliegen.

Im Projekt wurde zunächst der Ansatz gewählt, ein bereits in der Praxis bewährtes Modell und Modellierungsframework einzusetzen. Die Idee dabei war, automatisiert von einem detaillierten Gebäudemodell aus 5.1 auf ein für die Optimierung handhabbares RC-Ersatzmodell schließen zu können. Darauf wird im folgenden Abschnitt 5.4.1 eingegangen.

In der Praxis war aber einerseits die resultierende Systemordnung (also die Anzahl der im Modell enthaltenen Energiespeicher/Kapazitäten) viel zu hoch, auch nach einer gezielten Ordnungsreduktion. Andererseits war der Unterschied zwischen realen Messdaten, den Resultaten aus Simulationen mit dem detaillierten Modell sowie notgedrungen auch dem reduzierten Modell quantitativ zu hoch, um eine Verwendung in der Optimierung zu rechtfertigen. Stattdessen wurde auf die Berücksichtigung thermischer Kopplungen zwischen den einzelnen thermischen Zonen in der Optimierung verzichtet und somit für jede Zone ein sehr vereinfachtes Modell herangezogen, welches jedoch anhand von Messdaten kalibriert wurde. Siehe dazu die Abschnitte 5.4.2 respektive 5.7.

5.4.1. Automatisierte RC-Ersatzmodellerstellung mit Hilfe der BRCM-Toolbox

An der ETH Zürich wurde eine Matlab-Toolbox entwickelt, welche es erlaubt, aus bestehenden Gebäudemodellen (z.B. von einem Architekten) automatisiert ein vereinfachtes RC-Ersatzmodell zu generieren. Diese *Building Resistance-Capacitance Modeling* (BRCM) Toolbox ^[59] kann über das übliche RC-Modell hinaus auch aktive Raumlüftungen berücksichtigen, welche jedoch in der Optimierung als bilineare Terme auftreten und damit die Lösung des Optimierungsproblems drastisch erschweren.

Bei der praktischen Nutzung der Toolbox gab es mehrere zentrale Schwierigkeiten: Erstens die Kompatibilität mit unterschiedlichen Dateiformaten, welche für die Gebäudemodellierung eingesetzt werden; zweitens das Fehlen von manchen für das Modell relevanten Kenngrößen nach Export und mehrstufiger Konversion aus dem ursprünglichen Datenformat; und drittens die resultierende

⁵⁹ <https://control.ee.ethz.ch/software/BRCM-Toolbox.html> (zuletzt aufgerufen 24.10.2022). Eine genaue Beschreibung befindet sich in der Doktorarbeit von David Sturzenegger: *Model Predictive Building Climate Control - Steps Towards Practice* (2014). Als Publikation kann auf Sturzenegger, D.; Gyalistras, D.; Semeraro, V.; Morari, M. & Smith, R. S.: *BRCM Matlab Toolbox: Model Generation for Model Predictive Building Control*. 2014 verwiesen werden.

Modellgröße, also die Anzahl an Kapazitäten und damit Energiespeicher, die die Optimierung berücksichtigen muss.

Konversion von IDA ICE-Modellen zu EnergyPlus-Modellen

Die BRCM-Toolbox erlaubt die automatische Generierung des RC-Ersatzmodells aus Gebäude-modellen, welche im *EnergyPlus*-Format vorliegen (Dateien mit der Endung *.idf*). Da es zum Zeitpunkt der Projektdurchführung keine Exportfunktion in dieses Format seitens IDA ICE gab, musste erst ein möglicher Konversionspfad ermittelt werden. Die dazu erarbeitete Schrittkette, um von einem vorliegenden Format zum Endergebnis zu gelangen, ist in Abbildung 21 abgebildet.

Die erzeugten Modelle können ganze Häuser mit all ihren thermischen Zonen beschreiben und haben daher eine sehr große Anzahl an Zuständen, welche die Temperaturen der einzelnen thermischen Kapazitäten darstellen. Dies sind schon für ein Einfamilienhaus mehrere hundert, da jede Wand wiederum in einzelne Schichten unterteilt ist. Es war daher notwendig weitere, vereinfachende Maßnahmen zu treffen, um die Modelle in der Optimierung sinnvoll einsetzen zu können. Unter anderem wurde beschlossen, den wechselseitigen Einfluss benachbarter Zonen zu vernachlässigen, um aus einem System mit hunderten Zustandsgrößen mehrere mit nur wenigen Zustandsgrößen zu bilden. Schematisch ist das resultierende Modell pro thermische Zone in Abbildung 20 dargestellt.

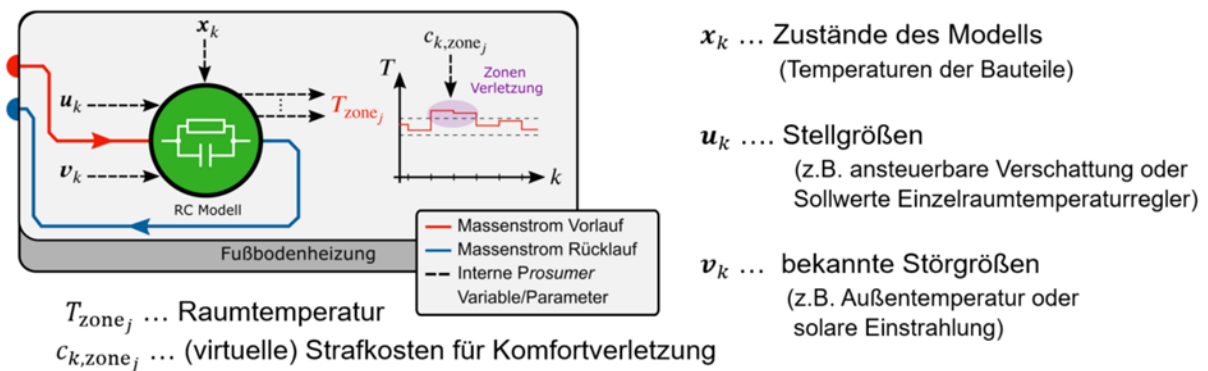


Abbildung 20: Schematisches Abbild eines mathematischen Modells einer thermischen Zone mit den berücksichtigten Zustands-, Eingangs- und Störgrößen. Die Ausgangsgröße ist die Raumtemperatur.

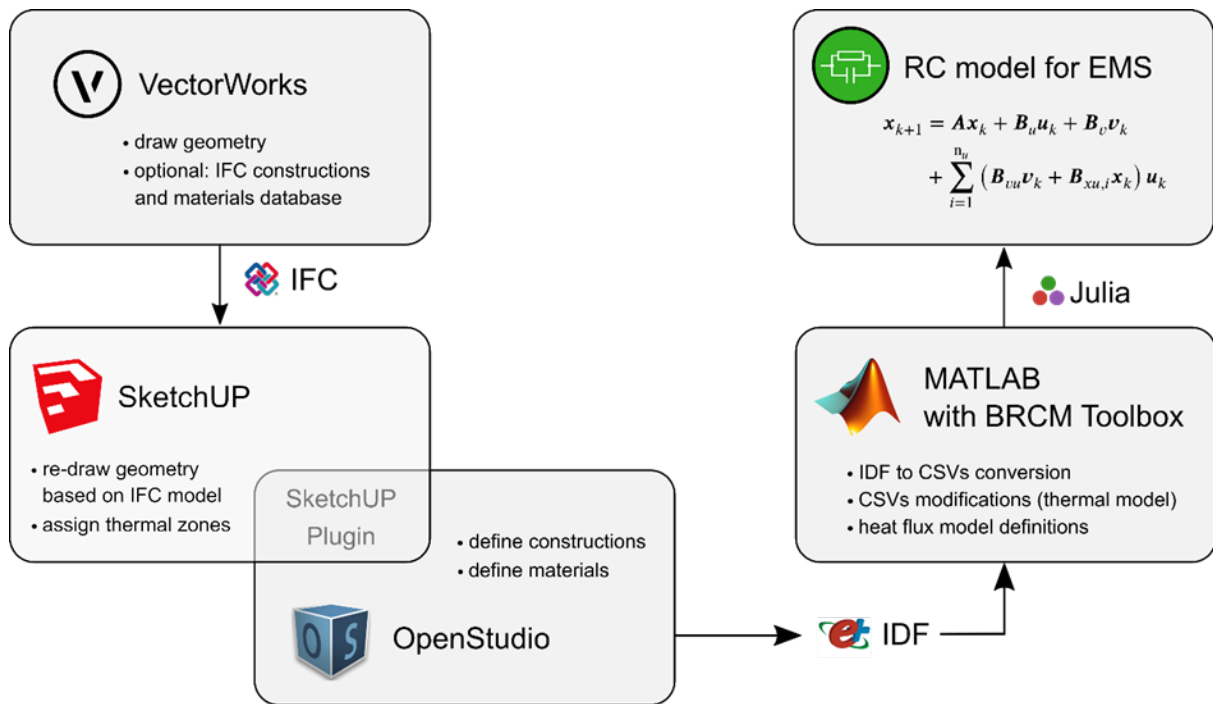


Abbildung 21: Schrittkette, um von Modellen, die in IDA ICE verwendet werden können, zu einem Modell in OpenStudio zu gelangen, dessen Format IDF von der BRCM-Toolbox verstanden wird und der Erstellung eines RC-Ersatzmodelles dient.

Reduktion der Modellordnung

Die Modellordnung wurde auf zwei Arten reduziert: Einerseits wurden die Wandaufbauten, welche im detaillierten Simulationsmodell aus mehreren Schichten bestanden, auf eine bzw. zwei Schichten reduziert. Dazu musste eine mittlere Wärmeleitwert λ aus den Wärmeleitwerten der einzelnen Schichten λ_i und deren Schichtdicken δ_i berechnet werden:

$$\lambda = \frac{\sum \delta_i}{\sum \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1)$$

Der Einfluss auf die Modellqualität ist jedoch massiv, bei einer Reduktion auf nur eine Schicht („1-Layer-Modell“) weicht das simulierte Verhalten deutlich von dem originalen Modell ab (siehe Abbildung 22).

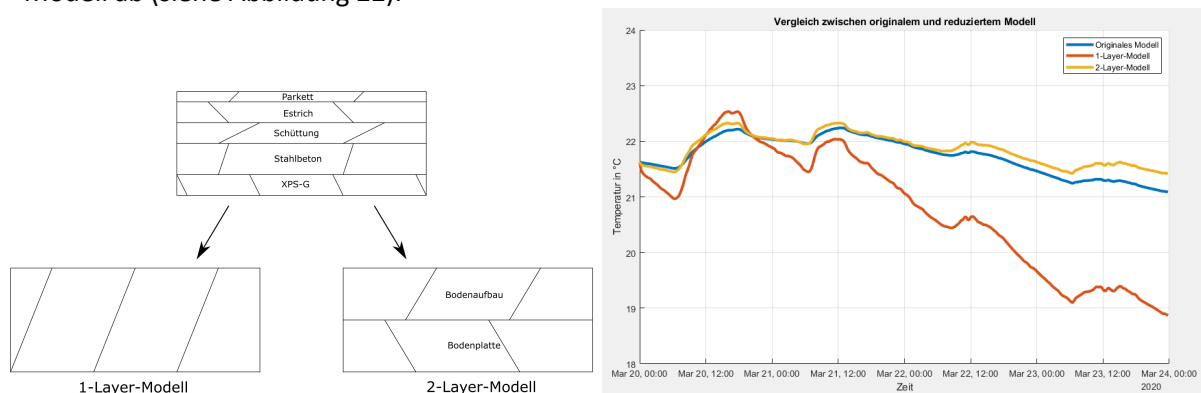


Abbildung 22: Reduktion der ursprünglichen Anzahl der Schichten (links). Die resultierende Modellgüte legt eine Beibehaltung von zumindest zwei Schichten nahe (rechts).

Da die resultierende Modellordnung immer noch zu hoch war, um in einer Optimierung verwendet zu werden (Originalmodell für ein Einfamilienhaus: 542 Zustände, 1-Layer-Modell: 127, 2-Layer-Modell: 193), wurden zudem sämtliche Verbindungen zwischen den thermischen Zonen entfernt und somit aus einem Modell hoher Ordnung mehrere Modelle niedrigerer Ordnung erzeugt. Die Wechselwirkung wurde dadurch approximiert, dass in angrenzenden Zonen von einer geregelten Temperatur ausgegangen wird und dadurch von der Heizung/Kühlung nur der Energieverlust über die Außenhaut kompensiert werden muss.

5.4.2. Vereinfachte Raummodelle

Die im vorigen Abschnitt dargestellte Schrittkette ist in der Praxis nicht einsetzbar. Zum einen sind im Allgemeinen keine detaillierten Gebäudemodelle vorhanden (auch wenn im Sinne des Building Information Models, *BIM*, eine Entwicklung in diese Richtung stattfindet), welche man als Basis für die Erstellung des RC-Ersatzmodelles mit z.B. der BRCM-Toolbox heranziehen könnte. Doch selbst wenn solche detaillierten Modelle vorliegen und die Modellordnungsreduktion sinnvolle Ergebnisse liefert, bleibt doch das Problem, dass eine wirkliche Übereinstimmung mit den realen Verhältnissen nicht unbedingt gewährleistet werden kann. Änderungen in der Verschattung, Fehler in der initialen Parametrierung oder andere Verhaltensmuster der Bewohner:innen sind nur einige der Gründe, warum die anhand detaillierter Gebäudemodelle berechneten Temperaturverläufe in den Zonen sich massiv von realen Messdaten unterscheiden können. Dies wurde im Rahmen eines anderen Projektes bestätigt, wo für ein Einfamilienhaus ein detailliertes Gebäudemodell vorhanden war, aber eine nur sehr schlechte Übereinstimmung mit den realen Messdaten erzielt werden konnte.

Sowohl aus Gründen der Skalierbarkeit, der Benutzerfreundlichkeit und letztendlich auch der Modellgenauigkeit ist es daher vorteilhaft, ein hinreichend detailliertes, einfaches RC-Ersatzmodell als Basis für eine automatische Parameteridentifikation anhand von Messdaten heranzuziehen, welches keinen weiteren Konfigurationsaufwand benötigt. Details zur Parameteridentifikation werden in Abschnitt 5.7 dargelegt.

Das schlussendlich eingesetzte mathematische Modell besitzt pro Zone drei Zustände: Die Temperatur der Raumluft T_i („*inner temperature*“), die der Außenwand T_e („*envelope*“) sowie die des für die Heizung oder Kühlung herangezogenen Deckenelementes T_f („*floor*“).

Als Eingangsgrößen treten einerseits externe Störgrößen auf, andererseits von der Optimierung vorgebbare Stellgrößen. Die Störgrößen sind die Außentemperatur T_a („*ambient temperature*“) sowie die Solarstrahlung, projiziert auf vertikale Ebenen mit einer Nord-, Ost-, Süd- und Westausrichtung $I_{north}, I_{east}, I_{south}, I_{west}$, zusammengefasst im Vektor \mathbf{I} . Die Störgrößen werden aus Wetterprognosen übernommen; die Projektion auf die vier Ebenen soll komplizierte nichtlineare Relationen vorwegnehmen, so dass das Modell an sich linear bleiben kann. Als Stellgrößen treten die Vorlauftemperatur des Wassers (im Heizfall $T_{f,h}$, im Kühlfall $T_{f,c}$) sowie die relative Intensität des Heizens beziehungsweise Kühlens, u_h bzw. $u_c \in [0,1]$, welche ungefähr der Ventilstellung oder der Pulsweitenmodulation des jeweiligen Zonenreglers entspricht, auf. Da die dynamische Auswirkung des Heizens oder Kühlens auf die Raumtemperatur unterschiedlich ausfallen kann (das Heizen erfolgt bei einer Fußbodenheizung durch die aufsteigende Luft schneller als das Kühlen, wenn dasselbe Fußbodenelement mit kaltem Wasser durchströmt wird), wurden das Heizen und Kühlen getrennt voneinander abgebildet:

$$\begin{aligned}
\frac{dT_i}{dt} &= \lambda_{ei}(T_e - T_i) + \lambda_{fi}(T_f - T_i) + \lambda_{ai}(T_a - T_i) + \alpha^T \mathbf{I} + \beta \\
\frac{dT_e}{dt} &= \lambda_{ie}(T_i - T_e) + \lambda_{ae}(T_a - T_e) \\
\frac{dT_f}{dt} &= \lambda_{if}(T_i - T_f) + u_h \lambda_{f,h}(T_{f,h} - T_f) + u_c \lambda_{f,c}(T_{f,c} - T_f)
\end{aligned} \tag{2}$$

Die Modellparameter λ_{xy} mit $x, y \in \{e, i, a, f, h, c\}$ (e...Envelope, i...Inner temperature, a...ambient temperature, f...floor, h...hot water, c...cold water) stellen eine Kombination aus Wärmeleitwert und Wärmekapazität dar und beschreiben die Auswirkungen der Temperaturen angrenzender Schichten aufeinander. Der Parametervektor α beschreibt den Einfluss der solaren Einstrahlung auf die Raumtemperatur, $\beta(t)$ beschreibt den zeitvarianten Energieeintrag aus internen Lasten.

