

Stadtquartiere mit optimierten solar- hybriden Heiz- und Kühlsystemen

CiQuSo

T. Selke, P. Horn, S. Hauer,
J. Peters-Anders, A. Thür,
A. Goritschnig, W. Doll
J. Furtner, B. Kaiser

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

23/2019

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

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise 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/>

Stadtquartiere mit optimierten solar- hybriden Heiz- und Kühlsystemen

CiQuSo

T. Selke, P. Horn, S. Hauer, J. Peters-Anders
AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Center for Energy

A. Thür
Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen

A. Goritschnig
AEE - Institut für Nachhaltige Technologien

W. Doll
S.O.L.I.D. Gesellschaft für Solarinstallationen und Design m.b.H.

J. Furtner
ENGIE Kältetechnik GmbH

B. Kaiser, S. Raudaschl
Salzburg Wohnbau GmbH

Wien, Juli 2018

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT). 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 von allen betroffenen Bereichen 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 BMVIT publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	9
Abstract	13
1 Ausgangslage und Motivation	17
1.1 Die Grundidee	18
1.2 Aufgabenstellung	18
2 Stand der Technik	20
2.1 Stadtteil Itzling	20
2.2 Solarhybrides Heizen und Kühlen	22
2.3 Methoden zur Optimierung urbaner Energiesysteme	24
3 CiQuSo - Methode	26
3.1 Beschreibung des entwickelten ‚Frameworks‘ zur Optimierung	26
3.2 Vorgehensweise zum entwickelten CiQuSo ‚Framework‘	29
3.3 Definition und Modellierung der solaren Energiesysteme	31
3.4 Erstellung der Ersatzmodelle	33
3.5 Methode zur Erstellung der Ersatzmodelle zur Beschreibung des energetischen Gebäudeverhaltens	33
3.6 Methode zur Erstellung der Ersatzmodelle zur Beschreibung des energetischen Betriebsverhaltens urbane solarer Energiesysteme	34
3.7 Gebäudeübergreifender Energieaustausch	35
4 Ergebnisse	36
4.1 Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens mit dem RC- Modellierungsansatz	36
4.2 Ersatzmodelle zur Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens der solaren urbanen Energiesysteme	38
4.3 Urbane Solare Energiesysteme	39
4.4 BIG Solar Energiesystem	48
4.5 Umgesetzte CiQuSo – Optimierungsmethode	50
4.6 Quantifiziertes Lastverschiebepotenzial auf Quartiersebene	51
4.7 GIS-Visualisierung	53
4.8 Quartiersoptimierung	57
5 Schlussfolgerungen	62
6 Ausblick und Empfehlungen	66
7 Verzeichnisse	68
7.1 Abbildungsverzeichnis	68
7.2 Tabellenverzeichnis	70
7.3 Literaturverzeichnis	71
8 Anhang	73

Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Ambitionierte politische Vorgaben sowie die formulierten Klima- und Energieziele Österreichs können erreicht werden, wenn Städte als Hauptenergienutzer und Verursacher von Treibhausgasemissionen, die notwendige Transformation zur Nutzung erneuerbarer Energieträger, insbesondere der Solarenergie maßgeblich mitgestalten und umsetzen. Folglich ist die Quartiersplanung mit den Zielsetzungen der Implementierung städtischer Energieeffizienz, der urbanen Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie der Verwendung ökologischer Baumaterialien ein wirksamer Hebel und diese ist gegenwärtig einem starken Diskurs in der Wissenschaft, Politik und Praxis ausgesetzt. Städte nutzen derzeit ihre Nachhaltigkeitspotenziale (Reduktion der Treibhausgasemissionen, Reduktion des Endenergieverbrauchs und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger) bei Weitem nicht aus. Städte sind jene Orte, in denen die großen Transformationen ausgelöst und gelebt werden, in denen Innovation zum Tragen kommt und die eine substantielle Dichte an AkteurlInnen besitzen, um die notwendigen Handlungen und Maßnahmen umzusetzen.

In diesem Zusammenhang spielt die umfassende Nutzung der solaren Energie in der Stadtplanung eine essentielle Rolle. In der ENERGIE Forschungs- und Innovationsstrategie für Österreich 2017 wird die Vision für Gebäude und Quartiere klar beschrieben: „Plus-Energie-Quartiere sind der Baustandard und gleichzeitig ein fixer Bestandteil von attraktiven und lebenswerten urbanen Gebieten und Städten.“ Um dieser Vision näher zu kommen, bedarf es Forschungs- und Umsetzungsprojekte, die belastbare Grundlagen zu den technischen Systemlösungen zur verstärkten Nutzung des urbanen Solarenergiepotenzials liefern. Der vorliegende CiQuSo-Endbericht versteht sich als Beitrag, um in der frühen Entwicklungsphase der Quartiersplanung erste Grundlagen zu möglichen Technologiesystemlösungen mit solarem Heizen und Kühlen auf Stadtquartiersebene bereitzustellen.

Inhalte und Zielsetzungen

Die **Hauptzielsetzung** des abgeschlossenen ‚Stadt der Zukunft‘-Projektes der ersten Ausschreibung war die Entwicklung, Evaluierung und Optimierung eines Vorplanungstools für Systemlösungen zum solaren Heizen und Kühlen auf Stadtquartiersebene. Dazu stand die **Entwicklung einer Methode** im Vordergrund, die **rasch optimale urbane solare Systemlösungen auf Quartiersebene** aufzeigt. Dank dieser Methode sollen in der frühen Entwicklungsphase von Quartiers- bzw. Stadtteilprojekten die Potenziale einer optimierten Solarenergienutzung zur urbanen Wärme- und Stromversorgung quantifiziert werden.

Die **Quartiersoptimierung** soll aus vielen möglichen Technologiekombinationen geeigneter solarhybrider Heiz- und Kühlsysteme für eine definierte Gebäudenachbarschaft (Quartier) jene identifizieren, die unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches (Strom und Wärme) zu besten Resultaten hinsichtlich eines gewählten Zielparameters (Endenergieverbrauch, CO₂-Emission, nicht erneuerbarer Primärenergieverbrauch, etc. des Quartiers) führt. Die Funktionalität der entwickelten Methode zur solaren Quartiersoptimierung

wurde anhand einer beispielhaften Gebäudenachbarschaft aus dem Salzburger Stadtteil Itzling demonstriert.

Methodische Vorgehensweise

Grundsätzlich zeichnet sich ein Quartier durch die Vielfalt seiner unterschiedlichen Gebäudetypen, seiner Energieversorgungssysteme und seines Energiemanagements durch Komplexität aus. Für die Quartiersoptimierung mit rechnergestützten Verfahren entscheidet der Modellierungsansatz über die notwendige Simulationszeit und die erzielbare Ergebnislänge. Nach dem Stand der Technik ist die Co-Simulation von geeigneten Expertentools ein möglicher Lösungsansatz, um eine Quartiersoptimierung computergestützt umzusetzen. Dieser methodische Ansatz zieht einen hohen Modellierungsaufwand nach sich und lange Rechenzeiten zur Identifikation optimaler Technologiekombinationen sind die Folge.

Im Gegensatz dazu fußte die zunächst zu entwickelnde *CiQuSo*-Methode der solaren Quartiersoptimierung auf generisch vereinfachten Ersatzmodellen. Diese angestrebte Methode besteht aus drei Hauptblöcken:

- Vereinfachte Gebäudemodelle: Diese sind vereinfachte generische Ersatzmodelle und bilden das thermische Gebäudeverhalten ausgewählter Gebäudetypen ab.
- BlackBox-Modelle: Diese sind mathematische Ersatzmodelle und bilden das energetische Anlagenverhalten der definierten solaren Heiz- und Kühlsysteme (SH&K) ab.
- *Vernetzer*-Algorithmus: Dieser weist den Gebäuden eines Stadtquartiers jeweils ein solares Heiz- und Kühlsystem zu und führt einen Optimierungs-Algorithmus aus.

Insbesondere zur Ersatzmodellerstellung für die vereinfachte Abbildung des dynamischen Betriebsverhaltens solarer Heiz- und Kühlsysteme wurde Neuland betreten und künstliche neuronale Netze (KNN) und Entscheidungsbäume (Decision Trees) wurden zur BlackBox-Modellierung angewendet, analysiert und optimiert. Weiters wurde ein vernetzender Quartiers-Algorithmus entwickelt, welcher den Gebäuden des Stadtviertels jeweils ein solares Heiz- und Kühlsystem zuweist und einen Optimierungs-Algorithmus ausführt. Die Quartiersoptimierung kann gleichzeitig folgende **Optimierungsziele** unabhängig voneinander berechnen:

- **Thermische Eigenverbrauchsoptimierung**, d.h. möglichst wenig thermischen Bedarf aus dem Fernwärmenetz für das Quartier beziehen
- **Elektrische Eigenverbrauchsoptimierung**, d.h. möglichst wenig elektrischen Bedarf aus dem elektrischen Netz für das Quartier beziehen
- **Primärenergie-Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration ist die benötigte Primärenergie im Quartier am geringsten?
- **CO₂-Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration sind die CO₂-Emissionen im Quartier am geringsten?
- **Ökonomische Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration können obige Ziele mit minimalsten Kosten (Annuitäten) erzielt werden?

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend wurden **folgende Ergebnisse** erreicht:

- **Untersuchte, evaluierte und optimierte energieeffiziente Systemlösungen** zur solaren Energieversorgung auf Gebäude- und Stadtquartiersebene. Diese wurden in entsprechender Simulationsumgebung modelliert und das energetische Betriebsverhalten wurde simuliert und ausgewertet. Für jede gerechnete solare Systemlösung wurde das thermische bzw. elektrische Lastverschiebepotenzial quantifiziert und die Systeme wurden ökologisch, energetisch und wirtschaftlich bewertet.
- **Erstellte und modellierte solarhybride Energiesysteme** basierend auf Photovoltaik und Solarthermie für Stadtquartiere.
- **Entwickelte, untersuchte und angewendete Methode zur Quartiersoptimierung** unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches (Wärme und Strom). Vom ersten Ansatz vereinfachte Ersatzmodelle sowohl für die Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens als auch des energetischen Betriebsverhaltens der solaren H&K-Systeme zu erstellen und diese für die Quartiersoptimierung auszuführen, musste aufgrund nichtausreichender Abbildungsgüte zu den Referenzdaten Abstand genommen werden. Die CiQuSo-Methode wurde daraufhin angepasst und alternativ greift der Vernetzer-Algorithmus zur Optimierung auf die Basismodelle und ihre Ergebniszeitreihen der Simulationsumgebungen EnergyPlus¹ (Gebäude) und TRNSYS² (SH&K-Systeme) zurück.
- Durchgeführte **Machbarkeitsstudie zur solaren Wärmeversorgung** der Salzburger Goethesiedlung durch eine Großkollektoranlage. Die Ergebnisse umfassen einerseits einen Dimensionierungsvorschlag und die Integration eines saisonalen Speichers mit thermischer Absorptions-Wärmepumpe und andererseits die energetische Bewertung.
- **Demonstrierte Anwendbarkeit** der entwickelten *CiQuSo*-Methode durch ausgewählte Gebäudenachbarschaften innerhalb des Salzburger Stadtquartiers Itzling. Zur Darstellung der Funktionalität und Leistungsfähigkeit der alternativ umgesetzten CiQuSo-Optimierungsmethode wurden sechs Gebäude als Repräsentanten aus dem Itzlinger Quartier ausgewählt. Aus mehreren zehntausend möglichen Kombinationen hat der Quartiersoptimierer jene Technologielösungen identifiziert, die zu den geringsten Werten bezüglich der CO₂-Emissionen, dem geringsten Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil) und den geringsten Strom- und Wärmeimporten ins Quartier führen bzw. mittels Annuitätenmethode ökonomisch im Vergleich zu Referenzsystemen bewertet. Vergleichsszenarien wurden definiert und mit den besten Datensätzen auf Gebäudeebene jeweils dem Optimierungsfall

¹ <https://energyplus.net/>

² http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm

gegenübergestellt. Insbesondere die modellierten solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme liefern für Quartierslösungen vielversprechende Ergebnisse.

- Ein arbeitsfähiges **webbasiertes CiQuSo-Visualisierungstool** (Prototyp) zur interaktiven Demonstration der entwickelten Methode zur Quartiersoptimierung und Illustration der vorausberechneten Ergebnisse wurde entwickelt.

Ausblick

Prinzipiell konnte die Funktionalität und Leistungsfähigkeit des entwickelten CiQuSo-Frameworks nachgewiesen werden. Für nachgelagerte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erscheint die Weiterentwicklung des CiQuSo-Frameworks 2.0 durch den Aufbau vereinfachter, mathematisch-physikalisch formulierter Modelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens und des energetischen Betriebsverhaltens der Gebäudetechniksysteme zielführend. Die generelle Herausforderung liegt darin einen ausgewogenen Kompromiss zu finden zwischen akzeptabler Rechenzeit und ausreichender Flexibilität hinsichtlich Systemkonfiguration und Berechnungsgüte der vereinfachten Modelle.

Aufgrund der nationalen Förderschwerpunkte im Programm Stadt der Zukunft in Richtung Plus-Energie-Quartiere ist zu erwarten, dass Quartiersprojekte mit solarhybriden Technologielösungen und den dazugehörigen Infrastrukturen zum gebäudeübergreifenden Energieaustausch vorbereitet und Umsetzungsprojekte gestartet werden. Es wird zur Fragestellung der energetischen Quartiersoptimierung kommen und methodische Ansätze und ausgewählte grundlegende Ergebnisse des durchgeführten CiQuSo-Projektes bilden eine erste Wissensgrundlage dazu.

Abstract

Starting point/Motivation

Cities, as the main users of energy and polluters of greenhouse gas emissions, need to play a decisive role in shaping and implementing the necessary energy transformation in order to achieve the ambitious political targets and Austria's formulated climate and energy goals. Consequently, neighborhood planning with the objectives of implementing urban energy efficiency, the urban use of renewable energy sources and the use of ecological building materials is an effective lever and is currently subject to an intense discourse in science, politics and practice. Cities are currently far from exploiting their sustainability potential (reduction of greenhouse gas emissions, reduction of final energy consumption and increase in the share of renewable energy sources). Cities are those places where the great transformations are triggered and lived, where innovation comes to bear, and which have a substantial density of actors to implement the necessary actions and measures.

In this context, the comprehensive use of solar energy plays an essential role in urban planning. The Energy Research and Innovation Strategy for Austria 2017 clearly describes the vision for buildings and neighborhoods: "Plus-energy neighborhoods are the building standard and at the same time an integral part of attractive and livable urban areas and cities. Getting closer to this vision requires research and implementation projects that provide a solid basis for technical system solutions that make greater use of the urban solar energy potential. This final report of the project CiQuSo is intended as a contribution to providing the first foundations for possible technology system solutions with solar heating and cooling at the urban district level in the early development phase of neighborhood planning.

Contents and Objectives

The main objective of this completed "Stadt der Zukunft" project of the first call for proposals was the development, evaluation and optimization of system solutions for solar heating and cooling at city district level. To this end, the focus was on developing a method that quickly identifies optimal urban solar system solutions at neighborhood level. Thanks to this method developed, the potential for optimized solar energy use for urban heating and electricity supply is to be quantified in the early development phase of neighborhood and district projects, with special consideration being given to innovative solar hybrid heating and cooling systems and energy exchange across buildings.

Finally, the neighborhood optimizations of many possible technology combinations of suitable solar hybrid heating and cooling systems for a defined building neighborhood (quarter) should identify the one that leads to the best results with regard to a selected target parameter, taking into account the energy exchange across buildings (electricity and heat). The feasibility of the developed method for solar neighborhood optimization is to be demonstrated by an investigation of an exemplary building neighborhood from the Salzburg district of Itzling.

Methods

In general, a quarter is characterised by the diversity of its different building types, its energy supply systems and its energy management through complexity. The modelling approach determines the necessary simulation time and the achievable result quality for neighbourhood optimisation with computer-aided methods. According to the state of the art, the co-simulation of suitable expert tools is a possible solution for computer-aided neighbourhood optimisation. This methodological approach entails a high modelling effort and long computational time for the identification of optimal technology combinations is to be expected.

In contrast, the developed CiQuSo method of solar neighbourhood optimisation is based on three main blocks:

- Simplified RC building models: These are simplified substitutional models and reflect the thermal building behavior of selected building types.
- BlackBox models: These are substitutional models and reflect the energetic system behavior of the defined solar hybrid heating and cooling systems.
- Network algorithm: Assigns an HVAC system to each building in a city quarter and executes an optimization algorithm.

In particular, new territory was entered for the creation of substitutional models for the simplified mapping of the dynamic operating behaviour of solar heating and cooling systems and artificial neural networks and decision trees were used, analyzed and improved for BlackBox modelling. Furthermore, a quarter algorithm was developed, which assigns a solar heating and cooling system to each of the buildings in the district and executes an optimization algorithm. Quarter optimization can simultaneously calculate the following optimization goals independently of one another:

- Optimization of heat self-consumption, i.e. obtaining as little thermal demand as possible from the grid for the quarter
- Optimization of electric self-consumption, i.e. obtaining as little electricity as possible from the grid for the neighborhood
- Primary energy optimization, i.e. where is the lowest primary energy required
- CO₂ optimization, i.e. where is the CO₂ emission lowest
- Economic optimization, i.e. which configuration can be used to achieve the above goals with minimum costs (annuities)?

Results

In summary, the following results were achieved:

- Investigated, evaluated and optimized energy-efficient system solutions for solar energy supply at building and city district level: These were modelled in a corresponding simulation environment and the energetic operating behavior was simulated and evaluated. For each calculated solar system solution, the thermal or electrical load shift potential is quantified, and the system was evaluated ecologically, energetically and economically.
- Generated and modelled novel, solar hybrid energy systems based on photovoltaics and solar thermal energy for city districts.
- Developed method for neighborhood optimization considering energy exchange between buildings (heat and electricity). To create simplified substitutional models and to execute them for the neighborhood option, the reference data had to be omitted due to insufficient imaging quality. The CiQuSo method was adapted and the network algorithm uses the basic models and their result time series of the simulation environments EnergyPlus (buildings) and TRNSYS (SHC systems) for optimization.
- Feasibility study for the solar heat supply of the Salzburg Goethesiedlung by a large solar collector system. The results include a dimensioning proposal and the integration of a seasonal storage tank with thermal heat pump on the one hand and the energetic evaluation on the other.
- Demonstrated applicability of the developed CiQuSo method by selected building neighborhoods within the Salzburg city district of Itzling. To demonstrate the functionality and performance of the alternatively implemented CiQuSo optimization method, six buildings were selected as representatives from the Itzlinger Quarter. From several tens of thousands of possible combinations, the city quarter optimizer has identified those technology solutions that lead to the lowest CO₂ emissions, the lowest primary energy demand (non-renewable share) and the lowest electricity and heat imports into the neighborhood. Comparison scenarios were defined and compared with the optimization case using the best data sets at building level. The modelled solar-hybrid heating and cooling systems deliver promising results for district solutions.
- A working web-based CiQuSo visualization tool (prototype) for the interactive demonstration of the developed method for neighborhood optimization and illustration of the pre-calculated results was developed.

Outlook & Recommendation for future research

In general, the functionality of the developed CiQuSo framework could be proven. For future research and development work, the further development of the CiQuSo-Framework 2.0 through the development of simplified mathematical-physical models for mapping the thermal building behavior and the energetic operating behavior of the building technology systems appears to be purposeful. The general challenge is to find an acceptable compromise between acceptable calculation time and sufficient calculation quality of the simplified models.

Due to the national funding priorities in the “Stadt der Zukunft” programme towards plus-energy neighborhoods, it is to be expected that neighborhood projects with solar-hybrid technology solutions and the associated infrastructures for cross-building energy exchange are in preparation and demonstration projects will be launched. The question of energetic neighborhood optimization will come up and methodical approaches and selected basic results of the CiQuSo project will form an initial knowledge basis.

1 Ausgangslage und Motivation

In der ENERGIE Forschungs- und Innovationsstrategie für Österreich 2017 (ENERGIE) wird die Vision für Gebäude und Quartiere klar beschrieben: „Plus-Energie-Quartiere sind der Baustandard und gleichzeitig ein fixer Bestandteil von attraktiven und lebenswerten urbanen Gebieten und Städten.“ Um dieser Vision näher zu kommen, widmet sich die aktuelle 5. Ausschreibung des nationalen Programms Stadt der Zukunft ‚Auf dem Weg zu Plus-Energie-Quartieren‘ diesem Themenfeld und fördert Umsetzungsvorhaben in Richtung Plus-Energie-Quartiere.

Weiters hat die Österreichische Bundesregierung in ihrem Regierungsprogramm für 2017 bis 2022 (RP2017-2022) die Erarbeitung, den Beschluss und die Umsetzung einer integrierten nationalen Klima- und Energiestrategie zur Erreichung der internationalen Verpflichtungen formuliert. Bis 2030 soll einerseits der Strom im nationalen Energiesystem zu 100 Prozent (national bilanziell) aus erneuerbaren Energiequellen erzeugt werden und andererseits gilt eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mindestens 36% bis 2030 (gegenüber 2005) als Etappenziel auf dem Weg zur vollständigen Dekarbonisierung des Österreichischen Energiesystems.

Diese ambitionierten politischen Vorgaben können nur erreicht werden, wenn die Hauptenergienutzer und Verursacher von Treibhausgasemissionen - die Städte - deren Muster in der Energienutzung und Produktion maßgeblich ändern. Folglich ist die energetische und ökologische Quartiersplanung, die Implementierung städtischer Energieeffizienz und urbaner Nutzung erneuerbarer Energiequellen sowie die Verwendung ökologischer Baumaterialien gegenwärtig einem starken Diskurs in der Wissenschaft, Politik und Praxis ausgesetzt. Städte nutzen derzeit ihre Nachhaltigkeitspotenziale (Reduktion der Treibhausgasemissionen, Reduktion des Endenergieverbrauchs und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energieträger) bei Weitem nicht aus. Städte sind jene Orte, in denen die großen Transformationen ausgelöst und gelebt werden, in denen Innovation zum Tragen kommt und die eine substantielle Dichte an AkteurInnen besitzen, um die notwendigen Handlungen und Maßnahmen umzusetzen. Der überwiegende Anteil der Bevölkerung lebt im urbanen Raum, mit stark wachsender Tendenz, welches ein nachhaltiges Handeln unumgänglich macht.

In diesem Zusammenhang spielt die umfassende Nutzung der solaren Energie in der Stadtplanung eine essentielle Rolle (Droege). Klimaschutz in Verbindung mit solarem Städtebau ist bereits aus unterschiedlichen Sichtweisen in diversen Literaturquellen und Publikationen beleuchtet worden (Vallenti). Hier wirken eine Vielzahl an Faktoren und Bedingungen, die erfüllt werden müssen, um das Erreichen der gesetzten Ziele zu ermöglichen. Zur Reduktion des Endenergieverbrauchs wurden jedoch bisher überwiegend Strategien verfolgt, die das Einzelhaus als Optimierungsobjekt bevorzugt haben (Everding). Jedoch ist es bereits aktueller Stand des Wissens, dass mehr Optimierungsspielräume und wirtschaftlich vorteilhafte Gesamtkonzepte auf der Ebene der Quartiere möglich sind und aktiviert werden können (Erhorn-Klutig). D.h. Stadtquartiere mit überwiegend vor Ort gelieferter Wärme und Elektrizität aus Solartechniken (Solarthermie, Photovoltaik) sind ein

potenzieller Baustein für Zukunftslösungen der Energiewende in Österreich. Insbesondere für Stadtentwicklungsgebiete ohne vorhandene Infrastruktur von Fernwärme werden Energiesystemlösungen unter Verwendung von Solarenergie vermehrt entworfen, geplant und gebaut.