5.5. Modellprädiktive Regelung eines thermisch aktivierten Gebäudes (D3.2)

Die vereinfachten Zonenmodelle aus 5.4 bilden die namensgebende Basis für die modellprädiktive Regelung eines (thermisch aktivierten) Gebäudes. Unter der Annahme, dass sämtliche geregelte Zonen näherungsweise idente Temperaturen aufweisen, können die einzelnen Zonen getrennt voneinander betrachtet werden. In der Realität gibt es natürlich Wechselwirkungen, welche aber nur schwer modellierbar wären und vor allem die Komplexität des Modells empfindlich erhöhen würden. In einer praktischen Regelungsanwendung ist aber ohnehin so, dass externe Störeinflüsse niemals so genau vorhergesehen werden können, dass ein exaktes Simulationsmodell wirklich notwendig wäre – die Modellunsicherheiten gehen meist neben den Unsicherheiten der prädizierten Störeinflüsse unter. Im Folgenden wird daher von der modellprädiktiven Regelung einer einzelnen thermischen Zone die Rede sein; erst im nächsten Abschnitt wird dann die gesamtheitliche Regelung mehrerer Zonen (bzw. im Fall von Gebäuden Zonenverbände) sowie der Energiezentrale behandelt.

Für die modellprädiktive Regelung einer thermischen Zone müssen externe Störgrößen oder Einflussgrößen (solare Einstrahlung, Außentemperatur, Temperatur der umgebenden Räume) prädiziert werden; dazu werden in der Praxis Wetterprognosen verwendet und z.B. die erwartete solare Einstrahlung auf die modellierten externen Wand- und Fensterflächen projiziert.

In einem zweiten Schritt muss der aktuelle Zustand der thermischen Zone geschätzt werden; es steht als Messgröße nur die Raumtemperatur zur Verfügung, aber die Temperaturen der einzelnen Schichten der Wände bzw. der Decke und des Fußbodens gehen ebenfalls in das mathematische Modell ein. Dazu wurde ein Kalman-Filter eingesetzt.

Als besondere Herausforderung stellte sich die Prädiktion der internen Wärmeeinträge β heraus, welche vom Bewohnerverhalten abhängen. Hier wurde die Annahme hinterlegt, dass das Verhalten in erster Näherung periodisch sein müsste (mit einer Unterscheidung zwischen Arbeits- und Feiertagen bzw. dem Wochenende), und es wurde ein Verfahren eingesetzt, mit welchem schon die Wärmelast von Fernwärmenetzen abgeschätzt wurde ^[60]. Dieses Verfahren lernt aus Messdaten vergangener Verbräuche und der Prognose der Außentemperatur auf zukünftige Verbrauchswerte. Im vorliegenden

⁶⁰ Nigitz, T. & Göllés, M.: A generally applicable, simple and adaptive forecasting method for the short-term heat load of consumers. Applied Energy, 2019

Fall der internen Wärmeeinträge stehen jedoch keine Messdaten zur Verfügung. Stattdessen wurde das Kalman-Filter um einen weiteren Zustand erweitert, welcher den Wärmeeintrag darstellt. Im Prädiktionsschritt wurde dieser mit der Prognose aus dem Prognosealgorithmus gleichgesetzt; der Korrekturschritt ändert den Wert auf einen eher mit den Messungen übereinstimmenden und wird wieder in den Prognosealgorithmus als „Messung“ zurückgeführt.

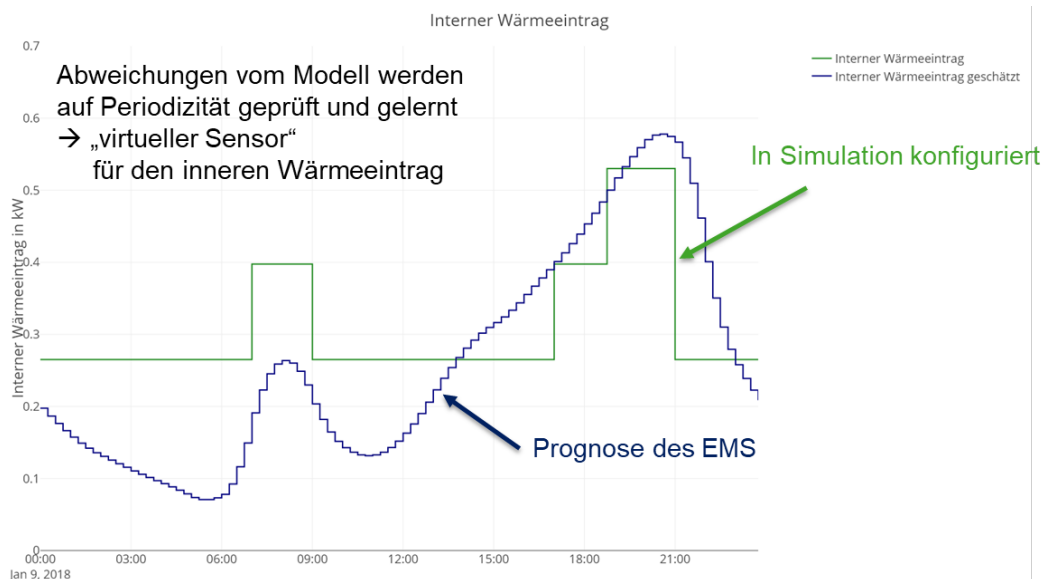


Abbildung 23: Beispielhafter Verlauf der Schätzung des internen Wärmeeintrages. Das in der Simulation definierte Profil wird gut wiedergegeben.

Das Ergebnis ist eine Schätzung eines periodischen Profils, welches beispielhaft in Abbildung 23 dargestellt ist. Es ist jedoch zu betonen, dass diese Methode auch Schwierigkeiten nach sich ziehen kann, wenn die Parameter des Modells nicht gut mit der Realität übereinstimmen. Dann wird dieses periodische Profil versuchen, Fehler im Modell zu kompensieren. Das Resultat ist eine scheinbar gute Übereinstimmung zwischen Modellprognose und echtem Temperaturverlauf, ist aber für eine Regelung nicht gut verwendbar: der Einfluss der aktiven Heizung könnte gänzlich falsch repräsentiert sein.

Die modellprädiktive Regelung einer einzelnen Zone versucht nun, die Heizung u_h bzw. Kühlung u_c so einzusetzen, dass die Raumtemperatur immer innerhalb eines gegebenen Komfortbandes verbleibt, während die dazu nötige Heizleistung minimal ist. Da die Stellgrößen im Prinzip nichtlinear in die Differentialgleichung eingehen, wäre das resultierende Optimierungsproblem quadratisch. Das wäre im Einzelfall nicht problematisch, aber die Menge an einzelnen Zonen und die Struktur des restlichen Optimierungsproblems erfordern eine Reduktion der Komplexität auf ein lineares Optimierungsproblem. Daher wurde die Differentialgleichung (2) in jedem Zeitschritt um die aktuelle Fußboden- (oder Bauteil-)Temperatur linearisiert.

Die Optimierung jeder einzelnen Zone stellt zunächst nur den Komfort sicher. Erst im Zusammenspiel mit der Regelung der Energiezentrale wird es auch zu einem aktiven Beladen oder einem aktiven Entladen der thermischen Kapazitäten kommen. Darauf wird in Abschnitt 5.6 näher eingegangen.

Für die Bewertung der Temperaturregelung wird der Komfort entsprechend ISO7730 herangezogen. Die dort hinterlegten Grenzen für die Zonentemperaturen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Grenzen der Zonentemperaturen für die Komfortklassen A, B und C gemäß ISO7730

	A	B	C
Winter < 12 °C	[23.5 °C, 25,5 °C]	[23 °C, 26 °C]	[22 °C, 27 °C]
Sommer >12 °C	[21 °C, 23 °C]	[20 °C, 24 °C]	[19 °C, 25 °C]

5.6. Regelungstechnisches Gesamtkonzept des Stadtquartiers (D3.3)

Die Regelung der einzelnen Zonen stellt den Komfort in diesen sicher, kann aber durchaus zu erheblichen Lastspitzen bei der gesamtheitlichen Versorgung führen, insbesondere, wenn Nachtabsenkungsprogramme oder Ähnliches hinterlegt sind und keine Schwankungsbreite bei den Schaltzeitpunkten vorgesehen ist.

In der Optimierung ist die Energiezentrale gemäß Abbildung 1, Abbildung 12 abgebildet. Als Wärmequellen stehen einerseits die Fernwärme, andererseits die Abwärme der Kompressionswärmepumpen zur Verfügung. Die Wärmepumpen wurden der Einfachheit halber als eine Wärmepumpe mit der Gesamtleistung abgebildet, um Anschalt- und Ausschaltvorgänge nicht in der Optimierung berücksichtigen zu müssen, was zu einem massiven rechnerischen Mehraufwand ohne große zusätzliche Einsicht geführt hätte. Die Versorgung der Kühlkreise übernimmt die Wärmepumpe, welche in diesem Fall als Kältemaschine fungiert. Zusätzlich kann der Brunnen zur Kühlung eingesetzt werden, als Wärmequelle für den Heizbetrieb oder als Wärmesenke im Kühlbetrieb. Die Versorgung mit Warmwasser erfolgt immer über die Fernwärme, da ein höheres Temperaturniveau benötigt wird, und wird daher in der Optimierung nicht berücksichtigt.

Die Aufgabe der gesamtheitlichen Optimierung des Stadtquartiers besteht nun darin, Wärme bzw. Kälte möglichst preisgünstig zur Verfügung zu stellen. Dazu ist die Reihenfolge auf Grund der Preise für Strom und Fernwärme klar definiert: Die Wärmepumpe wird bevorzugt, insbesondere zu Zeiten von Stromerträgen aus der Solarthermie. Auf die Fernwärme wird nur in Notfällen, d.h. zur Abfederung von Lastspitzen, zurückgegriffen.

In der Optimierung muss zu jedem Zeitpunkt eine Massen- und Energiebilanz erfüllt werden, d.h. die in der Energiezentrale erzeugte Wärme und Kälte muss in jedem Moment von den Zonen abgenommen werden. Die Wärmepumpen werden als zu hundert Prozent modulierbar angenommen, d.h. sie können bis zu ihrer Maximalleistung beliebige Leistungen zur Verfügung stellen, wobei natürlich die Wärme- und Kälteleistungen in Einklang stehen müssen. Ohne die Einbeziehung der einzelnen Zonenregler gäbe es für die Optimierung allerdings keine Freiheitsgrade und die Zuordnung wäre in jedem Zeitschritt eindeutig.

Durch die Möglichkeit, die Lasten zu verschieben, wird es möglich, den Import von Fernwärme deutlich zu drücken, da Lastspitzen deutlich gesenkt werden können. Ziel der Gebäuderegulung und der Energiezentrale ist es daher, den Heiz- oder Kühlbedarf über alle Zonen so konstant wie möglich zu halten, bzw. sogar zu Zeiten von Ertrag aus der Photovoltaik zu verschieben, bei gleichzeitiger Beibehaltung des Komforts der einzelnen thermischen Zonen.

5.6.1. Verteilte Optimierung

Dieses Problem würde jedoch sehr schnell sehr groß und rechenintensiv werden. Deshalb wurde untersucht, wie die zentrale Optimierung in eine verteilte Optimierung umgeformt werden kann. Der Grundgedanke daran ist, dass die Optimierungen der einzelnen Zonen auf vielen kleinen, verteilten Recheneinheiten durchgeführt werden können. Gebäuderegler können mit den Zonenreglern kommunizieren und ihrerseits wieder mit Quartiersreglern Lastprofile verhandeln. Dies erfordert eine Kommunikation zwischen den Einheiten und ein iteratives Annähern an eine für alle optimale Lösung. Durch die parallele Abarbeitung können selbst mehrere Iterationen in kurzer Zeit abgewickelt werden.

Im Folgenden wurde eine Aufteilung in Subprobleme mittels der *Alternating Directions of Multipliers Method* (ADMM) untersucht. ADMM eignet sich für sogenannte „consensus“ Probleme, bei denen einzelne Subprobleme über eine gemeinsame Entscheidung miteinander verknüpft sind. In diesem Fall sind die Subprobleme die Optimierungsprobleme der Wohnungsregelungen, welche jeweils den Komfort maximieren. Die einzelnen Subprobleme sind über den Gesamtwärmebedarf gekoppelt. In einem ersten Versuch wurden die einzelnen Zonen nicht mit der Energiezentrale und deren Optimierung verknüpft, sondern nur untereinander. Das abstrakte Regelziel der Vergleichmäßigung der Abnahme wird durch eine sogenannte *Regularisierungsfunktion* erreicht. In diesem Fall ist das die absolute Abweichung zwischen minimalem und maximalem Wärmebedarf des gesamten Gebäudes. Wird die Regularisierungsfunktion minimiert, bewirkt dies eine Glättung des Gesamtwärmebedarfsprofils.

ADMM ist ein iterativer Algorithmus. In jedem Iterationsschritt berechnen die einzelnen Wohnungsregler ihr Wärmebedarfsprofil für z.B. die nächsten 24 Stunden; dies entspricht bereits einer, wenn auch sehr einfachen, Optimierung: Basierend auf dem thermodynamischen Modell der thermischen Zone löst jeder Zonenregler ein Optimierungsproblem, um den Komfort innerhalb der Komfortbänder zu halten. Dazu werden Strafkosten verhängt, die zunehmen, je weiter sich die Zonentemperatur vom Referenzband entfernt. Um den Optimierer zusätzlich zu unterstützen, werden Abweichungen von der Wunschtemperatur mit geringen Kosten versehen. Ein Strafterm bestraft Abweichungen vom aktuell vorgegebenen Referenzwärmebedarf des Gebäude- oder Quartierreglers. Nachdem alle Zonenregler ihr Optimierungsproblem gelöst haben, wird der berechnete Wärmebedarf an den Gebäude- oder Quartierregler gemeldet. Dieser aggregiert diese und berechnet anhand der einzelnen Wärmebedarfe den neuen Referenzwärmebedarf für jede Wohnung. Hierbei wird die Regularisierungsfunktion minimiert. Wechselseitig ist aber jeweils der Referenzwärmebedarf bzw. die einzelnen Wärmebedarfe der Wohnungen konstant – der Grund für den Namen des Algorithmus. Zum Schluss berechnet der Gebäuderegler noch die neuen virtuellen Kosten für ein Abweichen vom Referenzwärmebedarf und verschickt diese mit den neuen Referenzwärmebedarfen an die Zonenregler. Der Algorithmus wird nach Erreichen eines Konvergenzkriteriums angehalten.