1.1 Die Grundidee

Um die Nachhaltigkeitspotenziale (Reduktion der Treibhausgasemissionen, Reduktion des Endenergieverbrauchs und Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energie) von Städten verstärkt auszuschöpfen, bedarf es in der frühen Entwicklungsphase von Quartieren zielgerichtete und belastbare Informationen der Standortbezogenen Umsetzungsoptionen. Die energetische Optimierung für Einzelgebäude ist Stand der Technik und Methoden zur Potenzialabschätzung, Bewertung und Optimierung von Quartieren unter starker Nutzung der urbanen Solarenergie und unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches stehen erst am Anfang. Dieses Faktum greift das Forschungsprojekt CiQuSo auf und versucht die Wissenslücke zu den möglichen Potenzialen der solar energetischen Quartiersversorgung frühzeitig zu schließen. Mit einer geeigneten Methodik zur Quartiersoptimierung sollen den maßgeblichen Akteuren und Entscheidungsträgern in der frühen Entwicklungsphase zur Quartiersplanung die Auswirkungen energetisch kooperierender und hochgradig solarversorgter Gebäudeverbände aufgezeigt werden.

Daher hat das CiQuSo-Forschungsteam energieeffiziente Systemlösungen zur solaren Energieversorgung auf Gebäude- und Stadtquartiersebene untersucht, evaluiert und optimiert. Neuartige solarhybride Energiesysteme wurden basierend auf Photovoltaik und Solarthermie im Stadtquartier mit energieeffizienten Technologien konzipiert und in geeigneter Modellierungsumgebung abgebildet. Ein entwickelter Quartiersoptimierer identifiziert unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches aussichtsreiche Konstellationen aus Gebäudenachbarschaften und solaren Energiekonzepten mit maximierter Nutzung der vor Ort gelieferten Solarenergie. Weiters wurde eine Machbarkeitsstudie zur solaren Wärmeversorgung der Salzburger Goethesiedlung durch eine Großkollektoranlage durchgeführt. Die Anwendbarkeit und Funktionalität der entwickelten CiQuSo-Methode wurde durch eine ausgewählte Gebäudenachbarschaft innerhalb des Salzburger Stadtquartiers Itzling demonstriert.

1.2 Aufgabenstellung

Die **Hauptzielsetzung** des abgeschlossenen ‚Stadt der Zukunft‘-Projektes der ersten Ausschreibung war die Entwicklung, Evaluierung und Optimierung eines Vorplanungstools für Systemlösungen zum solaren Heizen und Kühlen auf Stadtquartiersebene. Dazu stand die **Entwicklung einer Methode** im Vordergrund, **die rasch optimale urbane solare Systemlösungen auf Quartiersebene** aufzeigt. Dank dieser entwickelten Methode sollen in der frühen Entwicklungsphase von Quartiers- bzw. Stadtteilprojekten die Potenziale einer optimierten Solarenergienutzung zur urbanen Wärme- und Stromversorgung unter besonderer

Berücksichtigung von neuartigen solarhybriden Heiz- und Kühlsystemen sowie des gebäudeübergreifenden Energieaustausches quantifiziert werden.

Weitere Teilziele waren die:

- **Entwicklung, Evaluierung und Optimierung von solarhybriden Energiekonzepten.** Basis dazu ist die sinnvolle Zusammenführung von solarthermischen und solarelektrischen Systemkonzepten, die einerseits neuartige Systemkonfigurationen ergeben und andererseits durch innovative Ansätze (z.B. reduziertes Systemdesign, Nutzung des Lastverschiebepotentials im Gebäude) Vorteile im Bereich Energieeffizienz, Anwendbarkeit und Wirtschaftlichkeit gegenüber bestehenden Konzepten aufweisen. Die entwickelten Systemkonfigurationen wurden auf Basis von Systemergebnissen energetisch, ökologisch und wirtschaftlich bewertet.
- **Entwicklung eines Quartiersoptimierers:** Letztlich soll der **Quartiersoptimierer** aus vielen möglichen Technologiekombinationen geeigneter solarhybrider Heiz- und Kühlsysteme für eine definierte Gebäudenachbarschaft (Quartier) jene identifizieren, die unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches (Strom und Wärme) zu besten Resultaten hinsichtlich eines gewählten Zielparameters führt. Unterschiedliche Optimierungsfälle wurden untersucht und die Optimierungsergebnisse wurden quantifiziert.

2 Stand der Technik

2.1 Stadtteil Itzling

Der nördliche Salzburger Stadtteil Itzling umfasst derzeit einen breit gestreuten Bestand an Gebäuden mit unterschiedlicher Nutzung von reinen Wohngebäuden, über Kleingewerbe, Dienstleistungs- und Industriebauten bis zu öffentlichen Einrichtungen für Lehre, Sport- und Freizeitgestaltung sowie Bauten der Energiewirtschaft, alle in Verbindung mit ausgeprägter Infrastruktur und Anbindung an das ÖPNV. In diesem Stadtteil leben etwa 10.000 Einwohner. Abbildung 1 zeigt eine schematische Karte zur Flächenwidmung des Stadtteils und Abbildung 2 stellt ein Luftbild aus dem Jahr 2015 dar.



Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Stadtteil Itzling mit Widmung (Quelle: AIT)

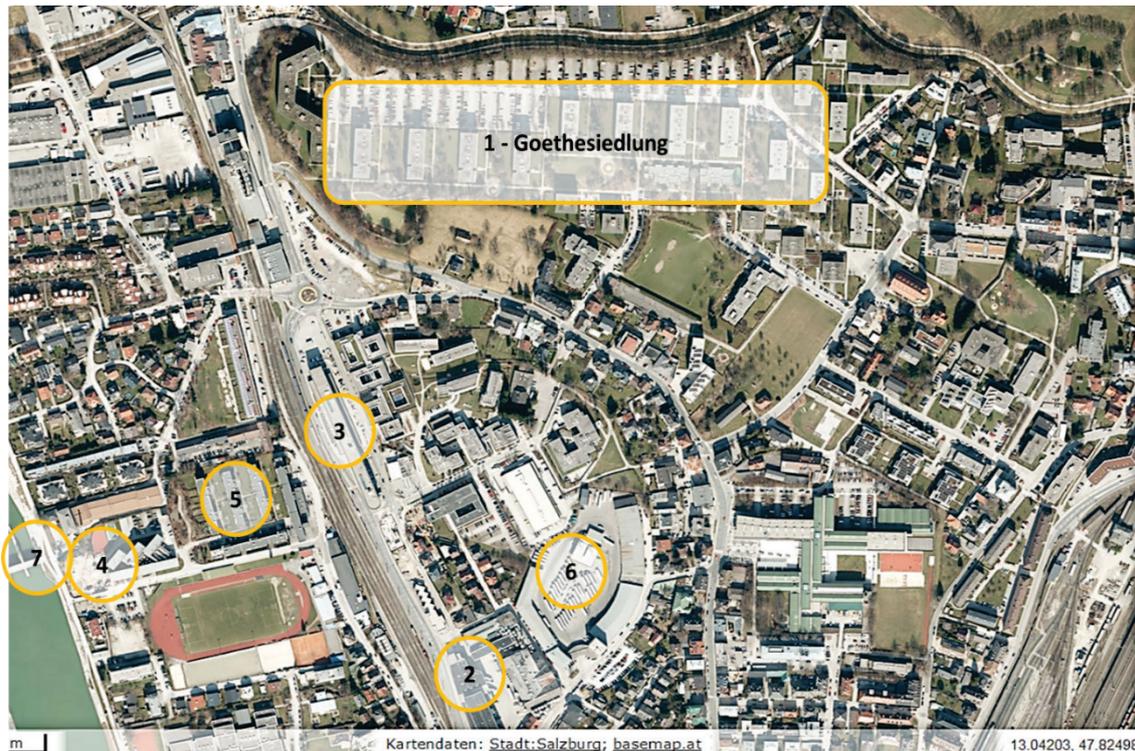


Abbildung 2: Luftbild – Ausschnitt aus dem Stadtteil Itzling mit bezifferten Gebäuden bzw. Siedlungen
(Quelle: <https://maps.stadt-salzburg.at>)

Für weiterführende Untersuchungen wurde eine Gebäudeauswahl vom CiQuSo – Projektteam getroffen, die stellvertretend für das Quartier zur Erprobung der Methode zur Quartiersoptimierung mit gebäudeübergreifendem Energieaustausch mit relevanten technischen Daten modellierbar erschienen. Im Folgenden werden diese Gebäude bzw. Siedlungen kurz skizziert:

- (1) Goethesiedlung: Ende 60er bis Anfang 70er gebaut/ Fenster neu, Dämmung nur wo möglich war (nicht bei Balkonen) / Auf den Dächern besteht Flächenpotential für ca. 1MWp Photovoltaik (PV) / Alle Häuser sind mit FW versorgt; der Großteil von Itzling ist generell mit FW versorgt;
- (2) Neues Laborgebäude der Universität: Im Bau befindlich/ Bautafel steht/ Erdarbeiten beginnen/ Nutzfläche 4.817 m² / Hoher Kühlbedarf aufgrund der Materialforschungsgeräte /Bauende 2016
- (3) Q Gebäude - Büro und Shopping Zentrum: Im Q Gebäude sind unterschiedlichste Büronutzungen (unter anderem ist dort ein Asylheim drin) und unten Geschäftsnutzungen (Supermarkt Filiale) untergebracht / Hoher Kühlbedarf ist zu erwarten.
- (4) Kolping Haus: Unterkunft für Schüler und Studenten und andererseits auch Lehrsäle und Räumlichkeiten sind, wo Schulungen stattfinden/ Eigentümer ist Kolping / Das Gebäude wurde in einem laufenden ‚Haus der Zukunft‘ Projekt untersucht. Der Energiebedarf wurde durch den Einsatz hoch effizienter Komponenten minimiert, vor Ort verfügbare Energiequellen (Abwasserabwärme und Sonnenlicht) wurden nutzbar gemacht und zur Abnahme der Plus-Wärmeenergie ein Vor-Ort-Energiesystem

geschaffen. Als ‚Haus der Zukunft‘ Projekt ist die Energieautarkie Kernthema <http://www.hausderzukunft.at/results.html/id7318>

- (5) Wohnanlage Salzachpark: Seit 2002 Gebäudebestand mit 2*55 Wohneinheiten auf 9 Baukörper aufgeteilt. Teilweise sind Pelletkessel als Wärmeliefersysteme eingebaut und Solarthermieanlagen bestehen. Die Dachflächen sind für Solarsysteme nutzbar. Die Fernwärmeübergabe wurde durch Absenkung der Rücklauftemperatur bereits optimiert.
- (6) Postverteilerzentrum: Postverteilerzentrum ist mit der Salzburg AG Mehrheits-eigentümer des Grundstücks. Es gibt Überlegungen im Bereich Mobilität Spezielles einzubringen (E-Mobility). Das Postverteilerzentrum ist ein guter energieintensiver Abnehmer mit Lastverschiebepotenzial.
- (7) Flusskraftwerk: 13 MW nominelle elektrische Leistung bei 6 Meter Fallhöhe. Das Flusskraftwerk in der Salzach heizt den Pufferspeicher im Fall von Überschussstrom. Ein Großspeicher mit 27.000 m³ Fassungsvermögen steht in Itzling und wird durch Salzburg Energie AG betrieben und ist integraler Bestandteil des bestehenden Fernwärmenetzes.