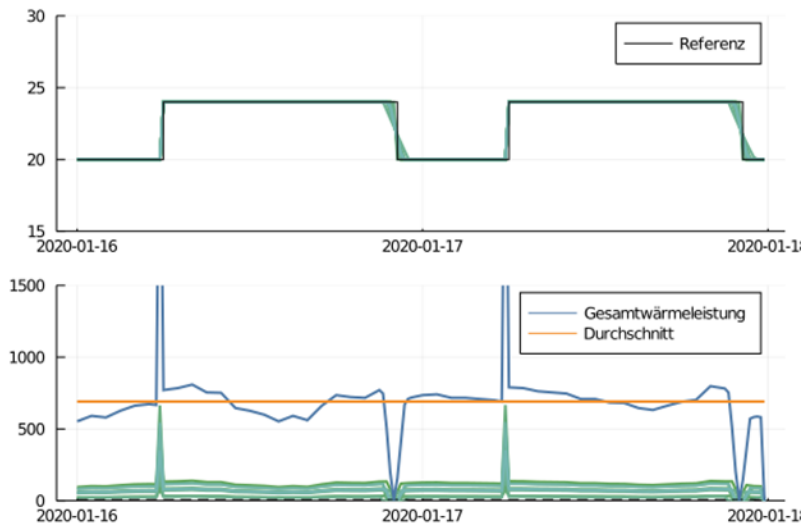


Abbildung 24: Beispielhafter Wärmebedarf mehrerer Zonen, wenn nicht von einer übergeordneten Regelung eingegriffen wird. Eine Änderung des Sollwertes der Raumtemperatur (oben) führt sofort zu Leistungsspitzen aller betroffenen Zonenregler (türkise Linien unten). Die Gesamtleistung (dunkelblau, unten) springt dadurch enorm.

In Abbildung 24 ist dargestellt, wie gleichzeitige Sprünge in der Solltemperatur mehrerer Zonen zu enormen Lastspitzen führen, die von der Energiezentrale abgedeckt werden müssten. Eine globale Optimierung, welche alle Zonen gleichzeitig beeinflussen kann, liefert das in Abbildung 25 dargestellte Ergebnis; die Maximallast kann deutlich gesenkt werden. Abbildung 26 zeigt das entsprechende Ergebnis der verteilten Optimierung mittels ADMM: Die Leistungsbeschränkung ist ebenso erfolgreich, allerdings sind für die Konvergenz der Lösung etliche Iterationen nötig, was die Anwendbarkeit des Ansatzes in Frage stellt.

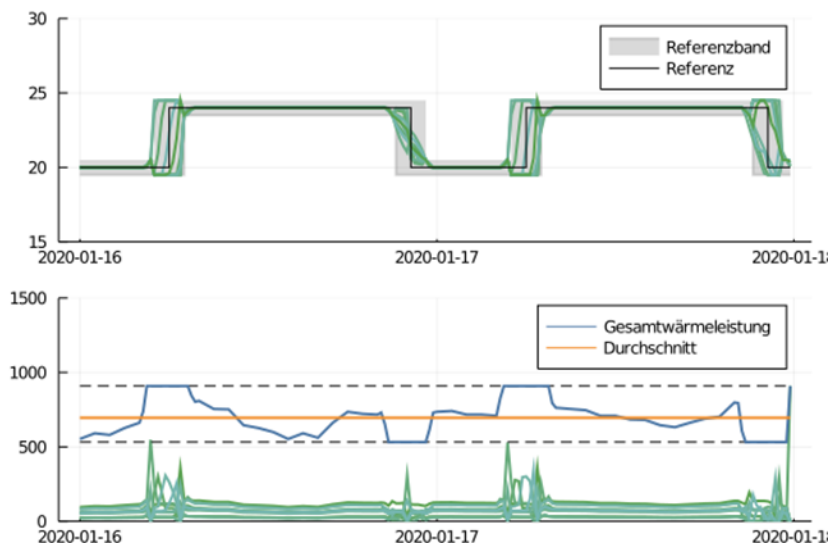


Abbildung 25: Ergebnis einer globalen Optimierung. Die Temperaturen der einzelnen Zonen sollen innerhalb eines Referenzbandes um den Temperatursollwert verbleiben, aber in Summe zu einem möglichst geringen Unterschied zwischen der Minimal- und Maximalleistung führen (strichlierte Linie unten). Man erkennt deutlich die Absenkung der Lastspitze auf unter 1000 kW.

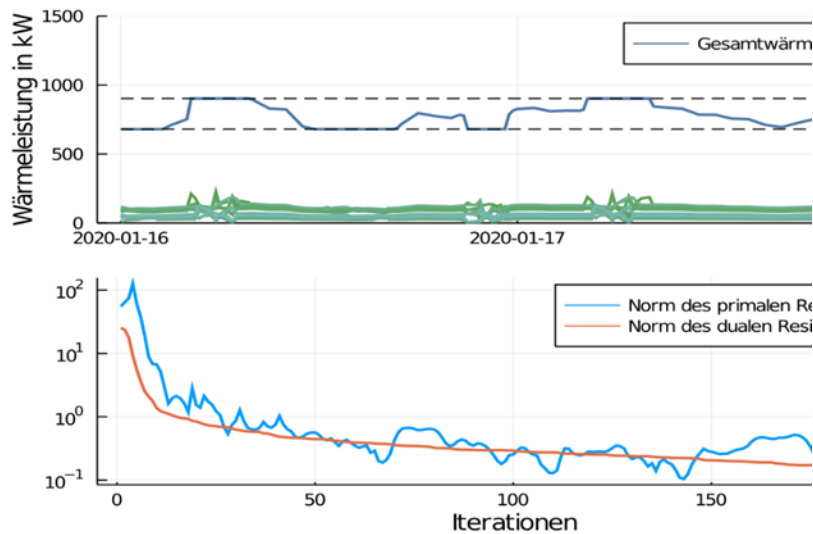


Abbildung 26: Ergebnis der verteilten Optimierung mit Hilfe von ADMM. Das Ergebnis ist mit dem der zentralen Optimierung vergleichbar, benötigt aber etliche Iterationen, um zu konvergieren.

Für die Durchführung der Simulationsstudien, deren Ergebnisse in 5.8 beschrieben sind, wurde auf eine verteilte Optimierung verzichtet und stattdessen mit einer zentralen Optimierung gearbeitet. Der Grund dafür liegt darin, dass die Anzahl der betrachteten Zonen (16 in Detaillierungsgrad 1) noch immer nicht so hoch war, dass eine zentrale Optimierung an ihre Grenzen gestoßen wäre. Da überdies alle Berechnungen auf einem zentralen Computer stattfanden, hätte eine verteilte Optimierung keine Skaleneffekte ausnutzen können und wäre auf Grund der Iterationen um ca. den Faktor Hundert langsamer gewesen; bei derartig umfangreichen Studien ein sehr wesentlicher Faktor.

Bei der Kombination von der Optimierung der Zonen mit jener der Energiezentrale kommt es noch dazu zu dem Problem, dass Ein-/Ausschaltentscheidungen in der Energiezentrale zu einem gemischt ganzzahligen Optimierungsproblem führen, welches von Natur aus nicht konvex ist. Die Konvexität des zugrundeliegenden Optimierungsproblems ist aber eine theoretische Voraussetzung für die Konvergenz des ADMM-Algorithmus. Es wird zwar in manchen Publikationen argumentiert, dass der Algorithmus aus praktischer Sicht unter gewissen Voraussetzungen konvergiert, mathematisch bewiesen ist dies jedoch unserem Wissen nach nicht. Weiterführende Überlegungen zur Anwendung verteilter Optimierung sind in [61, 62] zu finden.

5.7. Automatische Parametrierung der RC-Ersatzmodelle (D3.4)

Das vereinfachte RC-Ersatzmodell für die Beschreibung jeder einzelnen thermischen Zone (2) verfügt über drei Zustände sowie die Parameter λ_{ei} , λ_{fi} , λ_{ai} , λ_{ie} , λ_{ae} , λ_{if} , welche sich aus den Bauteileigenschaften sowie den Wärmekapazitäten der Raumluft, der Außenwand sowie der Bodenplatte zusammensetzen; die Parameter $\lambda_{f,h}$, $\lambda_{f,c}$, welche den Einfluss des Heizens und Kühlens beschreiben, sowie α , dem Einfluss der solaren Einstrahlung aus den vier Himmelsrichtungen, und β ,

⁶¹ V. Kaisermayer, D. Muschick, M. Göllles, M. Horn: *Progressive Hedging for Stochastic Energy Management Systems: The Mixed-Integer Linear Case*. Energy Systems, 2020

⁶² V. Kaisermayer, D. Muschick, M. Horn, M. Göllles: *Operation of Coupled Multi-Owner District Heating Networks via Distributed Optimization*. Energy Reports, 2021

einem im Allgemeinen zeitvarianten Einfluss aus internen Quellen (Abwärme beim Kochen oder von Computern, Anwesenheit von Personen, andere Wärmequellen).

Für die Identifikation dieser Parameter stehen die Einflussgrößen (solare Einstrahlung, Außentemperatur, Vorlauftemperatur des Heiz- oder Kühlkreises sowie Ventilstellung des Heiz- oder Kühlkreises) sowie die Messgröße der Zonentemperatur T_i zur Verfügung.

5.7.1. Klassische Lineare Systemidentifikation: Abbildung als Übertragungssystem

Würde man den nichtlinearen Einfluss der Stellgrößen (das Produkt aus Fußbodentemperatur und den Stellgrößen u_h bzw. u_c) ignorieren, könnte man auf Methoden der klassischen linearen Systemidentifikation zurückgreifen, um z.B. das Eingangs-/Ausgangsverhalten im Sinne einer zeitdiskreten Übertragungsmatrix zu schätzen:

$$T_i(z) = G_{ai}(z)T_a(z) + \mathbf{G}_{fi}(z)\mathbf{I} + G_{ui,h}(z)u_h(z) + G_{ui,c}(z)u_c(z) + \frac{1}{z-1}\beta \quad (3)$$

Diese Vorgangsweise hätte den Vorteil, dass wohlbekannt Ansätze (z.B. *recursive least squares*, RLS) eingesetzt werden könnten. In der Praxis haben sich damit allerdings einige Probleme ergeben. Die einzelnen Übertragungsfunktionen müssen asymptotisch stabile Systeme beschreiben, was sich aber nicht durch einfache lineare Nebenbedingungen sicherstellen lässt (die Forderung nach sogenannten Einheitskreispolynomen als Nennerpolynome ist mit äußerst nichtlinearen Nebenbedingungen verbunden). Noch wesentlicher ist jedoch, dass das eigentliche Verhalten der Stellgrößen u_h bzw. u_c meist nicht korrekt wiedergegeben wurde. So wurden zwar Modelle identifiziert, die das Eingangs-/Ausgangsverhalten halbwegs korrekt wiedergeben konnten, jedoch war die Auswirkung eines Heizvorganges verkehrt abgebildet, so dass eine Erhöhung von u_h zu einem Abkühlen der Zone führte.

5.7.2. Model-predictive-control-relevant Identification

Um eine bessere Modellqualität zu erreichen, wurde auf das Konzept der *Model predictive control relevant identification* (MRI) [63] zurückgegriffen. Dabei wird nicht die Qualität der Einschrittprädiktion optimiert, sondern eine Mehrschrittprädiktion über den gesamten Prädiktionshorizont der MPC untersucht und deren Qualität als Gütekriterium der Parameteridentifikation herangezogen. Das resultierende Optimierungsproblem ist leider nicht mehr linear, sondern quadratisch, und benötigt in der Praxis zu lange, um für mehrere Zonen sinnvolle Modelle schätzen zu können. Um den Rechenaufwand zu minimieren und Zeiten, an denen z.B. keine Heizung aktiv war und somit die Auswirkung der Heizung nicht identifiziert werden kann, bei der Parameteridentifikation zu vermeiden, wurden die historischen Daten in interessante Segmente unterteilt. Mit Hilfe eines Kalmanfilters wird nun iterativ der Anfangszustand am Beginn eines jeden solchen Intervalls mit Hilfe des zuletzt gelernten Modells geschätzt und daraufhin mittels Optimierung das MRI-Problem gelöst. Damit kann die Modellschätzung laufend aktualisiert werden. Diese Vorgehensweise wurde auf der 2nd

⁶³ Laurí, D.; Salcedo, J. V.; García-Nieto, S. & Martínez, M.: *Model predictive control relevant identification: multiple input multiple output against multiple input single output*. IET Control Theory Applications, 2010

International Sustainable Energy Conference 2022 in Graz vorgestellt⁶⁴, eine Publikation in einer Spezialausgabe des *International Journal of Sustainable Energy* ist derzeit in Begutachtung [⁶⁵].



Abbildung 27: Ergebnis der Identifikation mittels MRI-Methode. Aus: Andreas Moser et al.: Automatic Thermal Model Identification and Distributed Optimisation for Load Shifting in City Quarters. *International Journal of Sustainable Energy* (in Begutachtung)

5.7.3. Extended Kalman Filter

Für die finalen Simulationen wurde auch die MRI-Methode zugunsten einer einfacheren Methode, in welcher ein Extended Kalman Filter automatisch nicht nur die Zustandsgrößen T_i , T_e und T_f schätzt, sondern gleichzeitig die Modellparameter des Modells (2). Zusätzlich wurde der Einfachheit halber eine konstante interne Last β mitgeschätzt. Der Einsatz des Kalman-Filters hat den Vorteil, dass dieser nicht nur die Zustände und Parameter, sondern auch eine Abschätzung der Güte der Schätzung in Form der Kovarianzmatrix liefert. Damit wird unter anderem vermieden, dass eine bereits sehr gute Schätzung eines Parameters durch neue, fehlerhafte Messungen komplett verändert wird.

Ergebnisse der Modellidentifikation sind in Abbildung 28 (Büro) und Abbildung 29 (Wohnung) zu sehen. Hierbei ist zu betonen, dass es sich um Ergebnisse bei einer Simulation des einfachen Modells handelt und die internen Lasten dort für Bürogebäude sehr regelmäßig eingestellt sind (konstant von Arbeitsbeginn bis Arbeitsende). In der Wohnung ist die interne Last komplizierter aufgebaut und daher nur schlecht im Modell als Konstante abgebildet. Auch ist anzumerken, dass die Modelle durch entsprechende Anregung der Eingangssignale (*Amplitude Modulated Pseudo Random Binary Numbers*) wesentlich besser identifiziert werden konnten. Dies war nötig, um die Jahressimulationen ohne

⁶⁴ A. Moser, V. Kaisermayer, D. Muschick, M. Göllles, A. Hofer, D. Brandl, R. Heimrath, T. Mach, C. Ribas Tugores, T. Ramschak. *Automatic thermal model identification and distributed optimization for load shifting in city quarters*. In: Conference Proceedings - 2nd International Sustainable Energy Conference. 2022. S. 302-303

⁶⁵ Andreas Moser et al.: *Automatic Thermal Model Identification and Distributed Optimisation for Load Shifting in City Quarters*. *International Journal of Sustainable Energy*. To be published

Probleme durchführen zu können; ansonsten gab es des Öfteren Probleme mit der Modellqualität, wodurch die gesamte Simulation wiederholt werden musste.

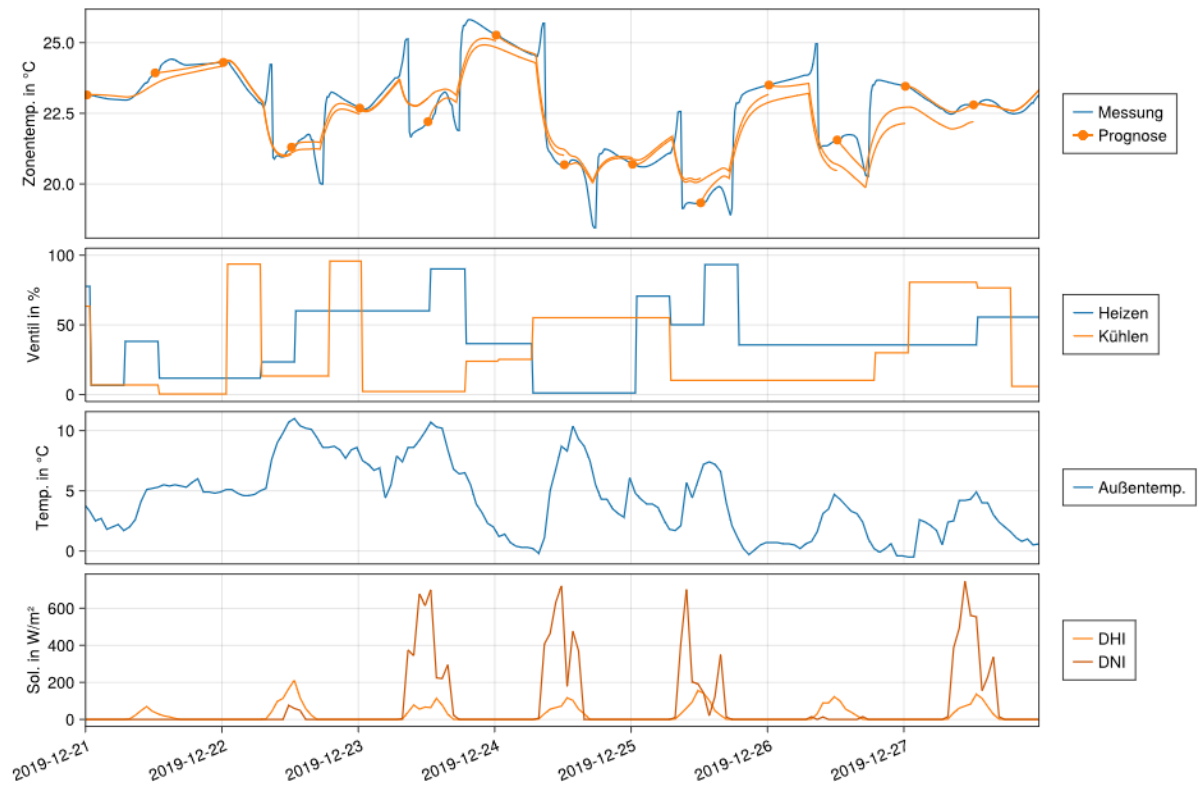


Abbildung 28: Ergebnis der Modellidentifikation für ein Büro des Bauteils 2. Die Modellqualität ist so gut, weil die Eingangsgrößen (Heizen, Kühlen) beliebig variiert werden konnten, und weil die internen Lasten sehr regelmäßig auftraten.