Wesentliche Erkenntnisse aus der ersten Bestandsaufnahme sind:

- Aufgrund Wohnbauförderung muss Solartechnik (Solarthermie oder Photovoltaik) installiert werden;
- Generell lässt die sehr gemischte Gebäudenutzung im Stadtteil den Schluss zu, dass es Potenzial zum gebäudeübergreifenden Energieaustausch insbesondere von solaren Wärme- bzw. Stromüberschüssen gibt.
- Grundsätzlich wird die Wärmeversorgung über Fernwärme realisiert.
- Eine solarthermische Einspeisung ins Fernwärmenetz erscheint aufgrund des vorhandenen Großspeichers attraktiv.
- Eine gute Verfügbarkeit von Dachflächen für Solartechnik ist prinzipiell gegeben.

2.2 Solarhybrides Heizen und Kühlen

Die Energieversorgung durch Solartechniken für Gebäude und für Quartiere ist Stand der Technik. Durch zahlreiche umgesetzte Bauvorhaben mit wissenschaftlicher Begleitung in der Planungs- und Betriebsphase ist die technische Machbarkeit der solaren Energieversorgung für Gebäude, Siedlungen und Quartiere gut dokumentiert (Haus der Zukunft, IEA SHC TASK 41³). Beispielhaft umgesetzte innovative Bauvorhaben im Siedlungsbereich dazu sind:

- **Solarsiedlung Freiburg / Deutschland** - Die ab 1996 geplante und in den Jahren 2000 bis 2006 realisierte Solarsiedlung am Schlierberg in Freiburg zählt zu den weltweit ersten verwirklichten Plusenergieprojekten im Siedlungsmaßstab. Durch die Passivhausbauweise, die großflächige Photovoltaikanlagen und die Anbindung an das

³ <http://task41.iea-shc.org/> Zugriff 29.01.2014

holzbeheiztes Nahwärmenetz des benachbarten ökologischen Vorzeige-Stadtquartiers Vauban gelingt es eine Plusenergiesiedlung zu erreichen' (VOSS).

- **Plusenergiesiedlung Weiz**⁴ - Die 22 Wohneinheiten umfassende Passivhaus-Siedlung erreicht ein energetisches Plus durch Solarstromanlagen, die mehr Strom liefern, als im Betrieb durch dezentrale Wärmepumpen und andere elektrische Verbraucher in den Häusern genutzt wird.
- ‚Das **Stadtwerk Lehen** (Lehen ist ein Salzburger Stadtteil) wurde auf der Fläche des ehemaligen Energieversorgers (ca. 20 ha) entwickelt: 287 geförderte Mietwohnungen, ein Studentenheim mit 97 Betten, ein 5-gruppiger Kindergarten, die neue Stadtgalerie, sowie Räume in der Sockelzone für Geschäfte, Gemeinschaftsräume und soziale Stellen (Hilfswerk). Dabei wurde ein Konzept gesucht, bei dem energiesparende Bauweise und ein hoher Input an Sonnenenergie in wirtschaftlicher und nachhaltiger Weise in einem fernwärmeversorgten Gebiet umgesetzt werden kann. Ergebnis ist ein europaweit beachtetes Beispiel für nachhaltige Stadtteilentwicklung mit neutraler CO₂-Bilanz.⁵

Im Nachfolgenden wird insbesondere der Stand der Technik zu **Systemlösungen zum solarhybriden Heizen und Kühlen für Gebäude** skizziert.

Unter solaren Hybridkonzepten wird im Gebäudebereich meistens die parallele Kopplung von Solarthermie mit Wärmepumpen verstanden, wobei der Strom über eine netzgekoppelte PV-Anlage über die Jahresbilanz komplett oder teilweise solar erzeugt wird. Stärker miteinander verschränkte Konzepte versuchen mit solarer Wärme die Quellenseite der Wärmepumpe (Vorwärmung von Luft bzw. des Erdreiches) zu unterstützen.

Die Kombination von Wärmepumpen und Solarthermie in Großanlagen wird in Dänemark unter den entsprechenden wirtschaftlichen Randbedingungen bereits sehr erfolgreich in Kombination mit Großspeichern bzw. Blockheizkraftwerken als Energieerzeuger für Fernwärmenetze umgesetzt. In Deutschland wurden Solarthermie-Saisonspeicher ergänzend mit Wärmepumpen ausgestattet, um die thermischen Verluste zu senken bzw. die Speicherkapazitäten zu erhöhen. Auch in Österreich gibt es bereits ähnliche Projekte, beispielsweise im Stadtteil Lehen in Salzburg bzw. die Ergänzung der Solarthermie-Fernwärmeeinspeisung im Wasserwerk Graz-Andritz mit einer Wärmepumpe.

Marktvfögar sind bereits Produkte zur hybriden Direktnutzung von Solarenergie durch Solarkollektoren, welche auch als Verdampfer für Luft-Wärmepumpen dienen bzw. durch PVT-Kollektoren (Photovoltaikmodule thermischen Kollektoren).

Hinsichtlich solarer Kälteerzeugung bzw. Klimatisierung gibt es prinzipiell zwei Ansätze, a) die solare Wärme eines Sonnenkollektors wird als Antriebsenergie für eine thermische Kältemaschine verwendet und b) eine Photovoltaik-Anlage liefert teilweise den Betriebsstrom für eine klassische Kompressionskältemaschine. Im Themenfeld der solarthermischen

⁴ http://www.aee.at/aee/index.php?option=com_content&view=article&id=184&Itemid=113

⁵ https://www.stadt-salzburg.at/internet/websites/smartcity/smartcity/energieplanung/stadtwerk_lehen_451923/stadtwerk_lehen_energiesparende_bauweise_451925.htm Zugriff 13.07.18

Kühlung bzw. Klimatisierung wurden in Österreich zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsprojekte gefördert und durchgeführt. Diese lassen sich für solarhybride Systemvarianten technisch kombinieren, beispielsweise übernimmt die solarthermisch angetriebene Kühlung die Grundlastversorgung und eine Kompressionskältemaschine deckt die Spitzenlasten des Kühlenergiebedarfs.

Diverse Technologien und Systemkonzepte in Verbindung mit Solarthermie und Photovoltaik werden zum Heizen und Kühlen von Gebäuden bereits umgesetzt, in der Regel allerdings in Einzelprojekten mit eingeschränkten Möglichkeiten der hybriden Nutzung bzw. deutlichen Beschränkungen von Betriebszeiten.

Im Rahmen von Quartierslösungen ergeben sich neue Verknüpfungsmöglichkeiten mit unterschiedlichsten solaren aber auch anderen erneuerbaren Energiequellen bzw. -senken. Zahlreiche technische Lösungen solarhybrider Heiz- und Kühlsysteme für Gebäude sind umsetzbar, allerdings fehlen eine systematische Untersuchung und eine Methode, um jene Systemkombination auf Quartiersebene zu identifizieren, die die besten Resultate hinsichtlich maximierter Solarenergienutzung unter Berücksichtigung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches liefern.

2.3 Methoden zur Optimierung urbaner Energiesysteme

Die zentrale Aufgabe war die Entwicklung und Erprobung eines vernetzenden Quartiers-Algorithmus, welcher den Gebäuden des Stadtviertels jeweils ein solares Heiz- und Kühlsystem zuweist und einen Optimierungs-Algorithmus ausführt. Um den Stand der Technik zu Optimierungsmethoden für solare Quartiere zu dokumentieren sowie neueste inspirierende Ansätze aus anderer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu analysieren, wurden Recherchearbeiten durchgeführt und Fachliteratur wurde diesbezüglich gescreent.

Im Folgenden werden identifizierte Projekte, Methoden und Softwarelösungen im Kontext der Optimierung von urbanen Systemlösungen aufgelistet (Anmerkung: Kein Anspruch auf Vollständigkeit).

- Die **Software CitySim** (ROBINSON) dient zur Simulation und Optimierung von urbanen Energieflüssen. Hierfür werden nicht nur thermische und elektrische Energieflüsse, sondern auch der Wasserverbrauch und der entstandene Abfall von Gebäuden oder Stadtquartieren betrachtet. Die Software besteht aus vier miteinander verbundenen Kernmodellen: i) vereinfachte RC-Gebäudemodelle, ii) ein Einstrahlungsmodell zum Beschreiben des solaren Einflusses, iii) stochastische Verhaltensmodelle, die den Einfluss der Bewohner beschreiben und iv) HVAC⁶-Modelle. CitySim fokussiert sich bei der Simulation auf die Ressourcenverbräuche und Energieflüsse der Gebäude und dient nicht zur Bewertung oder Auswahl mehrerer Szenarien.

⁶ HVAC Heating Ventilation and Air Conditioning

- Das laufende **Projekt OptEEmAL**, das durch das EU-Horizon 2020⁷ Programm gefördert ist, dient der Entwicklung einer Design Plattform zur Optimierung und Steigerung der Energieeffizienz von Stadtquartieren für Sanierungsprojekte. Als Ergebnis vergleicht die Plattform unterschiedlich optimierte Energiemanagement-Varianten mit dem Business-as-usual Fall. Als Ziel der Optimierung können hierfür, je nach Interessensgruppe, energetische, wirtschaftliche, umwelttechnische und soziale Faktoren betrachtet werden. Somit sollten Sanierungsprojekte auf Stadtquartiersebene in vergleichsweise kurzer Zeit und aus energetischer Sicht optimal ausgeführt werden. Unter der Führung des spanischen Forschungsinstituts Fundación CARTIF, arbeiten 13 teilnehmende Firmen und Forschungseinrichtungen aus acht verschiedenen Ländern seit September 2015 an der Umsetzung des Projekts (STEINBEIS).
- Der **City Energy Analyst (CEA)** ist eine Systemarchitektur, um Energiesysteme in Stadtquartieren analysieren und optimieren zu können. Der Fokus des Systems liegt dabei auf der Betrachtung unterschiedlicher Zukunftsszenarien für einen Stadtteil in der Schweiz. Die Gebäudearten sind somit pro Szenario festgelegt. Das Framework verbindet zeitbedingte Gebäudesimulation, Umwandlungs- und Speicher-Modelle. Die Optimierung erfolgt für jedes definierte Szenario nach einer Analyse mehrerer Kriterien. Für die Modellierung der Verbrauchsprofile wurde das Konzept der 2000 W-Gesellschaft betrachtet (BLINDENBACHER). Die Optimierung der Infrastruktur ergibt für 50-80% der Gebäude eine Einbindung in ein Nahwärmnetz. (vgl. Fonseca et al., 2016). Für CEA werden sieben Datenbanken und sechs Berechnungsmodelle benötigt. Die Datenbanken beinhalten Daten zu Verteilung, Wetter, Gebäudeparameter, ArcheTypen, technischen Metrik, Kriterien und Industrieparameter. Im Demand-Modell werden Heiz- und Kühlenergie, Warmwasserverbrauch und Haushaltsstromverbrauch in einstufigen Schritten berechnet. Die potenziell erzeugte Energie wird im Ressource-Modell simuliert. Hierfür werden verschiedene Energiequellen betrachtet: Seewasser, Serverabwärme, Industrieabwärme, Abwasserwärme und Solarstrahlung. Erzeugungsanlagen, Speicher und Verteilsysteme werden im System-Technology-Modell simuliert. Im CEA liegen einzelne Modelle für jede Komponente eines HVAC-Systems vor. Das Optimierungsmodell legt sowohl ein optimales Nahwärme-/Kältenetz als auch die Dimensionierung und Vernetzung der Erzeugungsanlagen aus. Das Modell kann das Energiesystem nach den drei Kriterien: jährliche Kosten, Emissionen (CO₂) und Primärenergiekosten optimieren. In einem Entscheidungsmodell werden die berechneten Szenarien nach sozialen, wirtschaftlichen und umwelttechnischen Kriterien analysiert. Ein besonderer Fokus des CEA liegt auf der vierdimensionalen Visualisierung. Hier wird der zeitbedingte Fluss von Energie zwischen Gebäuden grafisch dargestellt (Fonseca).

⁷ Horizon 2020: ec.europa.eu/programmes/horizon2020/

3 CiQuSo - Methode

Aufgrund der hohen Komplexität eines Stadtquartiers hinsichtlich der Vielfalt seiner Gebäudetypen, seiner Energiesysteme und seines Energiemanagements entscheidet der Modellierungsansatz über die notwendige Rechenzeit und über die erzielbare Genauigkeit. Nach Stand der Technik ist die Co-Simulation von geeigneten Expertentools ein möglicher Lösungsansatz, um die CiQuSo-Ziele zu erreichen. Dieser methodische Ansatz zieht einen hohen Modellierungsaufwand nach sich und lange Rechenzeiten zur Identifikation optimaler Technologiekombinationen sind zu erwarten. Im Gegensatz dazu fußt die *CiQuSo*-Methode auf der Erstellung und Nutzung von geeigneten Ersatzmodellen zur Abbildung des energetischen Verhaltens sowohl von Gebäuden als auch von neuartigen solarhybriden Heiz- und Kühlsystemen. Weiters wurde ein vernetzender Quartiers-Algorithmus entwickelt, welcher den Gebäuden des Stadtviertels jeweils ein solares Heiz- und Kühlsystem zuweist und einen Optimierungs-Algorithmus ausführt. Je nach Festlegung der Optimierungszielgröße – zum Beispiel geringste Primärenergieaufwendungen oder geringste CO₂-Emissionen – werden unterschiedliche Technologiekombinationen im Quartier identifiziert.

3.1 Beschreibung des entwickelten ‚Frameworks‘ zur Optimierung

Das Projektteam hat ein geeignetes CiQuSo-Framework zur Optimierung eines Quartiers hinsichtlich verschiedener Zielparameter entwickelt und aufgesetzt. Das konzipierte CiQuSo-Framework besteht aus drei Hauptblöcken:

- Vereinfachte RC-Gebäudemodelle: Diese sind vereinfachte Ersatzmodelle und bilden das thermische Gebäudeverhalten ausgewählter Gebäudetypen ab.
- BlackBox-Modelle: Diese sind Ersatzmodelle und bilden das energetische Anlagenverhalten der definierten solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme ab.
- *Vernetzer*-Algorithmus: Der den Gebäuden eines Stadtquartiers jeweils ein HVAC-System zuweist und einen Optimierungs-Algorithmus ausführt.

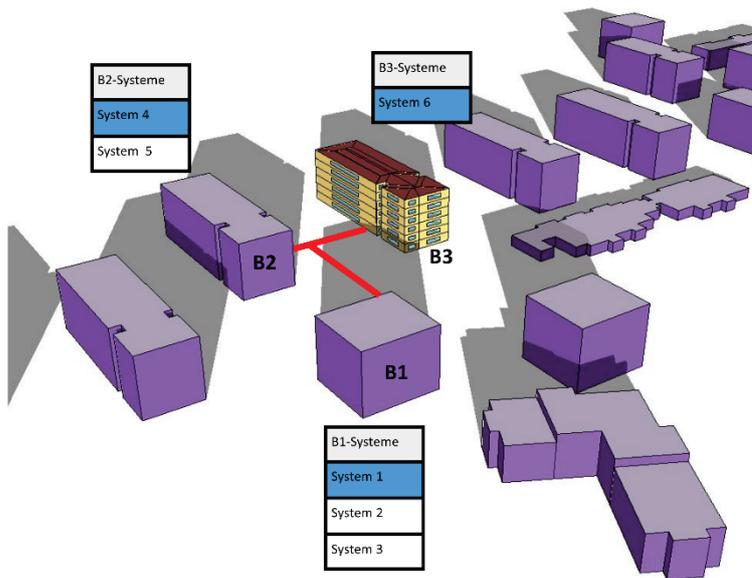
Die Modelle des Frameworks und alle damit verbundenen Funktionen wurden zentral im Softwaretool MATLAB⁸ miteinander verbunden und bildet letztlich das entwickelte Stadtquartiermodells. Das konzipierte Stadtquartiermodell identifiziert mittels eines eigens entwickelten Optimierungs-Algorithmus für eine festgelegte Auswahl von Technologiekombinationen und Gebäudenachbarschaften, die beste Quartierslösung hinsichtlich eines bestimmten Zielparameters. Dies geschieht insbesondere unter Berücksichtigung des möglichen Energieaustausches (Strom und Wärme) zwischen den Gebäuden auf Quartiersebene. Abbildung 3 zeigt vereinfacht den dazu notwendigen Workflow/Algorithmus. Dazu wird jedem Gebäude des zu betrachtenden Bezirks (hier beispielhaft an drei Gebäuden B1-B3 dargestellt) eine definierte Anzahl an solaren Heiz- und Kühlsystemen als mögliche Auswahl zugewiesen (Abbildung - Definition Quartier). Diese

⁸ <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>

Zuweisung basiert auf einer zuvor definierten LookUp-Table, die durch das vorhergegangene Importskript, bereits in MATLAB verfügbar ist. So wird für jedes Gebäude und jede SH&K-Systemkombination der thermische/elektrische Bedarf bzw. Überschuss in 15-Minuten Zeitschritten berechnet. Der Gesamtenergiebedarf bzw. -überschuss des Quartiers ergibt sich aus der Summe der Werte der Einzelgebäude. Thermische und elektrische Übertragungsverluste (z.B. durch Umformerstationen, Leitungsverluste, etc.) sind vereinfacht abgebildet und dadurch erhält man pro Zeitschritt die Information, ob das Quartier Energie importieren oder ob es Überschussenergie in das entsprechende Netz (Strom und Nahwärme) exportieren kann.

Um den optimierten Energieaustausch im Quartier zu analysieren, werden unterschiedliche Gebäude-Systemkombinationen bewertet. Mittels MATLAB wird dazu ein Suchraum erstellt, der durch alle möglichen Kombinationen aus Gebäude und solaren H&K-Systemen definiert ist, siehe auch Abbildung 3. Hierbei entspricht die Anzahl an Zeilen der Anzahl an Gebäude-Systemkombinationen Varianten im Quartier und die Spalten der möglichen Systeme je Gebäude. Für jede Variante im Quartier erfolgt in Abhängigkeit vom Optimierungsziel eine entsprechende Bewertung. Nachdem alle Varianten berechnet wurden, wird jeweils das Optimum ausgewählt, welches der besten Gebäude-Systemkombination für das festgelegte Quartier entspricht. Das jeweilige Optimierungsergebnis, d.h. die zeitliche Information Überschuss zu Bedarf, die dazugehörigen Gebäude-Systemkombination und der Wert der eigentlichen Kostenfunktion (entspricht dem globalen Optimum der Optimierungsaufgabe), wird in MATLAB für die weitere Verwendung zwischengespeichert.

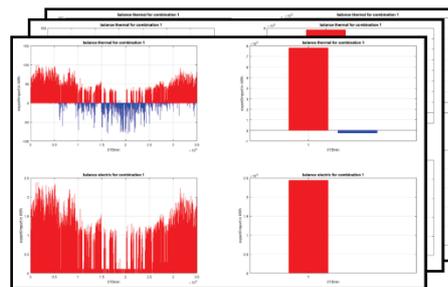
Definition Quartier



Definition Gebäude-Systemkombination

	Gebäude B1	Gebäude B2	Gebäude B3	
Systemvarianten n für Quartier	1	System 1	System 4	System 6
	2	System 1	System 5	System 6
	3	System 2	System 4	System 6
	4	System 2	System 5	System 6
	5	System 3	System 4	System 6
	6	System 3	System 5	System 6
	Σ Gebäude = Quartier			

Bewertung je Optimierungsziel



Finde **Minimum** aus allen Varianten

Abbildung 3: Workflow zur Berechnung des optimierten Energieaustausches auf Quartiersebene

Die entwickelte Methode des CiQuSo-Ansatzes ist in der Lage nachfolgende unterschiedliche Optimierungsziele zu bewerten. Hierbei werden gleichzeitig folgende **Optimierungsziele** unabhängig voneinander berechnet:

- **Thermische Eigenverbrauchsoptimierung**, d.h. möglichst wenig thermischen Bedarf aus dem Fernwärmenetz für das Quartier beziehen
- **Elektrische Eigenverbrauchsoptimierung**, d.h. möglichst wenig elektrischen Bedarf aus dem elektrischen Netz für das Quartier beziehen
- **Primärenergie-Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration ist die benötigte Primärenergie im Quartier am geringsten?
- **CO₂-Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration ist die CO₂ Emission im Quartier am geringsten?
- **Ökonomische Optimierung**, d.h. mit welcher Konfiguration können obige Ziele mit minimalsten Kosten (Annuitäten) erzielt werden?

Die finalen Ergebniszeitreihen werden in einer SVN⁹-Datenbank gespeichert und der entwickelte Optimierungsalgorithmus greift auf diese zu. Eine Webapplikation mit GIS-Visualisierung wurde zur leicht erfassbaren Ergebnisdarstellung der Untersuchungen von Gebäudenachbarschaften im Stadtteil Itzling entwickelt. Abbildung 4 illustriert das CiQuSo-Framework.

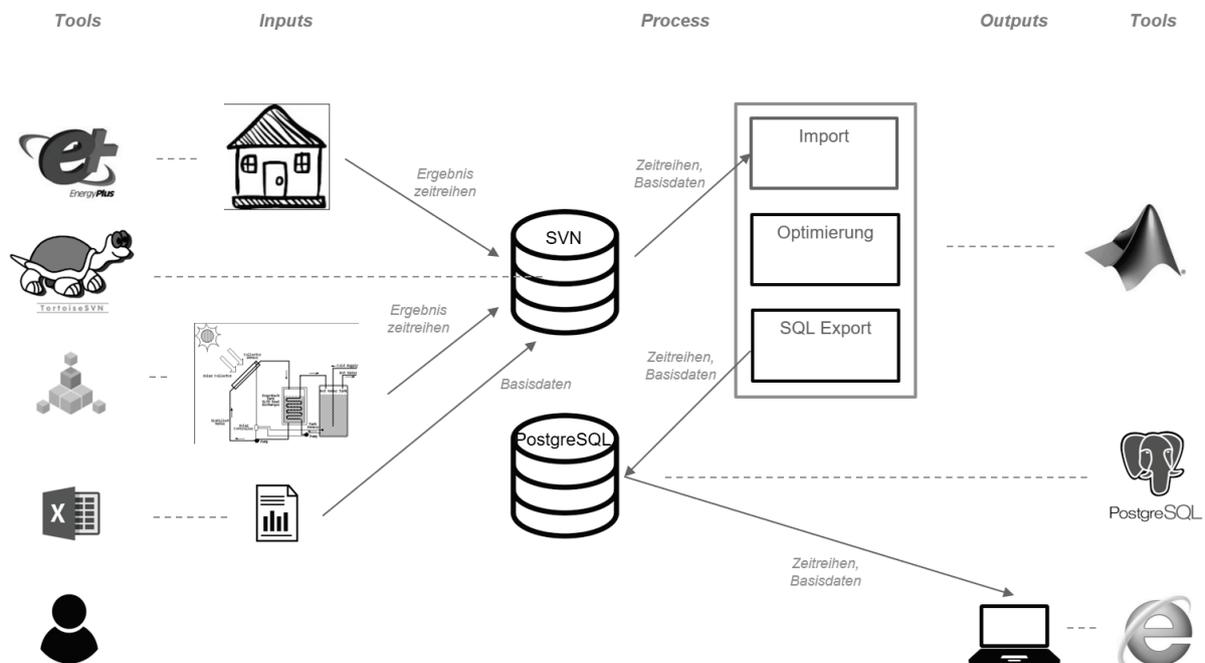


Abbildung 4: CiQuSo-Framework (Optimierung und Energieaustausch- grau, GIS-Visualisierung (Quelle: AIT))

3.2 Vorgehensweise zum entwickelten CiQuSo ‚Framework‘

Das Projektkonsortium hat zur Umsetzung des gesamten CiQuSo-Frameworks in nachfolgenden wesentlichen Schritten gearbeitet:

- **Erstellung und Evaluierung von Ersatzmodellen** – Ein wesentlicher Baustein im CiQuSo-Framework ist die Erstellung vereinfachter Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens und energetischen Anlagenverhaltens der definierten solaren Heiz- und Kühlsysteme. Die Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhalten erfolgte durch mathematische Widerstand-Kapazitätsmodelle (RC), dieser Modellierungsansatz ist der Elektrotechnik entlehnt. Um die Güte der Ergebniswerte der vereinfachten RC-Gebäudemodelle zu bewerten, dienen die Ergebniszeitreihen der EnergyPlus¹⁰ Simulationen. Die Vereinfachung der Modelle zur Berechnung des energetischen Anlagenverhaltens erfolgte über das Training von

⁹ Apache Subversion (SVN) ist eine freie Software zur zentralen Versionsverwaltung von Dateien und Verzeichnissen.