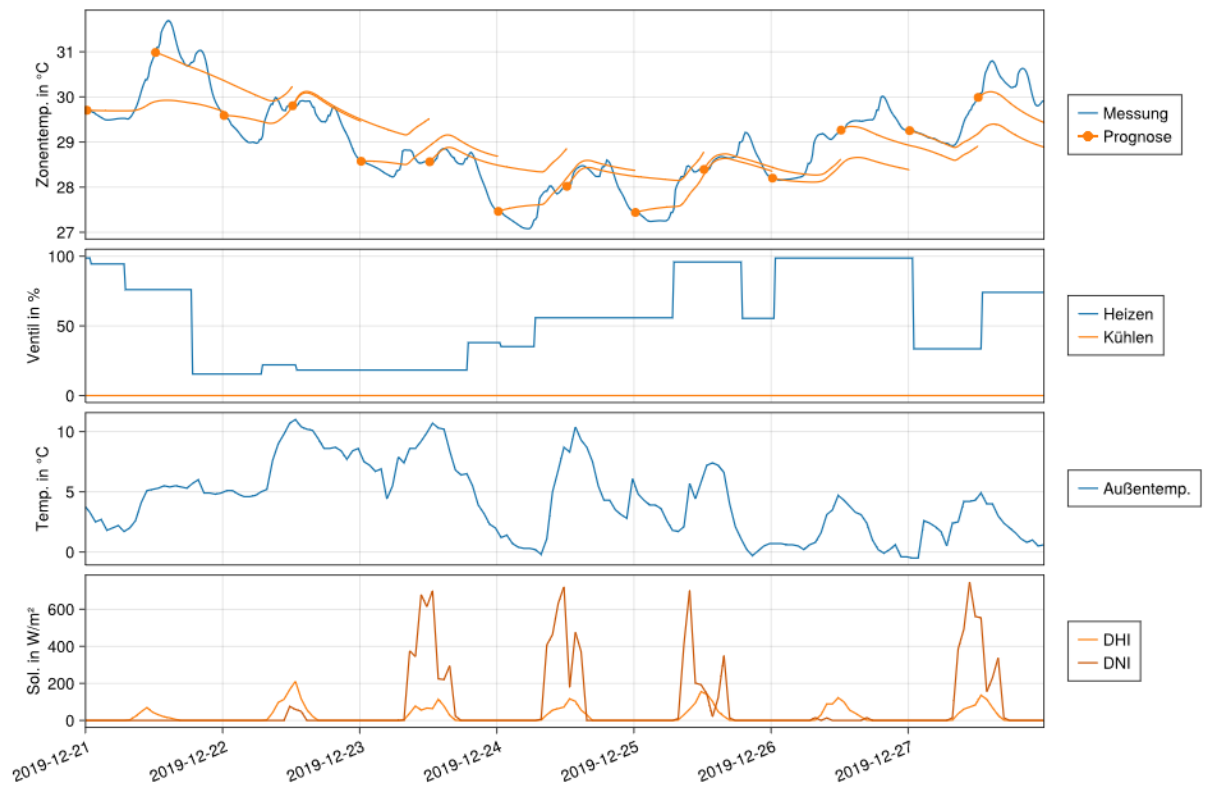


Abbildung 29: Ergebnis der Modellidentifikation für eine Wohnung. Die internen Lasten sind weniger regelmäßig, die Prädiktionen sind damit weniger gut.

5.8. Bewertung der Simulationsergebnisse (D4.1)

Im Rahmen des Projektes sollte der Einsatz von aktivierten Bauteilen zum Heizen und Kühlen in Zusammenspiel mit einer intelligenten, vorausschauenden Regelung bewertet werden.

Die Untersuchungen sollten die folgenden Fragen beantworten:

- Ist es noch/wieder zeitgemäß, Bauteilaktivierung in Neubauten vorzusehen?
 - Kann thermischer **Komfort** garantiert werden?
 - Können **Kosten** durch gleichmäßigere Versorgung oder der Nutzung der Gebäudemasse als Speicher gespart werden?
- Ist es vorteilhaft, mehrere Wohnungen / Stockwerke / Gebäude unter Berücksichtigung von globalen Interessen mit Energie zu versorgen?
 - Nutzung der Speicherwirkung durch die Zentrale, um **Lastspitzen zu minimieren** und den **Gleichzeitigkeitsfaktor zu reduzieren**, um bei gleicher Versorgungsleistung mehr Kunden anschließen zu können
- Wie **robust** ist die Regelungsmethode...
 - ... bezüglich Veränderungen im Lastprofil? Wie sieht es bei einer zukünftigen Reduktion der Heizlast, aber vor allem zunehmendem Kühlbedarf aus? Wie sehen die Überlegungen in z.B. 40 Jahren aus?
 - ... bezüglich Änderungen in der Topologie? Was passiert, wenn ein weiteres Gebäude angeschlossen wird bzw. eine Wärmepumpe/Kältemaschine hinzugefügt wird?

- ... bezüglich des Ausfalls von Wärmepumpen/Kältemaschinen bzw. des Ausfalls der Kommunikation?
- ... bezüglich Änderungen in der Kostenstruktur, z.B. höheren Stromkosten oder gar variablen Strompreisen?

Die Simulationen wurden darauf ausgelegt, Antworten auf die meisten dieser Fragen geben zu können. Im Folgenden wird zunächst die Methodik der Untersuchung dargelegt und daraufhin die Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

5.8.1. Methodik

Die Beantwortung der oben gestellten Fragen erfolgt über die Auswertung einer Reihe von Simulationsstudien, in welchen unterschiedliche Szenarien untersucht werden. Allen Szenarien ist eine Gegenüberstellung von Betonkernaktivierung und gewöhnlicher Fußbodenheizung gemeinsam. Dadurch sollen die Fragen nach der Zeitgemäßheit von Bauteilaktivierung beantwortet werden: Die Kostenvorteile und die Auswirkung auf den Komfort werden jeweils klar dargestellt.

Bei allen Untersuchungen muss neben dem zentral untersuchten Kriterium (z.B. den Kosten) auch die Einhaltung von vorgegebenen Komfortgrenzen bei der Wärme- und Kälteversorgung berücksichtigt und bewertet werden, da es ansonsten zu einer Verfälschung der Ergebnisse kommen würde (man könnte z.B. die Energiekosten auf null reduzieren, indem einfach gar nicht geheizt und gekühlt wird). Daher wird bei jedem untersuchten Szenario auch angegeben, welche Komfortklasse nach ISO7730 in welchem Anteil der Wohnungen (gewichtet nach Zonengröße) für welchen Prozentsatz der betrachteten Zeit erreicht werden konnte.

Für die Bewertung der Kosten wurden Strom- und Fernwärmetarife sowie der Einspeisetarif gemäß Tabelle 8 verwendet. Da die Tarife zum Zeitpunkt der Fertigstellung des Berichtes (September 2022) wilden Schwankungen unterworfen waren, wurde auf Werte aus stabileren Zeiten zurückgegriffen (2019). Es wurde beim Strom keine Unterscheidung zwischen Tages- und Nachtтарif vorgenommen. Für den Betrieb des Kühlturmes für die Rückkühlung überschüssiger Wärme aus der Kältemaschine wurden in der Optimierung Kosten in der Höhe von 10 €/MW_{th} veranschlagt. In die Auswertung gingen diese jedoch nicht ein.

In dem am 3. Oktober 2021 vorgestellten Steuerreformpaket der österreichischen Bundesregierung („Ökosoziale Steuerreform“) wird mit der Bepreisung von CO₂ ein neues Werkzeug im Mix der wirtschaftspolitischen Instrumente verfügbar. Mit dieser Bepreisung von Treibhausgasen folgt Österreich einer sowohl in Europa als auch global immer stärker werdenden Tendenz. Die Bepreisung von CO₂ ist als eine sukzessiv steigende Abgabe vorgesehen, die mit 30 € pro Tonne (2022) startet und in den Folgejahren auf 55 € pro Tonne angehoben wird. Für die Kalkulation der CO₂ Kosten wurde der Wert für 2022 als konstant angenommen.

Nachfolgend sind die verwendeten Zinssätze und Preissteigerungen für die Lebenszykluskosten dargestellt. Als Betrachtungszeitraum wurden 20 Jahre angenommen:

- Preisentwicklung: Jährliche Preissteigerung der Betriebs- und Wartungskosten von $i = 3\%$
- Finanzielle Rahmenbedingungen: Zinssatz von 3%

Es wird festgehalten, dass die absolute Höhe der Tarife, und damit auch die absoluten Ergebnisse bei den Simulationsstudien, im Prinzip arbiträr sind. Wesentlich ist hingegen die sich aus den Tarifen

ergebende klare Priorisierung der Quellen: 1. Strom aus der Photovoltaik (Eigenverbrauch vor Einspeisung); 2. Wärme aus der Wärmepumpe; und 3. Wärme aus der Fernwärme. Eine intelligente Regelung ist daher stets darauf bedacht, die Wärmeanforderung zu Zeiten mit hoher PV-Leistung zu schieben bzw. bei einer Limitierung der Leistung der Wärmepumpe, die Last möglichst gleichmäßig auf den Tag zu verteilen, um Spitzen, die über die Fernwärme abgedeckt werden müssen, zu vermeiden. Da für die Kühlung keine alternative Quelle zur Verfügung steht, wird diese ebenfalls priorisiert und, bei Leistungsbeschränkungen der Kältemaschine, das Lastprofil möglichst vergleichmäßig.

Tabelle 8: Für die Optimierung hinterlegte Kosten und Tarife basierend auf dem Jahr 2019

Quelle	Betrag
Fernwärme	75 €/MWh _{th}
Strom (Import)	72 €/MWh _{el}
Strom (Einspeisetarif)	47 €/MWh _{el}
Kühlturm	10 €/MWh _{th}

Im Folgenden sind die einzelnen untersuchten Simulationsstudien im Detail beschrieben und werden deren Ergebnisse ausgewertet und diskutiert. Es wurden, wenn nicht anders angegeben, Jahressimulationen durchgeführt, die auf dem Simulationsmodell aus 5.1.1 beruhen und die Modellidentifikation basierend auf dem Extended Kalman Filter aus 5.7.3 einsetzen.

Grundlage aller Vergleiche ist die erste Studie, welche die durch modellprädiktive Regelung und Bauteilaktivierung erzielbare **Kosteneinsparungen** untersucht. Damit wird beantwortet, inwiefern sich die gemeinsame Betrachtung aller Zonen aus der Sicht der Energiezentrale als vorteilhaft erweist und wie dadurch Lastspitzen und der Einsatz von Spitzenlastkesseln (in diesem Fall der Einsatz der Fernwärme) vermieden werden können.

Im Szenario **Wachstum** wird ein sich änderndes Verhältnis von der Leistung der Energiezentrale zum Leistungsbedarf der Abnehmer untersucht. Hier spielt die Reduktion der Gleichzeitigkeit durch die adaptive Lastverschiebung eine zentrale Rolle. Das Szenario beantwortet die Fragen zur Robustheit gegenüber einem veränderten Lastprofil und zu einer Änderung in der Topologie.

Die Frage, inwieweit die Methode robust auf den Ausfall von Komponenten reagieren kann, wird im Szenario **Erwartete und unerwartete Ausfälle** untersucht.

Die letzte Untersuchung zur Auswirkung von **Prognosefehlern** dient der Untermauerung der anderen Ergebnisse, indem gezeigt wird, dass die untersuchte Methode zwar von guten Prognosen profitiert, aber die auf einer perfekten Außentemperatur- und Solareinstrahlungsprognose basierenden Ergebnisse durchaus mit jenen vergleichbar sind, die mit realen Prognosen erreicht werden können. Daher wurde in allen anderen Simulationsstudien von einer perfekten Prognose ausgegangen, um nicht zwei voneinander eigentlich unabhängige Komponenten (Wetterprognose und modellprädiktive Regelung) gemeinsam zu beurteilen und somit das theoretisch mögliche Potential der modellprädiktiven Regelung von vornherein zu verringern.

5.8.2. Kosteneinsparungen

Eine modellprädiktive Regelung sollte, abhängig von der ihr zur Verfügung stehenden Flexibilität in Form von Energiespeichern, in der Lage sein, die Lasten zu Zeiten mit niedrigen Energiekosten zu verschieben. Im vorliegenden Fall steht eine Wärmequelle (Fernwärme) mit einem konstanten Preis zur Verfügung. Der Preis für die Wärme/Kälte aus der Wärmepumpe/Kältemaschine hängt stark von den Rahmenbedingungen ab: Erstens von der zur Verfügung stehenden elektrischen Energie aus der Photovoltaik sowie dem verfügbaren Potential zur Rückkühlung / des Freecoolings über den Brunnen, andererseits von der maximal über die jeweilige Technologie zur Verfügung stehende Leistung. Es wurde in den Simulationsstudien nicht extra auf einen Unterschied zwischen Tag- und Nachttarif Rücksicht genommen, auch wenn ein solcher von der Optimierung leicht berücksichtigt werden könnte. In Zukunft wird eher von einer Senkung des Strompreises zur Mittagszeit auszugehen sein, wenn eine höhere Durchdringung des Stromnetzes mit Photovoltaik erreicht wird. Der Eigenverbrauch der PV-Energie stand daher auch aus Sicht der Netzdienlichkeit im Vordergrund.

Es werden in Simulationen die entstehenden Kosten für die vier verschiedenen Varianten (mit/ohne Betonkernaktivierung, mit/ohne modellprädiktive Regelung) miteinander verglichen. Insbesondere im Sommer sollte es zu einer Erhöhung des Eigenbedarfsanteiles aus der Photovoltaik kommen, um den Kühlbedarf zu decken und die typischerweise verhältnismäßig schlechten Einspeisetarife zu vermeiden. Im Winter sollten die Spitzenlasten, welche über die teurere Fernwärme abgedeckt werden müssen, reduziert werden.

Energieverbrauch und Komfort

Durch den Einsatz des Energiemanagementsystems (EMS) kommt es grundsätzlich zu einer Erhöhung des Energieverbrauchs, weil durch die verbesserte Zonenregelung der Heiz- und Kühlbedarf geringfügig ansteigen. Im Gegenzug steigt der Komfort in den betrachteten Zonen: In Abbildung 30 ist die Verteilung der Innentemperaturen abhängig von der Außentemperatur und relativ zu den Komfortbändern dargestellt, in Abbildung 31 die anteilige Zeit, die die einzelnen Zonen, gewichtet nach ihrer Bruttogeschoßfläche, in den einzelnen Komfortbändern verbracht haben. Insbesondere der Anteil an Zeit, der im der besten Komfortband A verbracht wird, kann durch das EMS deutlich verbessert werden.