¹⁰ <https://energyplus.net/>

künstlichen neuronalen Netzwerken und Entscheidungsbäumen. Hier sind keine mathematisch physikalischen Gesetzmäßigkeiten im Modell enthalten vielmehr zielt das Training auf die Erstellung einer BlackBox ab. Die Trainingsdaten basieren auf Ergebnissen dynamischer Systemsimulationen von detaillierten Modellen in der Simulationsumgebung TRNSYS¹¹.

- **Festlegung und Modellierung von neuartigen solarhybriden Heiz- und Kühlsystemen** – Hier wurden Konzepte zu solarthermischen und -elektrische Heiz- und Kühlsysteme entworfen und diese werden um neuartige solarhybride Systemkonfigurationen ergänzt. Diese sind vorrangig so konfiguriert und dimensioniert, dass diese drei unterschiedlichen solaren Systemdesigns den Energiebedarf für unterschiedliche Gebäudetypen (Hotel- und Büronutzung, Wohnungsbauten) aus dem Stadtteil Itzling für Heizen, Kühlen, Warmwasserbereiten und elektrische Gerätenutzung decken. Weiters sind Überdimensionierungen der Solarsysteme modelliert, um den gebäudeübergreifenden Energieaustausch (Wärme und Strom) zu quantifizieren. Überschusswärme eines SH&K-Systems kann auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus ausgekoppelt werden.
- **Aufbau von Datenbanken** - Eine SVN-Datenbank wurde verwendet und beinhaltet den Informationsstand zu den Modellen (Gebäude und SH&K-Systeme). Sobald das CiQuSo-Framework aktiviert wird, erfolgt ein Zugriff auf die entsprechenden Rohdaten. Weiters wurde eine PostgreSQL-Datenbank aufgebaut und diese beinhaltet die finalen aufbereiteten Ergebnisse und Daten, die zur GIS-Visualisierung verwendet werden. Es wird dabei auf die jeweils aktuellen Werte und Informationen der Berechnungen zurückgegriffen.
- **Entwicklung des Quartiersoptimierers** – Der Quartiersoptimierer wählt aus einer zuvor bestimmten Auswahl an Gebäuden und SH&K-Systemen diejenige Quartierskonfiguration aus, die für einen Zielparameter ein Optimum darstellt. Der Algorithmus optimiert gleichzeitig folgende Größen unabhängig voneinander: a) thermische Eigenverbrauchsoptimierung, d.h. möglichst wenig thermischen Bedarf aus dem Netz für das Quartier beziehen, b) elektrische Eigenverbrauchsoptimierung, d.h. möglichst geringer Stromimport aus dem Netz ins Quartier, c) primärenergetische Optimierung, d.h. der benötigte Primärenergieeinsatz ist am geringsten und d) CO₂-Optimierung, d.h. die CO₂-Emission am geringsten.
- **GIS-Visualisierung** – Mit Zugriff auf die PostgreSQL Datenbank, die die Ergebnisse und Daten zu den Simulationen und Optimierungen speichert, wurde eine GIS-Visualisierung zum Stadtteil Itzling in einer Webapplikation entwickelt. Grundsätzlich kann der Nutzer der Webanwendung zwischen drei unterschiedlichen Möglichkeiten wählen, um sich die CiQuSo-Projektergebnisse darstellen zu lassen: a) als Vergleich von unterschiedlichen SH&K-Systemen für ein einzelnes ausgewähltes Gebäude im Quartier, b) als

¹¹ http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_uebersicht_de.htm

gebäudeübergreifender Quartiersvergleich unter Anwendung des CiQuSo-Ansatzes für eine Anzahl von frei wählbaren Gebäuden und c) als vorberechnetes Optimum für ein Quartiersszenario.

3.3 Definition und Modellierung der solaren Energiesysteme

Grundsätzlich fokussierte sich das Projekt CiQuSo auf gebäudetechnische Systemlösungen zur lokalen, solaren Energieversorgung zur Deckung des Energiebedarfs für Heizen, Kühlen, Warmwasserbereitstellen und Stromnutzung einerseits für einzelne Gebäude und andererseits für Gebäudenachbarschaften bzw. Quartiere. Die solaren Energiesysteme werden im Projekt CiQuSo in drei unterschiedliche Systemgruppen unterschieden. Weiters wurde im Speziellen für die Goethesiedlung in Itzling eine Machbarkeitsstudie zu einer großtechnischen Lösung mit solarer Wärmeversorgung durchgeführt. Im Nachfolgenden werden die solaren Energiesysteme kurz beschrieben:

- **Solarthermische Heiz- und Kühlsysteme (ST-H&K)**

Diese Gruppe beinhaltet sogenannte solare Kombi-Systemlösungen, die mithilfe der thermischen Sonnenkollektoren und Primärspeicher solare Wärme zur Deckung des Heiz- und Warmwasserwärmebedarfs einsetzen. Zwei unterschiedliche Systemdesigns wurden definiert, die sich im Wesentlichen durch die technische Lösung der Nachheizung unterscheiden. Ein Systemdesign sieht die Nachheizung durch die Fernwärme oder Heizkessel vor und ein anderes solarthermischen Heizsysteme ist mit einer integrierten Außenluft-Wärmepumpe konzipiert. Weiters wurden zusätzlich großtechnische Lösungen zur Wärmeversorgung einer Siedlung bzw. Gebäudenachbarschaft definiert. Solarthermisch angetriebene Kälteverfahren (Adsorptions- und Absorptionskältemaschinen) sind in dieser Systemgruppe nicht modelliert.

- **Solarelektrische Heiz- und Kühlsysteme (PV-H&K)**

Im Wesentlichen bestehen die Systemdesigns dieser Gruppe aus einer Photovoltaikanlage, deren lokal generierten Solarstrom teilweise zum Betrieb einer Wärmepumpe und/oder einer klassischen Kompressionskältemaschine genutzt wird. Nachfolgende Betriebsarten wurden modelliert: a) monovalente PV-H&K-Systeme mit Wärmepumpen-Trinkwarmwasserbereitung (60°C Vorlauftemperatur), b) bivalente Systeme mit Fußbodenheizung und separater Wärmequelle zur Trinkwarmwasserbereitung und c) bivalente Systeme mit Heizungsradiatoren und separater Wärmequelle zur Trinkwarmwasserbereitung. Um einerseits das Teillastverhalten der Wärmepumpen besser abzubilden, und andererseits um realitätsnahe Größenordnungen zur Auslegung der Wärmepumpen zu erhalten, sind zwei Wärmepumpen kaskadiert geschaltet. Je nach Systemanforderung wurden so drei Leistungsstufen implementiert: a) Grundlast: Wärmepumpe 1, b) hohe Last: Wärmepumpe 2 und c) Spitzenlast: Wärmepumpe 1+2. Die Kompressionskältemaschine wurden analog kaskadiert modelliert. Weiters wurden zwei unterschiedliche Regelungsstrategien in der Modellierung berücksichtigt: Mit der ersten

Strategie folgt der Wärmepumpen- bzw. Kompressionskältemaschinenbetrieb der direkten Leistungsanforderung für Heizen und Kühlen und in der zweiten Strategie werden die H&K-Systeme nur zu Zeiten großer Solarstromverfügbarkeit in Betrieb gesetzt.

- **Solarhybride Heiz- und Kühlsysteme (SH-H&K)**

Diese Systemgruppe umfasst gesamtübergreifende solarhybride H&K-Systemkonzepte (solarthermisch und solarelektrisch bzw. elektrisch und thermisch angetriebene Kältemaschinen). Die Systemkomponenten sind Photovoltaikanlage, solarthermischer Kollektor, Heißwasserspeicher, thermisches Nachheizelement, Absorptionskältemaschine mit Kaltwasserspeicher, Kompressionskältemaschine mit Kaltwasserspeicher, Nass- oder Trockenkühlturm, Standard-Heizverteilstrecke, Niedertemperatur-Heizverteilstrecke, Warmwasser-Zirkulationsverteilstrecke.

Hinsichtlich des Systemdesigns zur Abdeckung des Kühlenergiebedarfs wurden zwei Varianten definiert und modelliert. Erstes Systemdesign: Eine Absorptionskältemaschine wird soweit möglich solarthermisch angetrieben und eine Kompressionskältemaschine deckt den Restkältebedarf. Zweites Systemdesign: Die Absorptionskältemaschine deckt den gesamten Kältebedarf ab, der Heißwasserspeicher wird von der Fernwärme zur Aufrechterhaltung der Antriebstemperatur nachgeheizt. Beispielhaft zeigt Abbildung 5 das solarhybride Systemdesign.