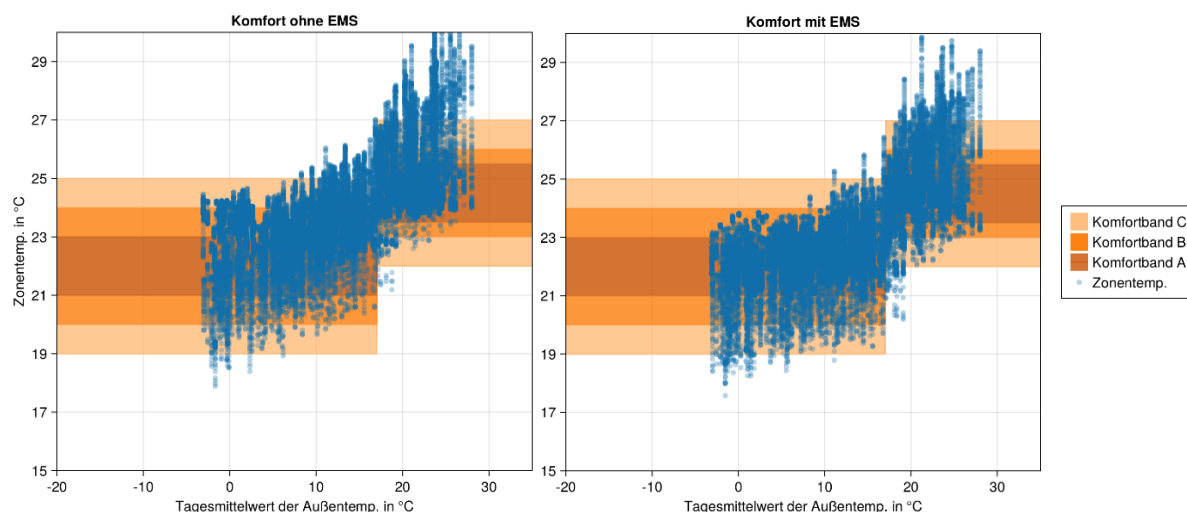


Abbildung 30: Verteilung der Zonentemperaturen ohne und mit EMS und Bauteilaktivierung. Im Sommer kommt es in beiden Fällen zu einer Temperaturüberhöhung durch solare Einstrahlung,

die durch die Kühlung nicht vollständig unterbunden werden kann. Das EMS präferiert kühlere Temperaturen im Winter.

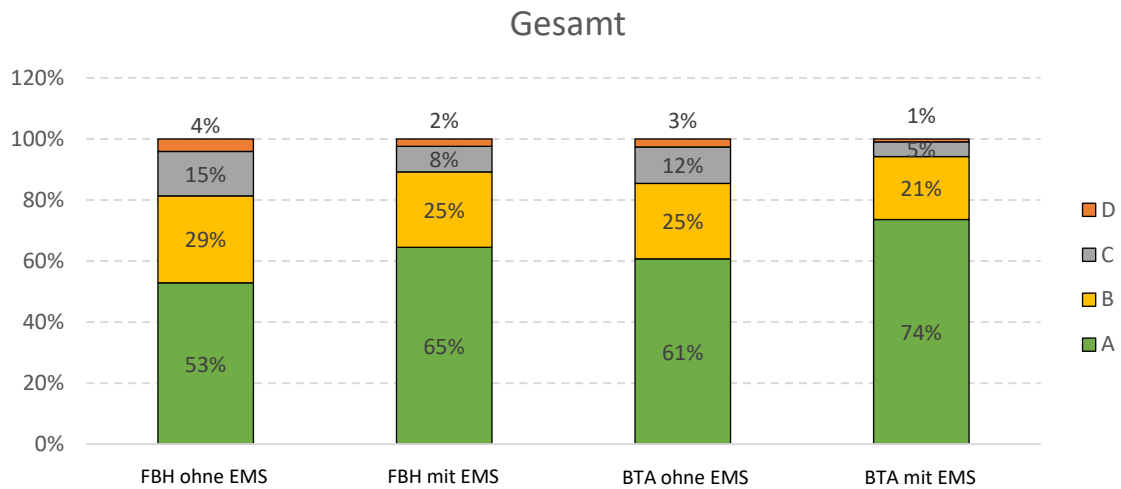


Abbildung 31: Vergleich der relativen Zeit, welche die einzelnen Zonen in den jeweiligen Komfortbändern verbrachten, gewichtet mit der Bruttogeschosßfläche der jeweiligen Zonen. Mit EMS wird der Komfort deutlich gesteigert, mit Bauteilaktivierung ist dieser ebenfalls höher.

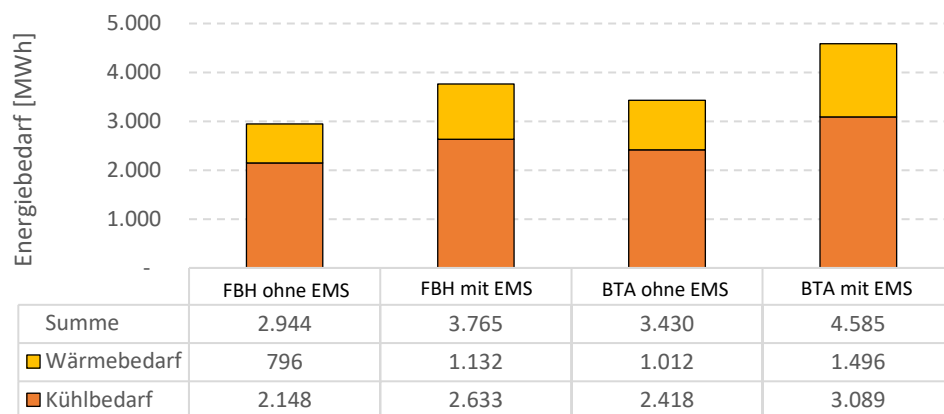


Abbildung 32: Jährlicher Wärme- und Kühlbedarf der Gebäude für die vier unterschiedlichen Szenarien.

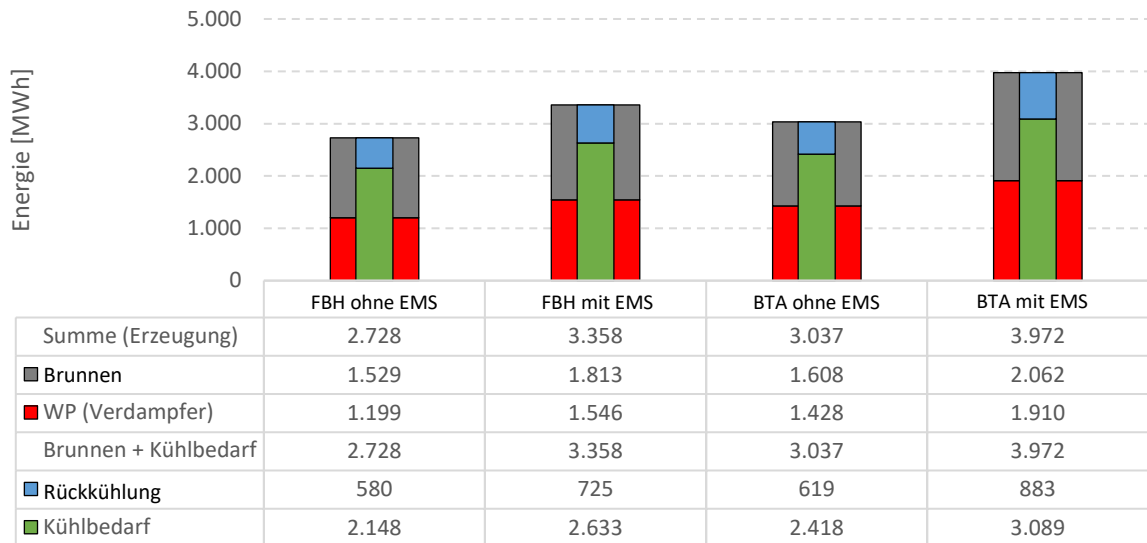


Abbildung 33: Gegenüberstellung von Kühlbedarf (echter Kühlbedarf in den Gebäuden und nicht zeitgleicher Rückkühlbedarf) und Erzeugung (über die Wärmepumpe oder den Brunnen).

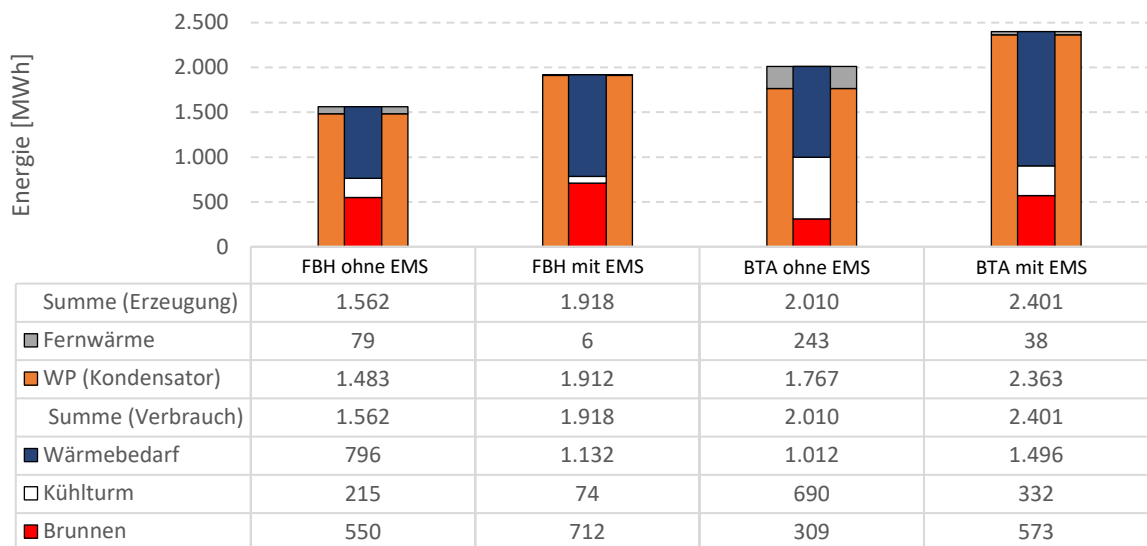


Abbildung 34: Gegenüberstellung von Wärmebedarf (echter Wärmebedarf der Gebäude und nicht zeitgleicher Abwärme, welche im Kühlturm oder im Brunnen vernichtet werden muss) und Erzeugung. Das EMS reduziert die Notwendigkeit des Einsatzes des Kühlturms sowie die Abdeckung von Lastspitzen durch die Wärmepumpe maßgeblich. Der Bedarf an Fernwärme für die Warmwasserversorgung ist hier nicht berücksichtigt, da er nicht vom Szenario abhängt.

Der erhöhte Energiebedarf der Gebäude, der für den verbesserten Komfort nötig ist, ist in Abbildung 32 ersichtlich. Die Aufteilung auf die unterschiedlichen Wärme- bzw. Kältequellen ist in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellt. Mit EMS wird deutlich mehr Wärme von der Wärmepumpe bereitgestellt, dabei aber gleichzeitig der Bezug aus dem Fernwärmenetz zur Abdeckung von Lastspitzen maßgeblich reduziert.

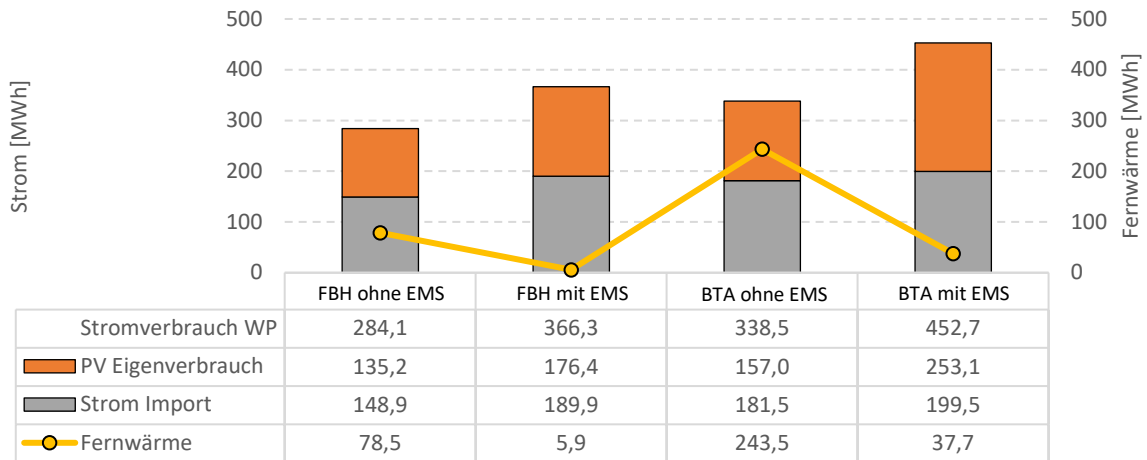


Abbildung 35: Ursprung der Stromversorgung der Wärmepumpe (linke Achse) bzw. Einsatz der Fernwärme (rechte Achse). Der erhöhte Strombezug aus dem Netz steht einem deutlich reduzierten Wärmebezug aus dem Fernwärmenetz beim Einsatz des EMS entgegen.

Betriebskosten

Die Analyse der jährlichen Betriebskosten ergab für das Referenzszenario (Fußbodenheizung ohne EMS) rund 96.832 €. Die Kosten für das Konzept mit FBH und EMS sind niedriger, obwohl der Strombedarf etwas gestiegen und die Erlöse durch den gestiegenen Eigenverbrauch des PV-Stroms reduziert wurden. Trotz des Anstiegs des Energiebedarfs wird die CO₂-Abgabe gesenkt. Die Auswirkung ist jedoch minimal. Die Senkung der verbrauchsgebundenen Kosten für Fernwärme ist erheblich. Die Gesamtkosten für die Fernwärme bleiben aufgrund der Fixkosten, also z.B. der Kosten für die installierte Leistung, hoch.

In Bezug auf die Betonkernaktivierung zeigt der Einsatz des EMS deutliche Kostenvorteile im Vergleich zu dem Konzept ohne EMS. Die Gesamtkosten sind zwar insgesamt mit der Betonkernaktivierung höher als ohne, dies kann aber eindeutig durch den höheren Komfort und dem damit verbundenen höheren Energieverbrauch erklärt werden.

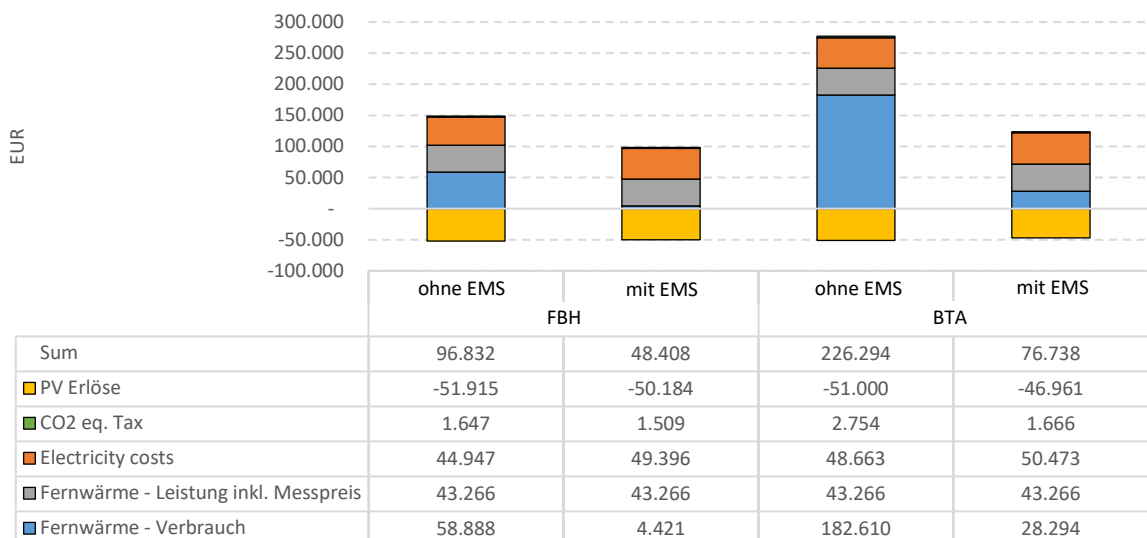


Abbildung 36: Darstellung jährliche Betriebskosten inkl. Erlöse aus PV

Dadurch ergibt sich trotz erhöhtem Energieaufwand ein wesentlicher Kostenvorteil für den Betrieb mit EMS, siehe auch Abbildung 36. Es würde sich in dem konkreten Fall auch eine Senkung der Anschlussleistung an die Fernwärme anbieten, um die Betriebskosten weiter zu senken.