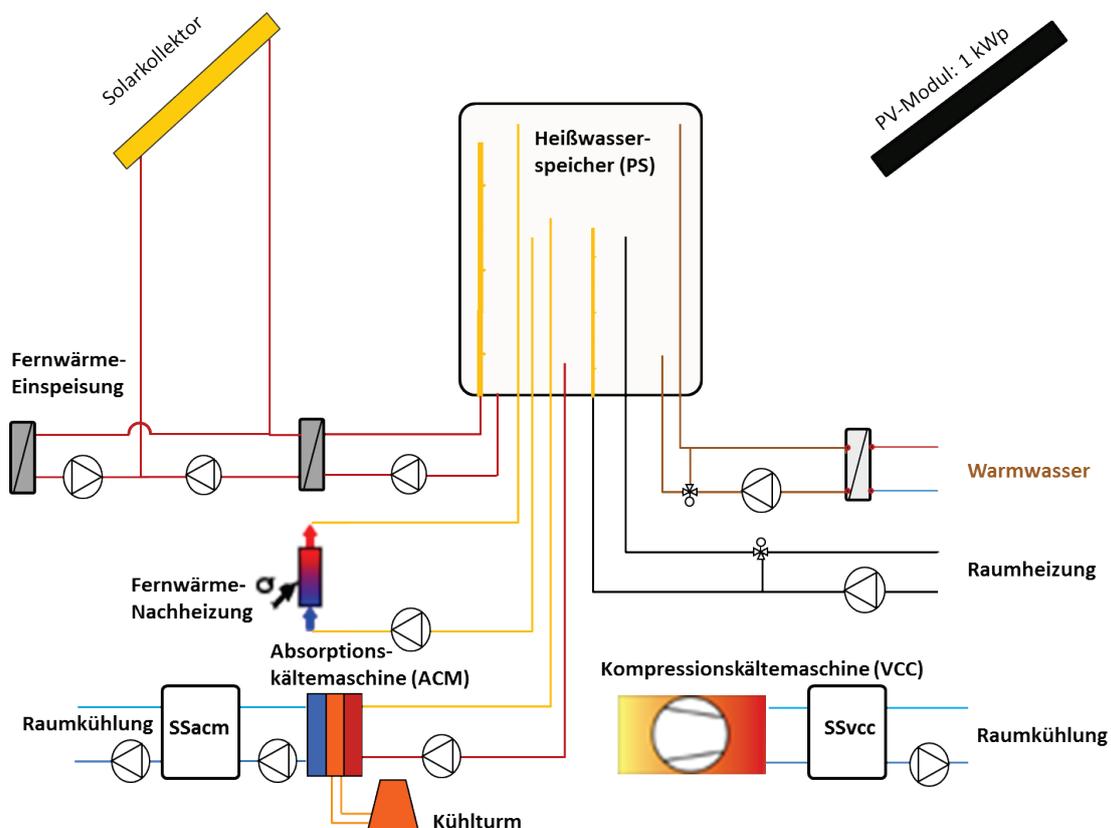


Abbildung 5: Schema des solarhybriden Systemdesigns (Quelle UIBK)

- **BIG Solar Energiesystem** – Als Folge der Diskussionen im Rahmen des CiQuSo Stakeholder Workshops vom März 2015 wurde beschlossen, Analysen und Konzepte zu solarthermischen Großanlagen durchzuführen bzw. zu überlegen. Daraufhin erfolgte durch den Unternehmenspartner SOLID in enger Abstimmung mit dem CiQuSo Projektpartner Salzburg Wohnbau und dem Wärmeversorger Salzburg AG die Erstellung eines technischen Systemkonzeptes, das die solare Nahwärmeversorgung der Goethesiedlung mit 20 Wohnblöcken aus den 70er Jahren gewährleistet. Die saisonale Langzeitspeicherung der solaren Wärme unter Integration potentiell vorhandener (günstiger) Abwärmequellen fand Eingang in die Konzepterstellung. Weiters wurde eine gasbetriebene Absorptionswärmepumpe ins Gesamtkonzept integriert.

3.4 Erstellung der Ersatzmodelle

Die favorisierte CiQuSo-Optimierungsmethode basiert auf der Erstellung von Ersatzmodellen zur Abbildung sowohl des thermischen Gebäudeverhalten als auch des energetischen Betriebsverhaltens der solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme. Im Nachfolgenden werden die umgesetzten Methoden zur Erstellung von Ersatzmodellen skizziert und die Ergebnisdiskussion erfolgt in Kapitel 4.1 und 4.2.

3.5 Methode zur Erstellung der Ersatzmodelle zur Beschreibung des energetischen Gebäudeverhaltens

Um das entwickelte CiQuSo-Framework zu testen, wurden zehn unterschiedliche Gebäude ausgewählt, diese Auswahl repräsentiert eine Mischung aus existierenden und generischen Gebäuden im Stadtteil Itzling. Tabelle 1 zeigt eine Aufstellung der wichtigsten Gebäudedaten (Baujahr, Bruttogeschossfläche, Anzahl der Stockwerke, Nutzung, Jahresenergiebedarf in kWh/m² für Strom, Heizen, Kühlen und Warmwasser).

Tabelle 1: Referenzgebäude für den Stadtteil Itzling

b_id	yoc	bgf	floors	roofarea	type	e_demand	h_demand	c_demand	dhw_demand
1	2000	1050	3	350	Office	19	70	23	
2	1999	737	2	369	Hotel	8	41	16	40
3	1919	1260	3	420	Multi-Family	18	177		22
4	1969	1260	3	420	Multi-Family	17	79		22
5	1999	1260	3	420	Multi-Family	16	33		22
6	1974	5128	6	855	Multi-Family	17	56		22
7	1919	737	3	246	Hotel	8	54		40
8	1999	2616	4	654	Multi-Family	17	68		35
9	2008	7845	4	1961	Office	19	58	28	
10	1974	5768	6	961	Multi-Family	17	60		36

Legende: yoc Baujahr; bgf Bruttogeschossfläche [m²]; roof area Dachfläche [m²]; type Gebäudeklasse [-]; e-demand Strombedarf [kWh/ m² BGF a]; h-demand Heizwärmebedarf [kWh/ m² BGF a]; c_demand [kWh/ m² BGF a]; dhw Warmwasserwärmebedarf [kWh/ m² BGF a].

Die Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens erfolgt im CiQuSo-Framework durch mathematische Widerstand-Kapazitätsmodelle (RC). Diese Modellierung basiert auf Ersatzmodellen, welche sich an Modellierungsansätze aus der Elektrotechnik anlehnen. Nach dem Modell von Beuken [BEUKEN], können Bauteile in beliebig viele Schichten aufgeteilt werden und mit Hilfe von Differentialgleichungen die Wärmeleitfähigkeit beschrieben werden. Somit beschreibt der Widerstand R den Wärmewiderstand eines Bauteils und die Kapazität C dessen Wärmekapazität. Durch geschicktes Verknüpfen solcher RC-Netzwerke können Gebäude - durch die Summe ihrer Bauteile - vereinfacht abgebildet werden. Letztlich wird die resultierende mittlere Raumtemperatur in Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen (Außentemperatur und Solarstrahlung) und anderen Energieflüssen (interne Lasten, Heiz- und/oder Kühlenergie) berechnet.

Diese haben den Vorteil, dass die Rechenzeit für die Berechnung der thermischen Lastzeitreihen für Heizen und Kühlen bei hinreichender Genauigkeit signifikant verkürzt wird. Ein einfacher und generischer Aufbau der RC-Modelle ist zielführend, wodurch die Parametrisierung der bauphysikalischen Eigenschaften ermöglicht wird.

3.6 Methode zur Erstellung der Ersatzmodelle zur Beschreibung des energetischen Betriebsverhaltens urbane solarer Energiesysteme

Nach Analyse von vielversprechenden Potentialstudien zur generellen Eignung von Methoden zur vereinfachten Abbildung dynamischer solarer Heiz- und Kühlsysteme erschien die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) zur BlackBox-Modellierung als geeignet. Dazu wurden geeignete Trainingsmethoden zur Erstellung der gewünschten Ersatzmodelle durchgeführt. Sehr viele Parameter beeinflussen die Güte der KNN, d.h. das virtuelle Trainieren der KNN ist ein iterativer Trial & Error-Prozess. Unterschiedlichste KNN-Architekturen und Trainingsszenarien wurden generiert und getestet. Die Trainingsdaten zur BlackBox-Erstellung sind in diesem Fall die Ergebniszeitreihen der Jahressimulationen der unterschiedlichen solaren Heiz- und Kühlsysteme.

Um BlackBox-Modelle zu trainieren und einen möglichst nahen Performance-Wert gleich den Jahressimulationsergebnissen zu erreichen, der unabhängig von den im Training verwendeten Daten ist, wird grundsätzlich bei jeder BlackBox-Generierung mit insgesamt drei Jahressimulationen gearbeitet. Eine wird exklusiv für das Training verwendet, eine weitere als Validierungsdatensatz – etwa, um den Endzeitpunkt des Trainings zu definieren – und die dritte als Testdatensatz zur Performance-Bewertung. Im Fall, dass ein BlackBox-Modell ohne Hyperparameteroptimierung auskommt, kann auf den Validierungsdatensatz verzichtet werden bzw. kann dieser als weiterer Trainingsdatensatz verwendet werden. Validierungs- und Testdatensatz sind hier anteilmäßig an der gesamten verwendeten Datenmenge bewusst so groß gewählt, da nur so ausgeschlossen werden kann, dass lediglich ein Jahresausschnitt zur Performancemessung herangezogen wird. Somit wird verhindert, dass eine BlackBox als beste gewählt wird, die etwa lediglich zu einer bestimmten Jahreszeit die beste Performance aufweist.

Im Unterschied zu den anfänglichen guten Resultaten im Trainingsmodus (closed loop) sind die Ergebnisse in der Anwendung (open loop) wesentlich schlechter. Daher wurde die Erstellung der BlackBoxen neben der Nutzung von KNN auch mit der Technik der Entscheidungsbäume (Decision Trees) erstellt und deren Vorhersagegüte untersucht. Die Anwendung der unterschiedlichsten Methoden zur BlackBox-Modellerstellung und die Durchführung der Trainings wurden von Experten der TU Wien-Computational Complex Systems Gruppe durchgeführt.

3.7 Gebäudeübergreifender Energieaustausch

Die Grundidee der CiQuSo-Optimierung auf Quartiersebene berücksichtigt den gebäudeübergreifenden Energieaustausch (Strom und Wärme) der definierten Gebäudenachbarschaft und einer festgelegten Auswahl von solaren H&K-Systemen. Einerseits wird die solare Energie lokal auf Gebäudeebene zur Eigenbedarfsdeckung verwendet und andererseits werden Überschüsse der Photovoltaik- und Solarthermieanlagen global auf Quartiersebene verteilt. Hier wurde festgelegt, dass die zu untersuchenden Gebäude im Quartier lokal über geeignete Infrastruktur miteinander gebäudeübergreifend Energie austauschen, d.h. über ein idealisiert modelliertes Nahwärmenetz und ein elektrisches Netz lassen sich die lokalen Überschüsse im Quartier verteilen.

Das CiQuSo-Projektteam hat nachfolgenden Ansatz zur Bestimmung des energetischen Lastverschiebepotenzials bzw. des gebäudeübergreifenden Energieaustausches festgelegt:

- Im Quartier sind sämtliche Gebäude auf Sollraumlufttemperatur gehalten, die thermischen Speicher der solaren H&K-Systeme sind auf Bereitschaftsniveau geladen und es gibt ein solarenergetisches Überangebot (Wärme oder Strom).
- **Lastverschiebung durch Speicher der solaren H&K-Systeme:** Die thermischen und elektrischen Speicher, die als Teilkomponente in den SH&K-Systemen definiert sind, werden bei solaren Überschüssen mit Energie beladen.
- **Thermische Lastverschiebung ins Netz:** Eine thermische Lastverschiebung erfolgt für den Fall, dass sowohl alle Gebäude als auch alle solaren H&K-Systeme bereits ihr Lastverschiebepotential ausgeschöpft haben. Dann können die thermischen Überschüsse in ein vereinfacht modelliertes Fern- bzw. Nahwärmenetz eingespeist werden.

4 Ergebnisse

4.1 Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens mit dem RC-Modellierungsansatz

Wie in Kapitel 3.5 beschrieben, wurden Widerstands-Kapazitätsmodelle (RC-Modelle) zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens (Heizen und Kühlen) in Iterationsschritten sukzessive aufgebaut und die Berechnungsgüte bewertet.