Eine Analyse der Energiegestehungskosten in €/MWh sind für Investitionsentscheidungen von zentraler Bedeutung. Als Betrachtungszeitraum wurden 20 Jahre angenommen. Der Einsatz des EMS führt sowohl bei den Konzepten mit Fußbodenheizung sowie bei jenen mit Betonkernaktivierung zu einer Reduktion der spezifische Energiegestehungskosten.

Tabelle 9: Energiegestehungskosten in €/MWh für die vier Szenarien: Fußbodenheizung mit EMS, Fußbodenheizung ohne EMS, Bauteilaktivierung mit EMS, Bauteilaktivierung ohne EMS.

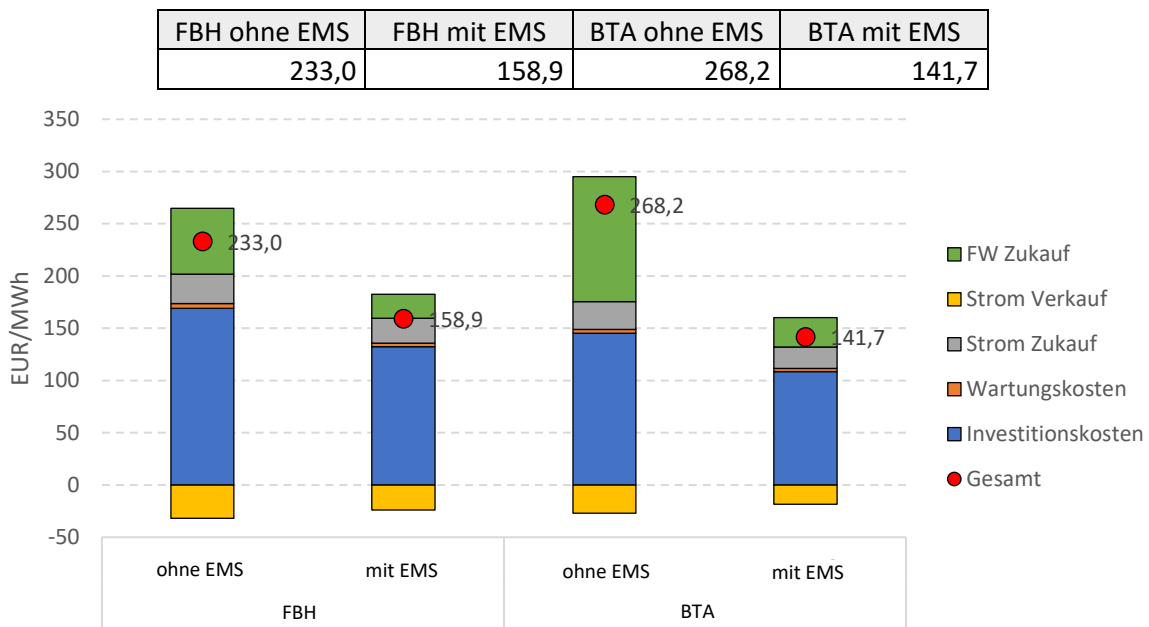


Abbildung 37: Beitrag der Hauptkosten auf die Energiegestehungskosten je Szenario.

5.8.3. Wachstum

Wird ein Quartier von einer gemeinsamen Energiezentrale versorgt, muss bei zunächst noch unverbauten Flächen oder der Möglichkeit einer Änderung des Belegungsprofils bzw. des Nutzerverhaltens bedacht werden, ob diese Zentrale und die umgesetzte Regelstrategie mit zukünftigem Wachstum zurechtkommen kann. Gerade die Möglichkeit des Verschiebens von Lasten wird oft als Möglichkeit angepriesen, den Gleichzeitigkeitsfaktor in einem Netzwerk zu senken und somit mehr Anlagen anschließen zu können. Dem sind jedoch durch die ebenfalls ansteigende Basislast Grenzen gesetzt.

Im vorliegenden Fall ist die maximale Anschlussleistung beim Heizen und der Versorgung mit Warmwasser nicht das Problem, da diese von der Fernwärme abgedeckt werden könnten. Jedoch steigen die Kosten für weitere Anschlüsse an, wenn gleichzeitig Wärme bezogen wird und diese nicht mehr von den Wärmepumpen geliefert werden kann, sondern von der Fernwärme bereitgestellt werden muss. Je besser die Regelungsmethode bzw. je höher die von der Bauteilaktivierung zur Verfügung gestellte Flexibilität, desto mehr Energie kann über die Wärmepumpe abgewickelt werden. Beim Kühlen im Sommer stellt die Leistungsfähigkeit der Kältemaschine eine absolute Grenze dar. Es

ist bei einer zu großen Zunahme des Kältebedarfes mit einer Unterversorgung und Komfortverlust zu rechnen. Wiederum sollte eine aktive Nutzung der Speichermassen die Gleichzeitigkeit verhindern und somit einen Komfortverlust länger hintanhaltend können.

Um Wachstum in der Simulation abzubilden, müssen zusätzliche Wohnungen/Gebäude hinzugefügt werden. Hier stellt sich das Problem des Diskretisierens und der praktischen Umsetzung: Die kleinste Einheit, die hinzugefügt werden kann, ist eine thermische Zone, welche jedoch ohne die umliegende Gebäudehülle etc. keinen praktischen Sinn ergibt. So müsste man zusätzliche Gebäude mit wenigen, dann mehr Wohnungen hinzufügen, um sukzessive größere Ausbaustufen abzubilden. Das führt zum Problem der praktischen Umsetzung, da hier viele Gebäudemodelle vorbereitet und wiederum mit der Regelung verknüpft werden müssten.

Im Sinne der Relativität ist es aber irrelevant, ob man einem bestehenden Energiesystem zusätzliche Konsumenten hinzufügt oder umgekehrt die zur Verfügung stehende Leistung reduziert – in beiden Fällen kann zunächst jeder Energiebedarf von der (billigeren) Quelle bedient werden, und mit zunehmender Abnahmeleistung / abnehmender Maximalleistung der billigen Quelle steigen die LCOH, weil die Versorgung von teureren Quellen gewährleistet werden muss, beziehungsweise steigt die Anzahl und Schwere der Komfortverletzungen, weil nicht genügend Leistung bereitgestellt werden kann.

Die Bewertung des Wachstumsszenarios erfolgt daher auf folgendem Wege: Es wird zunächst von einer Wärmepumpe ausgegangen, welche das gesamte untersuchte Quartier in einem Wintermonat jederzeit mit ausreichend Wärme, bzw. im Sommer mit ausreichend Kälte versorgen kann. Dann wird deren Maximalleistung sukzessive reduziert und somit – im Heizfall – vermehrt auf die Fernwärmeversorgung zurückgegriffen. Es wird die Entwicklung der Betriebskosten dargestellt. Je besser die Regelgüte und je höher die zur Verfügung stehende Flexibilität, desto länger sollte der Preis für die benötigte Energie konstant bleiben, bzw. die Schwere der Komfortverletzungen im gewohnten Bereich verharren.

Untersucht wurden eine Heizperiode (erstes Quartal von Anfang Jänner bis Ende März) sowie eine Kühlperiode (drittes Quartal von Anfang Juni bis Ende August).

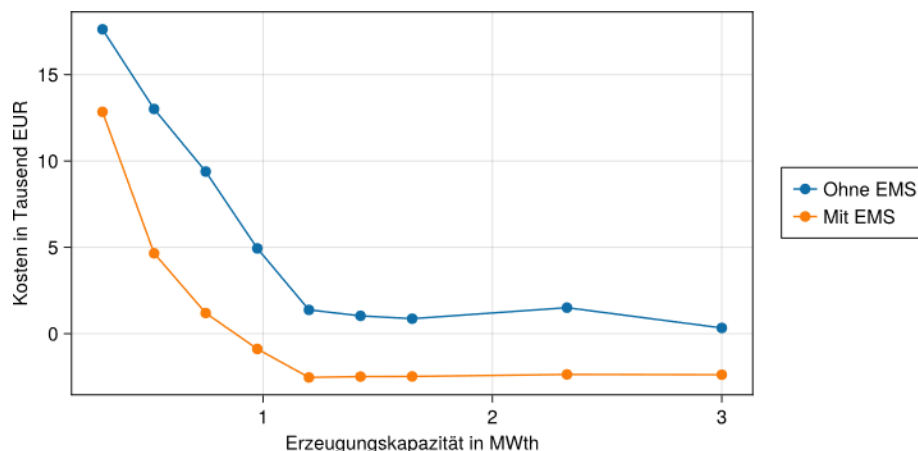


Abbildung 38: Auswirkung einer Reduktion der Erzeugungskapazität auf die Heizkosten Jänner-März (mit Bauteilaktivierung).

In Abbildung 38 ist die Auswirkung der Reduktion der Erzeugungskapazität auf die Heizkosten im ersten Quartal dargestellt. Von rechts ausgehend wird die Leistung der Wärmepumpe reduziert, bis

schließlich die Fernwärme unterstützend eingreifen muss und die Kosten ansteigen. Die Bauteilaktivierung bietet dem EMS ein Flexibilitätspotential, so dass die Kosten zunächst langsamer ansteigen als ohne EMS. Bei weiterer Leistungsreduktion reicht aber auch das Flexibilitätspotential nicht mehr aus, die Kosten gleichen sich aneinander an, bis schließlich die gesamte Wärme aus der Fernwärme bezogen werden muss. Die Kurven ohne Bauteilaktivierung liegen deutlich näher beieinander, da das Flexibilitätspotenzial wesentlich geringer ist.

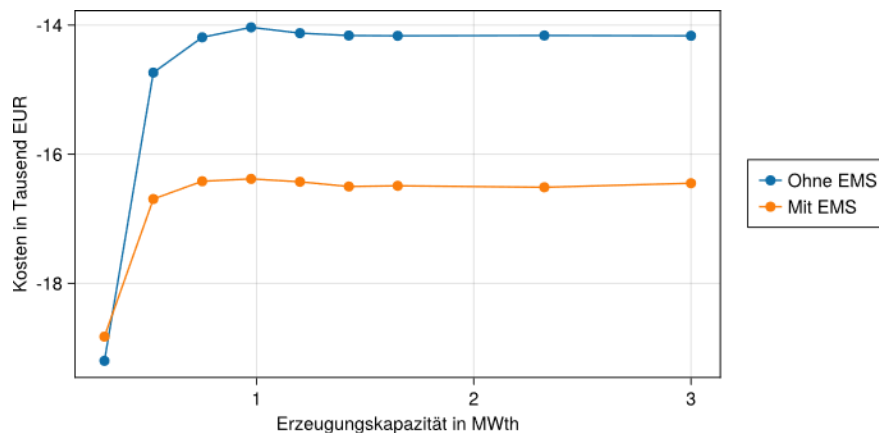


Abbildung 39: Auswirkung einer Reduktion der Erzeugungskapazität auf die Kühlkosten Juni-August (mit Bauteilaktivierung). Da der Ertrag aus dem Stromexport dominiert, sind die Kosten negativ. Der höhere Ertrag bei niedrigerer Erzeugungskapazität liegt daran, dass die Kühlleistung der Wärmepumpe nicht substituiert werden kann und es in diesem Fall zu einer Unterversorgung kommt.

In Abbildung 39 ist der Kühlfall dargestellt. Im Sommer wird Strom aus der Photovoltaik gewinnbringend verkauft, die Betriebskosten sind also negativ. Das EMS kann den Einsatz der Wärmepumpe so zu den Zeiten hohen PV-Ertrages verschieben, dass insgesamt geringere Kosten entstehen. Nimmt die Kühlleistung der Kältemaschine ab, kommt es nicht wie im Heizfall zu höheren Kosten, da hier keine alternative Technologie die Kältebereitstellung übernehmen kann. Stattdessen sinken die Kosten, da weniger Strom verbraucht wird, und der Komfort nimmt ab, da der Kühlbedarf nicht mehr gestillt werden kann. Man sieht jedoch am Verlauf, dass das EMS die Kosten – und damit auch den Komfort – länger konstant halten kann. Dies ist in Abbildung 40 verdeutlicht.

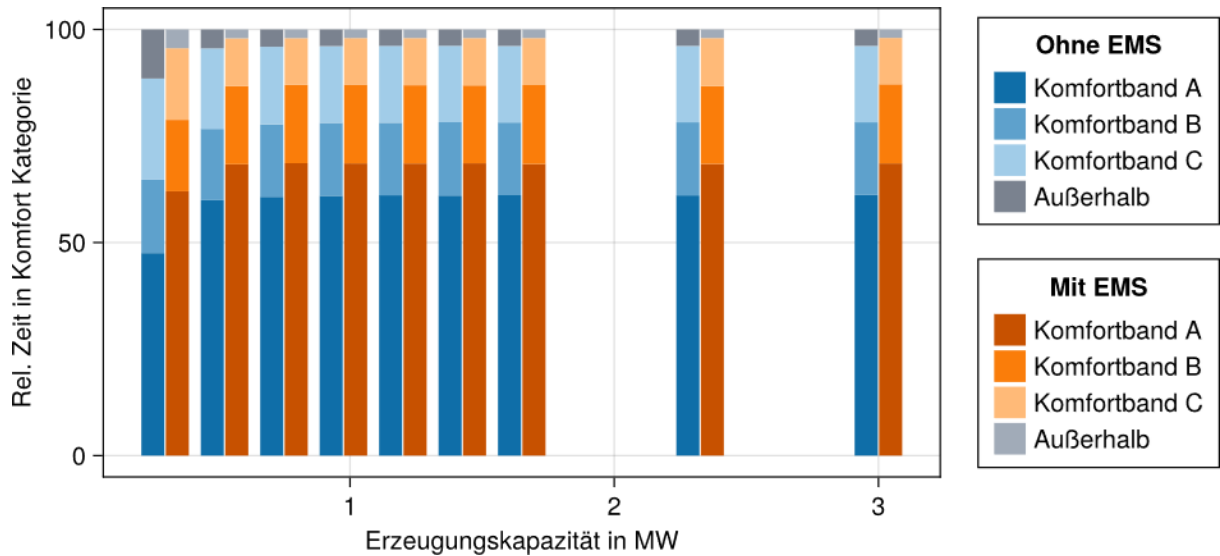


Abbildung 40: Auswirkung einer Reduktion der Kühlleistung auf den Komfort. Da es keine alternative Quelle für Kälte gibt, werden die Komfortbandgrenzen häufiger verletzt. Das EMS kann durch die Bauteilaktivierung die Last verschieben und den Komfort länger aufrechterhalten.

Ein anderer Weg, das durch das EMS zur Verfügung gestellte Lastverschiebepotential darzustellen, liegt in der Darstellung der Jahresdauerlinien. Diese sind für das erste Quartal (vornehmlich Heizbetrieb in Abbildung 41 dargestellt). Man erkennt deutlich eine Verschiebung des Heizbedarfs zu niedrigeren, von der Wärmepumpe darstellbaren Leistungen.

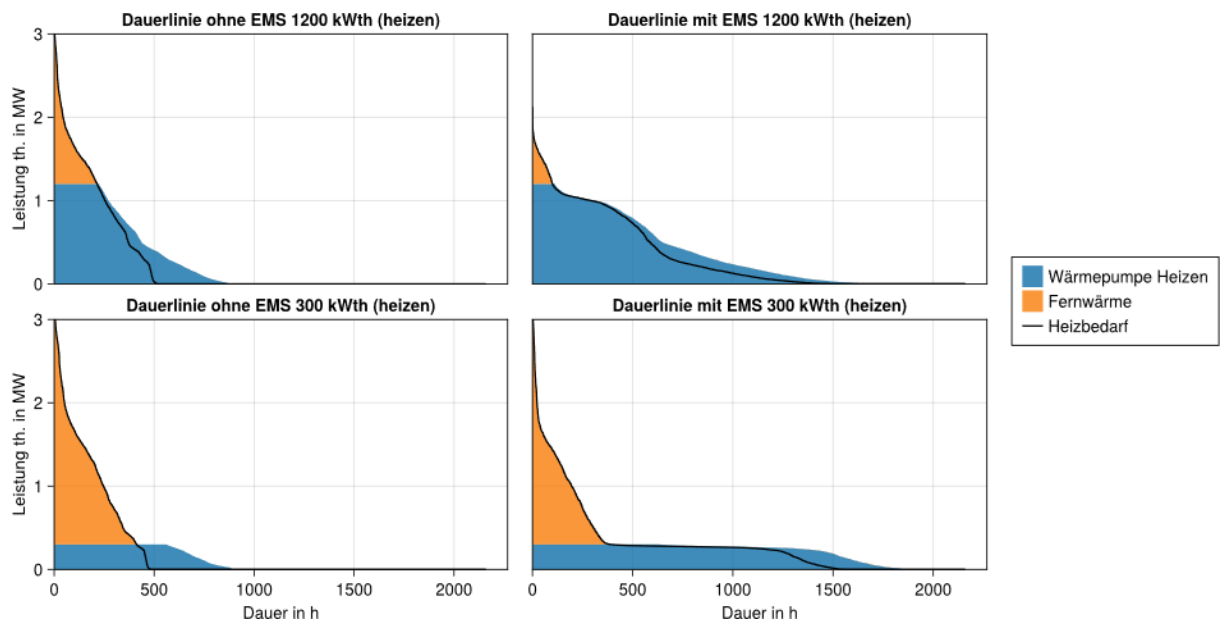


Abbildung 41: Dauerlinien für das erste Quartal (Heizbedarf) mit Bauteilaktivierung. Mit EMS (rechts) werden höhere Leistungen prinzipiell seltener gefordert. Da alle Leistung über der maximalen Leistung der Wärmepumpe von der teureren Fernwärme bereitgestellt werden muss, können damit die Kosten reduziert werden. Die blaue Fläche über der Heizbedarfskurve stellt Abwärme der Wärmepumpe dar, da auch im ersten Quartal ein Kühlbedarf auftritt, welcher über die Wärmepumpe / Kältemaschine bereitgestellt werden muss.

5.8.4. Erwartete und unerwartete Ausfälle

Ein entscheidender Nachteil von Optimierung ist deren prinzipbedingter Mangel an Robustheit; man denke an das Just-in-time-Prinzip, dass prinzipiell die Kosten durch geringeren Lagerbedarf reduziert, im Fall von Lieferengpässen aber zu großen Probleme führen kann. Man kann dies umgehen, indem man explizit mit stochastischer Optimierung arbeitet und entsprechende Risiken im Optimierungsproblem berücksichtigt; dann erhält man aber konservativere Ergebnisse, die in den meisten Fällen nicht das volle Potential ausschöpfen.

Auch bei einer modellprädiktiven Regelung eines Quartiers kann es zu solchen Effekten kommen: Wenn zugunsten einer Lastverschiebung thermische Zonen bereits am unteren Rand des Temperaturkomfortbandes betrieben werden, führt ein Ausfall einer Wärmequelle im Schnitt voraussichtlich schneller zu einer Verletzung des Komfortbandes, als wenn ein „normaler“ Regler die Temperatur innerhalb des Bandes relativ stark schwanken lässt. Auf der anderen Seite kann eine global agierende Regelung versuchen, den Komfortverlust möglichst gleichmäßig auf alle Parteien zu verteilen und somit Extreme zu vermeiden. Würde einfach jede Zone weiter die benötigte Energie aus dem Netz ziehen, würden Zonen, welche näher an der Energiezentrale liegen, länger ihren Komfort aufrechterhalten können, während entferntere Zonen unterversorgt wären und rapide abkühlen / aufheizen würden.

Um diesen Effekt zu quantifizieren, wird der Ausfall der Heizkreispumpe simuliert und dessen Auswirkungen auf den Komfort der Bewohner:innen über die Zeit aufgetragen. Nach einer gewissen Zeit wird die Heizkreispumpe repariert und steht wieder voll zur Verfügung. Ausschlaggebend für die Resilienz des Regelsystems ist nun, wie lange ein möglichst hoher Prozentsatz der Kund:innen zumindest innerhalb der Komfortklasse C verbleibt. In Simulationen konnte kein nennenswerter Unterschied zwischen der Standardregelung und der modellprädiktiven Regelung festgestellt werden.

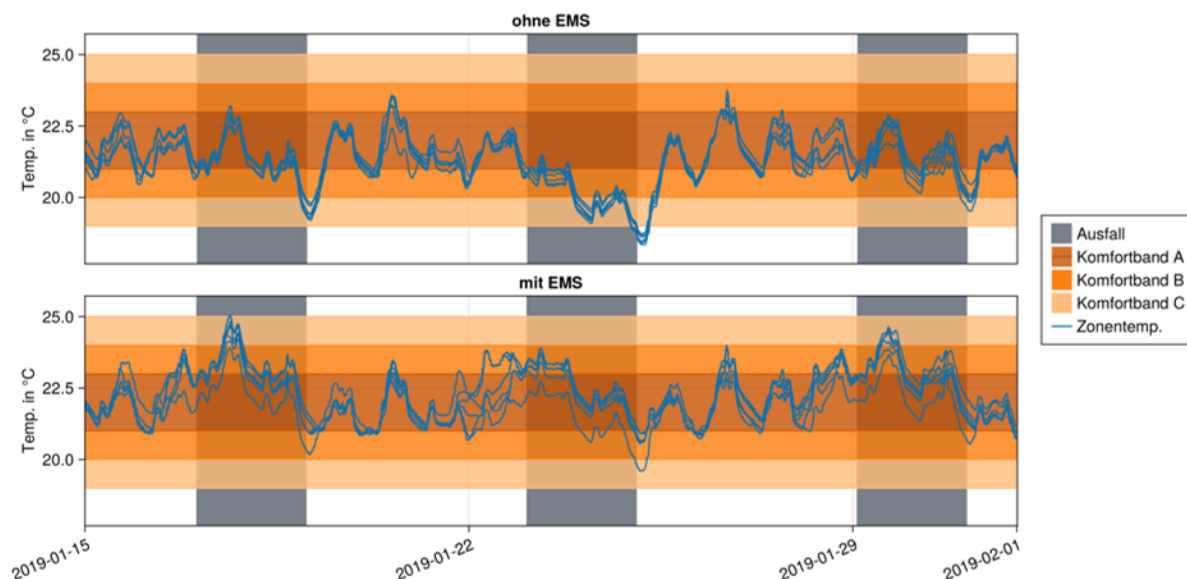


Abbildung 42: Gegenüberstellung von einer Standardregelung und einem EMS, das von einem bevorstehenden Ausfall der Heizkreispumpe informiert ist. Das EMS heizt entsprechend vor, um einer Unterkühlung vorzubeugen. Dabei kommt es aber umgekehrt teilweise zu einer Überschreitung der Komfortgrenzen in die andere Richtung, d.h. einer geringfügigen Überhitzung, da die Zeitkonstanten entsprechend lange sind.

Dem Fall des unvorhergesehenen Ausfalls der Heizkreispumpe wird eine modellprädiktive Regelung gegenübergestellt, welche zuvor von dem Ausfall in Kenntnis gesetzt wird. Dies würde einer angemeldeten Wartung entsprechen. Hier sollte die MPC gegenüber einer Standardregelung gewisse Vorteile erzielen können, insbesondere wenn eine Bauteilaktivierung vorhanden ist. Der Effekt hält sich auch hier in Grenzen, da die MPC zwar vorheizt, dadurch aber eine potentielle Überhitzung in Kauf nimmt, siehe Abbildung 42.

5.8.5. Prognosefehler

Bereits im Vorprojekt ÖKO-OPT-QUART wurde untersucht, wie sich ein Fehler in der Wettervorhersage auf die Effizienz der modellprädiktiven Regelung auswirkt. Damals wurde aus der Wetterprognose ein falscher Ertrag aus der Photovoltaik sowie ein falsches Abnahmeprofil ermittelt. Im vorliegenden Projekt ergibt sich daraus eine falsche Abschätzung der Temperaturentwicklung in den einzelnen Zonen, was zu einer verringerten Nutzbarkeit der Gebäudemasse als thermischer Speicher und/oder zu einem Komfortverlust führen kann.

In den bisher untersuchten Szenarien wurde, um das Potential der modellprädiktiven Regelung unabhängig von der Qualität der Wetterprognosen beurteilen zu können, immer von einem perfekt bekannten Außentemperatur- und Solareinstrahlungsprofil ausgegangen. In diesem Abschnitt wird auf die Auswirkungen einer fehlerhaften Wetterprognose eingegangen. Dazu wurden echte Wetterprognosen des Dienstleisters *meteoblue* eingesetzt, welche auch als Grundlage für die Wetterdaten in der Simulation dienten. Dazu wurden die jeweils kurzfristigsten Daten der Wetterprognosen als echte Werte angenommen und in die Datei, welche in der Simulation das Wetter beschreibt, eingetragen. Dadurch werden die für die Optimierung verwendeten realen Wetterprognosen zumindest kurzfristig mit den realen Wetterdaten übereinstimmen, da die Prognosen nur stündlich aktualisiert werden.

In der Simulationsstudie konnte kein nennenswerter Unterschied zwischen der Verwendung einer perfekten und einer realen Prognose festgestellt werden. In Abbildung 43 sind die relativen Zeiten in den Komfortkategorien abgebildet und zeigen nur einen geringfügig schlechteren Komfort bei Verwendung echter Prognosen. Dem gegenüber steht sogar ein geringfügig höherer Bezug aus der Fernwärme bei der Regelung mit perfekter Voraussicht, d.h. wenn die zukünftigen Wetterbedingungen exakt bekannt sind. Dies kann einerseits am etwas besseren Komfort liegen, kann aber auch innerhalb der Schwankungsbreite der Qualitätsunterschiede in den thermischen Modellen der einzelnen Zonen liegen – diese sind nicht in jedem Durchlauf gleich und können das Ergebnis zumindest geringfügig verändern. Das Resultat sind jedenfalls für diesen Versuch geringfügig höhere Kosten für den eigentlich besseren Fall (Abbildung 44).

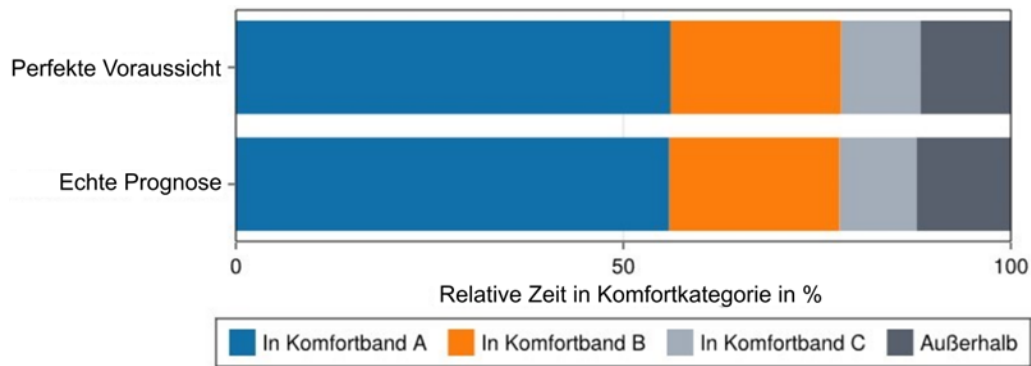


Abbildung 43: Vergleich zwischen perfekt bekannten Außentemperaturen und solarer Einstrahlung („Perfekte Voraussicht“) und der Verwendung echter Prognosen. Der Komfortverlust ist nur sehr gering.

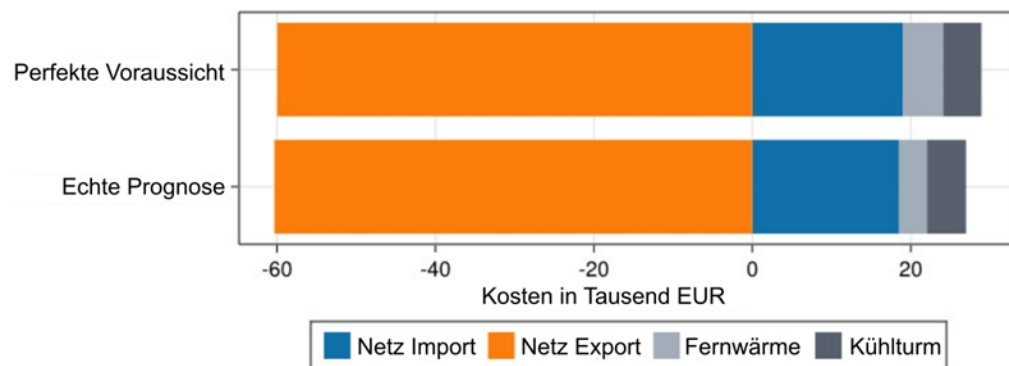


Abbildung 44: Bei der Verwendung echter Prognosen konnten in diesem Fall sogar geringere Kosten erzielt werden, was allerdings nur teilweise auf den geringfügig geringeren Komfort zurückzuführen sein dürfte. Unterschiede in den thermischen Modellen können ebenso zu einer gewissen Schwankungsbreite führen.

6 Schlussfolgerungen

In diesem Projekt konnten thermische und ökonomische Modelle für ein gesamtes Stadtquartier erstellt werden, welche dem Quartier 1 des Gebietes Graz-Reininghaus entsprechen. Diese konnten mit einer modellprädiktiven Regelung verbunden werden, welche mit Hilfe automatisch identifizierter, sehr einfacher mathematischer Modelle der einzelnen thermischen Zonen die Temperaturregelung gewährleisten und so ausnutzen konnte, dass der Energiezentrale relevante Flexibilität zur Verfügung gestellt werden konnte und somit der Eigenverbrauch von Strom aus Photovoltaik deutlich erhöht, die Abhängigkeit von externer Wärme aus der Fernwärme deutlich reduziert werden konnte. Durch die damit mögliche Reduktion der Gleichzeitigkeit sind entweder geringere Leistungsanforderungen an die Energieversorgung, oder höhere Ausbaupotentiale erreichbar.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes liegen einerseits in der Darstellung des Flexibilitätspotentials von Gebäuden mit und ohne Betonkernaktivierung, welches bei zukünftigen Bauunternehmungen berücksichtigt werden kann. Grundvoraussetzung für dessen Hebung ist jedoch der Einsatz einer modellprädiktiven Regelung, wie sie z.B. von BEST – Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH im Rahmen dieses Projektes entwickelt wurde. Während das Softwareframework im Hintergrund nicht öffentlich verfügbar ist, sind die Algorithmen in wissenschaftlichen Arbeiten und Berichten wie diesem publizierbaren Endbericht veröffentlicht. Als nicht gewinnorientiertes Forschungszentrum erhofft sich BEST zudem, die gewonnenen Erkenntnisse in Kooperationen mit Unternehmenspartnern, insbesondere Anbietern von Gebäudeautomatisierungen, weiterzuentwickeln und schließlich in die Praxis umzusetzen.

Dazu wird von den Partnern in zwei Folgeprojekten eine reale Umsetzung der in diesem Projekt nur in Simulationen validierten prädiktiven Zonenregelung angestrebt; zum Zeitpunkt der Erstellung des Endberichtes lief eine erste Implementierung bereits in einem Gebäude des Campus Inffeldgasse in Graz über mehrere Wochen erfolgreich durch und wurde sogar um die Möglichkeit, Feedback von Bewohner:innen in die Regelung einfließen zu lassen, erweitert (Projekt UserGRIDs). In einem anderen Projekt ist die Umsetzung in Einfamilienhäusern geplant, welche sich als etwas herausfordernder als in einem Bürogebäude mit relativ klaren Raumbelegungsmustern darstellen wird.

Die Arbeiten stellen den Grundbaustein für zahlreiche mögliche Implementierungen in einzelnen Gebäuden und Stadtquartieren dar. Erst die gemeinschaftliche Betrachtung von Energiezentrale und Raumtemperaturregelung ermöglicht das Ausschöpfen des vollen Optimierungspotentials bestehender und zukünftiger Infrastruktur, um einen wesentlichen Beitrag zur Energiewende leisten zu können.

7 Ausblick und Empfehlungen

Zwei zentrale Themen konnten in dem Projekt nur angerissen werden. Einerseits steht und fällt die modellprädiktive Regelung mit der Qualität der automatisch ermittelten Zonenmodelle, mit welchen die Auswirkungen von Heizen, Kühlen, Außentemperatur und solarer Einstrahlung auf die Raumtemperaturen abgeschätzt werden können. Die größte Herausforderung hierbei sind externe und nicht einfach vorhersehbare Einflüsse wie das Öffnen von Fenstern oder das Ein- und Ausschalten von elektrischen Applikationen, die in relevanter Abwärme resultieren (Kochen, Computer in Büros, ...). Diese internen Lasten sind in den Gebäudesimulationen als einfache Programme hinterlegt, und das Modell für die prädiktive Regelung kann dieses Wissen einsetzen, indem z.B. nur die durchschnittliche eingebrachte Leistung geschätzt werden muss, aber der zeitliche Verlauf bereits bekannt ist. Das ist ein Vorteil gegenüber der Realität, in der sämtliche Einflüsse gleichzeitig und unvorhergesehen auf die Raumtemperatur einwirken können.

Die Ergebnisse zur verteilten Optimierung erfordern ebenfalls weitere Untersuchungen. Mit einer ausreichenden Reduktion der behandelten Zonen ist eine zentralisierte Optimierung einerseits wesentlich schneller als eine verteilte, welche auf mehreren Iterationen aufbaut, andererseits ist mit ihr eine Konvergenz zum globalen Optimum garantiert. Der Vorteil der verteilten Optimierung manifestiert sich erst dann, wenn es wirklich eine Vielzahl an Recheneinheiten mit geringer Rechenleistung gibt, die real parallel arbeiten können; in Simulationen werden die einzelnen Regler alle auf ein und derselben Maschine berechnet und erscheinen daher wesentlich langsamer. Hierzu und zu dem praktischen Konvergenzverhalten der untersuchten Algorithmen wird weiter zu forschen sein.

Der nächste große Schritt ist jedenfalls die Entwicklung eines Geschäftsmodells, welches den Einsatz einer energie- oder kostensparenden intelligenten Regelung praktisch ermöglicht. Ein solcher Einsatz ist im Sinne von „Smart Home“ für Einfamilienhäuser immer sinnvoll, für größere Quartiere oder Wohneinheiten jedoch, wo die Stakeholder unterschiedliche Interessen haben, nicht immer logisch. Eine Berücksichtigung im Energieausweis oder ähnliche motivierenden Maßnahmen, welche einen höheren Preis einer Immobilie beim Kauf oder bei der Miete rechtfertigen, sollte propagiert werden. Mit den aktuellen Ausbauplänen von Quartieren in den größeren Städten würde ein wesentlicher Beitrag zur Ökologisierung des Gebäudesektors geliefert werden können.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mögliche übergeordnete Struktur des Zusammenspiels von Gebäuderegeln und der Regelung der Energiezentrale. Zum Einsatz kommen vorausschauende, optimierende Regelungen (z.B. <i>model predictive control</i> , MPC).....	9
Abbildung 2: Proposed structure of the interaction between individual building control units and the controller of the energy hub. The controllers used are predictive, optimizing controllers (e.g. model predictive controllers, MPC).....	10
Abbildung 3: Prinzipielles Schema einer modellprädiktiven Regelung für eine Energieversorgungszentrale/Anlage.....	16
Abbildung 4: Modellprädiktives Regelungssystem der Energiezentrale aus dem Projekt ÖKO-OPT-QUART (rechts) und dessen Erweiterung auf die thermisch aktivierbaren Bauteile eines Stadtquartiers (links). In ÖKO-OPT-AKTIV wurde auf den Batteriespeicher sowie den thermischen Speicher in der Energiezentrale verzichtet, um sich ganz auf die Speicherwirkung der Gebäudemassen konzentrieren zu können.....	21
Abbildung 5: Links: Foto des Baugrunds für das Bauvorhaben „ENW-Reininghaus-Q1“ (Quelle: https://www.google.at/maps). Rechts: 3D-Modell von Q1 in der Simulationsumgebung IDA ICE.....	25
Abbildung 6: Energieversorgungs-Hauptschema des Bauvorhabens „ENW-Reininghaus-Q1“ (TB-STARCHEL Ingenieurbüro-GmbH, 2020).....	25
Abbildung 7: Darstellung der vordefinierten Lastverläufe (interne Wärmelasten) für Personenanwesenheiten, elektronische Geräte und Beleuchtung in den Zonen mit Büro- und Wohnungsnutzung, wie sie im Modell mit dem Detaillierungsgrad 1 verwendet werden.....	26
Abbildung 8: 3D Modell des Gebäudemodells - „ENW-Reininghaus-Q1“ im Detaillierungsgrad 1.....	27
Abbildung 9: Ausschnitte vom 3D Modell des Gebäudemodells des „ENW-Reininghaus-Q1“ im Detaillierungsgrad 2 - (1) Greentower, (2) Zonierung der Wohnungen, (3) gesamtes Quartier Q1.....	29
Abbildung 10: Ausschnitt (der 3 D Modelle) aus den Simulationsmodellen der beiden Wohnungen aus dem BT01 (Greentower).....	30
Abbildung 11: Turm der Mälzerei und für die Photovoltaik berücksichtigte Flächen.....	31
Abbildung 12: Schematische Abbildung der in der Optimierung berücksichtigten Energiezentrale. Der Wärme- und Kühlbedarf können durch aktive Lastverschiebung beeinflusst werden. Das Ertragsprofil aus der Photovoltaik ergibt sich aus der solaren Einstrahlung.....	31
Abbildung 13: Blockschaltschema des vereinfachten Anlagenmodells in IDA ICE.....	32
Abbildung 14: Blockschaltschema des detaillierten Anlagenmodells in IDA ICE, erstellt mit Hilfe des ESBO-Plant Tools.....	33
Abbildung 15: Schematische Darstellung zur Beschreibung der Schnittstelle zwischen der Simulationssoftware und der Regelung.....	34
Abbildung 16: Aufteilung der Investitionskosten der Energiezentrale auf Hauptkostenpositionen	37

Abbildung 17: Aufteilung der für die Wärme- und Kälteversorgung relevanten Investitionskosten der Gebäude auf Hauptkostenpositionen	38
Abbildung 18: Konzept einer Optimierung mit detaillierten thermischen und ökonomischen / ökologischen Simulationsmodellen. Ein Black-Box-Optimierer variiert Stellgrößenverläufe, die an die Simulationen geschickt werden so, dass die Kosten minimiert werden.....	40
Abbildung 19: Vereinfachtes RC-Ersatzmodell eines einzelnen Raumes. Die Stromquellen repräsentieren Wärmeeinträge, Kapazitäten entsprechen Wärmespeichern. Wärmeleitung erfolgt über (thermische) Widerstände, wenn an den Knoten unterschiedliche Potentiale (=Temperaturen) vorliegen.....	41
Abbildung 20: Schematisches Abbild eines mathematischen Modells einer thermischen Zone mit den berücksichtigten Zustands-, Eingangs- und Störgrößen. Die Ausgangsgröße ist die Raumtemperatur.	42
Abbildung 21: Schrittkette, um von Modellen, die in IDA ICE verwendet werden können, zu einem Modell in OpenStudio zu gelangen, dessen Format IDF von der BRCM-Toolbox verstanden wird und der Erstellung eines RC-Ersatzmodelles dient.....	43
Abbildung 22: Reduktion der ursprünglichen Anzahl der Schichten (links). Die resultierende Modellgüte legt eine Beibehaltung von zumindest zwei Schichten nahe (rechts).....	43
Abbildung 23: Beispielhafter Verlauf der Schätzung des internen Wärmeeintrages. Das in der Simulation definierte Profil wird gut wiedergegeben.....	46
Abbildung 24: Beispielhafter Wärmebedarf mehrerer Zonen, wenn nicht von einer übergeordneten Regelung eingegriffen wird. Eine Änderung des Sollwertes der Raumtemperatur (oben) führt sofort zu Leistungsspitzen aller betroffenen Zonenregler (türkise Linien unten). Die Gesamtleistung (dunkelblau, unten) springt dadurch enorm.....	49
Abbildung 25: Ergebnis einer globalen Optimierung. Die Temperaturen der einzelnen Zonen sollen innerhalb eines Referenzbandes um den Temperatursollwert verbleiben, aber in Summe zu einem möglichst geringen Unterschied zwischen der Minimal- und Maximalleistung führen (strichlierte Linie unten). Man erkennt deutlich die Absenkung der Lastspitze auf unter 1000 kW.....	49
Abbildung 26: Ergebnis der verteilten Optimierung mit Hilfe von ADMM. Das Ergebnis ist mit dem der zentralen Optimierung vergleichbar, benötigt aber etliche Iterationen, um zu konvergieren.	50
Abbildung 27: Ergebnis der Identifikation mittels MRI-Methode. Aus: Andreas Moser et al.: Automatic Thermal Model Identification and Distributed Optimisation for Load Shifting in City Quarters. International Journal of Sustainable Energy (in Begutachtung).....	52
Abbildung 28: Ergebnis der Modellidentifikation für ein Büro des Bauteils 2. Die Modellqualität ist so gut, weil die Eingangsgrößen (Heizen, Kühlen) beliebig variiert werden konnten, und weil die internen Lasten sehr regelmäßig auftraten.	53
Abbildung 29: Ergebnis der Modellidentifikation für eine Wohnung. Die internen Lasten sind weniger regelmäßig, die Prädiktionen sind damit weniger gut.	54
Abbildung 30: Verteilung der Zonentemperaturen ohne und mit EMS und Bauteilaktivierung. Im Sommer kommt es in beiden Fällen zu einer Temperaturüberhöhung durch solare Einstrahlung, die durch die Kühlung nicht vollständig unterbunden werden kann. Das EMS präferiert kühlere Temperaturen im Winter.	57

Abbildung 31: Vergleich der relativen Zeit, welche die einzelnen Zonen in den jeweiligen Komfortbändern verbrachten, gewichtet mit der Bruttogeschoßfläche der jeweiligen Zonen. Mit EMS wird der Komfort deutlich gesteigert, mit Bauteilaktivierung ist dieser ebenfalls höher.	58
Abbildung 32: Jährlicher Wärme- und Kühlbedarf der Gebäude für die vier unterschiedlichen Szenarien.	58
Abbildung 33: Gegenüberstellung von Kühlbedarf (echter Kühlbedarf in den Gebäuden und nicht zeitgleicher Rückkühlbedarf) und Erzeugung (über die Wärmepumpe oder den Brunnen).	59
Abbildung 34: Gegenüberstellung von Wärmebedarf (echter Wärmebedarf der Gebäude und nicht zeitgleicher Abwärme, welche im Kühlturm oder im Brunnen vernichtet werden muss) und Erzeugung. Das EMS reduziert die Notwendigkeit des Einsatzes des Kühlturms sowie die Abdeckung von Lastspitzen durch die Wärmepumpe maßgeblich. Der Bedarf an Fernwärme für die Warmwasserversorgung ist hier nicht berücksichtigt, da er nicht vom Szenario abhängt.....	59
Abbildung 35: Ursprung der Stromversorgung der Wärmepumpe (linke Achse) bzw. Einsatz der Fernwärme (rechte Achse). Der erhöhte Strombezug aus dem Netz steht einem deutlich reduzierten Wärmebezug aus dem Fernwärmenetz beim Einsatz des EMS entgegen.	60
Abbildung 36: Darstellung jährliche Betriebskosten inkl. Erlöse aus PV.....	60
Abbildung 37: Beitrag der Hauptkosten auf die Energiegestehungskosten je Szenario.	61
Abbildung 38: Auswirkung einer Reduktion der Erzeugungskapazität auf die Heizkosten Jänner-März (mit Bauteilaktivierung).....	62
Abbildung 39: Auswirkung einer Reduktion der Erzeugungskapazität auf die Kühlkosten Juni-August (mit Bauteilaktivierung). Da der Ertrag aus dem Stromexport dominiert, sind die Kosten negativ. Der höhere Ertrag bei niedrigerer Erzeugungskapazität liegt daran, dass die Kühlleistung der Wärmepumpe nicht substituiert werden kann und es in diesem Fall zu einer Unterversorgung kommt.....	63
Abbildung 40: Auswirkung einer Reduktion der Kühlleistung auf den Komfort. Da es keine alternative Quelle für Kälte gibt, werden die Komfortbandgrenzen häufiger verletzt. Das EMS kann durch die Bauteilaktivierung die Last verschieben und den Komfort länger aufrechterhalten.....	64
Abbildung 41: Dauerlinien für das erste Quartal (Heizbedarf) mit Bauteilaktivierung. Mit EMS (rechts) werden höhere Leistungen prinzipiell seltener gefordert. Da alle Leistung über der maximalen Leistung der Wärmepumpe von der teureren Fernwärme bereitgestellt werden muss, können damit die Kosten reduziert werden. Die blaue Fläche über der Heizbedarfskurve stellt Abwärme der Wärmepumpe dar, da auch im ersten Quartal ein Kühlbedarf auftritt, welcher über die Wärmepumpe / Kältemaschine bereitgestellt werden muss.....	64
Abbildung 42: Gegenüberstellung von einer Standardregelung und einem EMS, das von einem bevorstehenden Ausfall der Heizkreispumpe informiert ist. Das EMS heizt entsprechend vor, um einer Unterkühlung vorzubeugen. Dabei kommt es aber umgekehrt teilweise zu einer Überschreitung der Komfortgrenzen in die andere Richtung, d.h. einer geringfügigen Überhitzung, da die Zeitkonstanten entsprechend lange sind.	65
Abbildung 43: Vergleich zwischen perfekt bekannten Außentemperaturen und solarer Einstrahlung („Perfekte Voraussicht“) und der Verwendung echter Prognosen. Der Komfortverlust ist nur sehr gering.....	67

Abbildung 44: Bei der Verwendung echter Prognosen konnten in diesem Fall sogar geringere Kosten erzielt werden, was allerdings nur teilweise auf den geringfügig geringeren Komfort zurückzuführen sein dürfte. Unterschiede in den thermischen Modellen können ebenso zu einer gewissen Schwankungsbreite führen. 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eckdaten der Gebäude des geplanten Bauvorhabens „ENW-Reininghaus-Q1“	26
Tabelle 2: Vergleich von Bruttogeschossfläche, Heiz- und Kühlleistung zwischen Modell und Plandaten.	28
Tabelle 3: Zusammenfassung der verwendete Emissionsfaktoren für Strom und Fernwärme. Werte für Strom wurden aus OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz OIB-330.6-027/19, April 2019, entnommen. Werte für Fernwärme stammen aus: Wissenschaftlicher Bericht Nr.84-2019.....	35
Tabelle 4: Kosten für Stromzukauf und Einspeisung. Preise aus dem Jahr 2019.....	38
Tabelle 5: Steuer- und Abgaben fürs Stromnetz. Werte für Netzebene 6 - Graz. Quelle: Daten aus Verordnungen; BUNDESGESETZBLATT FÜR DIE REPUBLIK ÖSTERREICH 18.12.2020 und Verordnung der Regulierungskommission der E-Control, mit der die Entgelte für die Systemnutzung bestimmt werden - Fassung vom 12.12.2022.....	39
Tabelle 6: Fernwärmekosten. Eigene Annahmen basierend auf Wert ohne USt. aus dem Preisblatt für Fernwärme der Energie Graz (gültig ab 1.12.2022)	39
Tabelle 7: Grenzen der Zonentemperaturen für die Komfortklassen A, B und C gemäß ISO7730.....	47
Tabelle 8: Für die Optimierung hinterlegte Kosten und Tarife basierend auf dem Jahr 2019.....	56
Tabelle 9: Energiegestehungskosten in €/MWh für die vier Szenarien: Fußbodenheizung mit EMS, Fußbodenheizung ohne EMS, Bauteilaktivierung mit EMS, Bauteilaktivierung ohne EMS.	61

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)