Im Rahmen einer das CiQuSo-Projekt begleitenden Bachelorarbeit (Kreulitsch) wurden erste Abbildungen und Untersuchungen vereinfachter Gebäudemodelle für Optimierungszwecke auf Quartiersebene erstellt. Ein Gebäudemodell siebenter Ordnung wurde mithilfe der Zustandsraumdarstellung erstellt und für ein Beispielgebäude parametrisiert. Durch die Berechnung der Gebäudemassen, d.h. allen relevanten Baukonstruktionen (Wände, Böden und Dächer) wurden entsprechende bauphysikalische Materialeigenschaften zugewiesen, konnten die notwendigen Wärmewiderstände und -kapazitäten berechnet werden. Um die Güte des erstellten Ersatzmodells zu bewerten, wurden die resultierenden mittleren Raumlufttemperaturen mit einem äquivalenten EnergyPlus-Gebäudemodell verglichen. Mit diesem Soll-Ist-Vergleich wurde deutlich, dass ein nachträgliches Anpassen und Optimieren der RC-Parameter unbedingt notwendig ist. Die zeitlichen Verläufe der Raumlufttemperaturen beider Modellierungsansätze unterschieden sich zu stark. Aufbauend auf diesen ersten Erkenntnissen (Kreulitsch) wurden folgende Adaptionen am RC-Modell durchgeführt:

- Eine Optimierungsmethode wurde entwickelt, die via „*nonlinear least-squares*“ Optimierungsalgorithmen versucht, durch Variation der RC-Parameter, die Raumlufttemperaturkurven beider Modellierungsansätze anzugleichen. Hierbei wurden für beide Gebäudemodelle die gleichen Inputparameter, d.h. Umgebungsbedingungen, interne Lasten, etc., angelegt und versucht die Abweichung zwischen beiden Kurven zu minimieren. Als Vergleichsdaten dienen die Zeitreihen (15 Minuten Auflösung) der EnergyPlus-Gebäudemodelle, die das thermische Verhalten der Gebäude gut wiedergeben. Abbildung 6 zeigt beispielhaft die Ergebnisse zweier Kalibrierungen einer guten (linke Grafik, entspricht Gebäude ID8 - Salzachpark Mehrfamiliengebäude) bzw. geringen (rechte Grafik, entspricht Gebäude ID2 - Hotel) Übereinstimmung beider Berechnungszeitreihen.
- Die erste Ergebnisanalyse zeigt, dass das RC-Modell zeitweise zu rasche Raumlufttemperaturveränderungen berechnet und die Trägheit wenig geeignet modelliert ist. Das RC-Modell wurde um einen weiteren Zustand (interne Speichermasse) erweitert. Diese Adaption hat in manchen Modellierungsfällen zu Verbesserungen geführt.

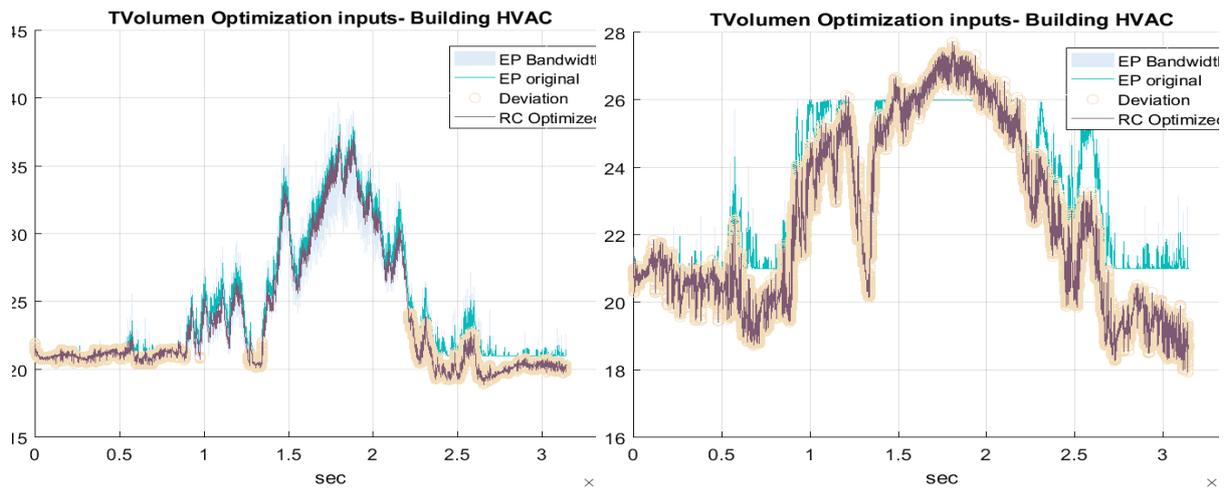


Abbildung 6: Vergleich RC-Modell vs. EnergyPlus Modell für ein gutes (links) bzw. schlechtes (rechts) Kalibrierungsergebnis; Legende: Die violette Kurve entspricht der Raumtemperatur des RC-Modells, die türkise Kurve entspricht der durchschnittlichen Raumlufthtemperatur von EnergyPlus, die graue Kurve entspricht der Bandbreite der Raumlufthtemperatur in EnergyPlus und die gelbe Kurve repräsentiert jene Zeitpunkte, wo das RC-Modell außerhalb der Bandbreite liegt dar.

Die entwickelte Kalibrierungsmethode zur Erstellung der verbesserten RC-Gebäudemodelle wurde an neun verschiedenen Gebäudetypen getestet und die Ergebniszeitreihen der Ersatzmodelle und der ursprünglichen EnergyPlus Simulationen wurden verglichen. Dazu wurde einerseits das zeitliche Verhalten der Raumlufthtemperaturen zueinander und andererseits der berechnete Heizwärme- und Kühlenergiebedarf miteinander verglichen. Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die Abweichung zwischen den Ergebnissen aus der EnergyPlus-Simulation und dem RC-Modell in Prozent für Heizen und Kühlen.

Obwohl tieferegehende Adaptierungen für die Erstellung der RC-Modellierung durchgeführt wurden, weisen die Ergebniszeitreihen beider Modellierungs- und Berechnungsansätze zu große Divergenzen auf und eine ausreichend hohe Deckungsgleichheit beider Kurven wurde nicht erreicht. Die erzeugten RC-Ersatzmodelle wurden für den CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene als ungeeignet eingestuft.

Tabelle 2: Zusammenfassung Ergebnisse RC-Modell vs. EnergyPlus

Id	Eplus Heating kWh/m ²	Eplus Cooling kWh/m ²	RC Heating kWh/m ²	RC Cooling kWh/m ²	diff Heating %	diff Cooling %
1	3,53	1,27	3,85	1,09	9,07	-14,17
2	2,80	0,38	2,79	0,11	-0,36	-71,05
3	14,02		14,19	4,00	1,21	
4	7,65		7,63	1,53	-0,26	
5	2,91		2,97	1,38	2,06	
6	4,74		5,10	1,78	7,59	
7	14,04		15,20	3,94	8,26	
8	6,28		6,32	1,35	0,64	
9	2,10	1,14	2,47	1,00	17,62	-12,28

4.2 Ersatzmodelle zur Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens der solaren urbanen Energiesysteme

Die angestrebte *CiQuSo*-Optimierungsmethode basiert auf der Erstellung von Ersatzmodellen zur Abbildung sowohl des thermischen Gebäudeverhaltens als auch des energetischen Betriebsverhaltens der solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme – siehe oben. Intensive Tätigkeiten zur Identifikation einer geeigneten Trainingsmethode zur Erstellung der Ersatzmodelle zur Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens der definierten solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme wurden durchgeführt. Generell erschien methodisch die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) zur BlackBox-Modellierung als geeignet. Sehr viele Parameter beeinflussen die Güte der KNN, d.h. das virtuelle Trainieren der KNN ist ein iterativer Trial & Error-Prozess. Unterschiedlichste KNN-Architekturen und Trainingsszenarien wurden generiert und getestet. Im Unterschied zu den anfänglich guten Resultaten im Trainingsmodus (closed loop) sind die Ergebnisse in der Anwendung (open loop) wesentlich schlechter. Da im Projektkonsortium kein ausgeprägtes Fachwissen in diesem Gebiet vorhanden war, wurde das *CiQuSo*-Projektteam parallel zur eigenen Entwicklungstätigkeit durch die fachliche Expertise der TU Wien-Computational Complex Systems Gruppe erweitert. Der notwendige Workflow wurde bereits entwickelt und steht zur Verfügung. Erste Ergebnisse zeigten, dass KNN für bestimmte Anwendungsfälle gute Übereinstimmung zwischen den Trainingsdaten und den generierten BlackBox-Modellen erreicht wurden. Jedoch wurde methodisch zur Erstellung der BlackBox-Modelle auch der Ansatz der Extremely Randomized Trees verwendet und analysiert. Beispielhaft zeigen Abbildung 7 und Abbildung 8 die Vorhersageergebnisse für unterschiedliche Zielparameter für das Training. Zwei interessante Outputgrößen für die Jahressimulation sind a) das hochvariable Qauxel [kW] und b) das sehr sparse Qauxtherm [kW]. Wie in den nachfolgenden Abbildungen gut erkennbar, funktioniert bei beiden optisch gesehen jener Ansatz besser, der auf den Extremely Randomized Trees basiert. Für Qauxel [kW] bleibt aber zu erwähnen, dass die BlackBox mit dem neuronalen Netz mit 1,58 den niedrigeren MSE aufweist als die mit den Trees mit 1,66. Die trotz aller Varianz klar ersichtliche Tagesdynamik erfasst die Tree-BlackBox allerdings wesentlich besser. Auch aufgrund der besseren Abdeckung der

Auslenkungen ist diese hier gegenüber der Netz-BlackBox zu bevorzugen, die doch zu stark mittelt.

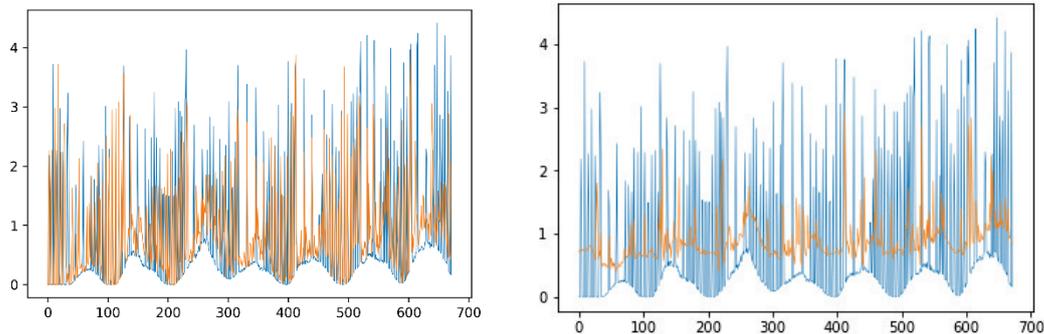


Abbildung 7: Ein Vergleich für Qauxel [kW] in einer typischen Sommerwoche
links: Extremely Randomized Trees, rechts: ein neuronales Netz.

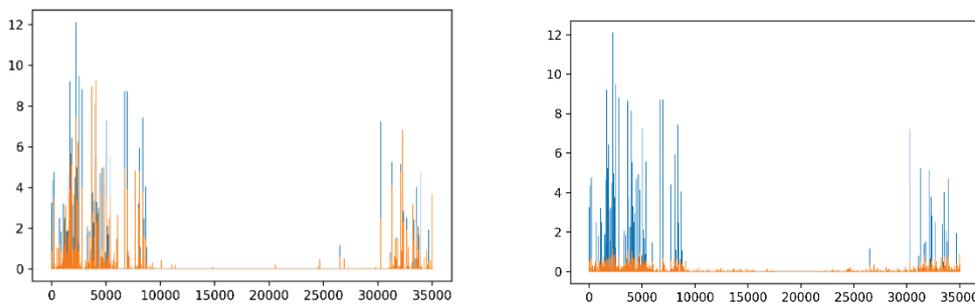


Abbildung 8: Die Vorhersage für Qauxtherm [kW] funktioniert mit den Extremely Randomized Trees (links) relativ gut. Sehr kleine Werte könnten noch bewusst durch 0 ersetzt werden. Das neuronale Netz (rechts) funktioniert hier nicht zufriedenstellend.

4.3 Urbane Solare Energiesysteme

In Summe wurden 107 solarelektrische, solarthermische und solarhybride H&K-Systeme modelliert und entsprechenden Referenzsystemen gegenübergestellt. Im Anhang listen die Tabelle 7 bis Tabelle 10 die wesentlichen Parameter zur Beschreibung der jeweiligen Anlagenkonfiguration und -dimensionierung der Referenz- bzw. der solaren H&K-Systeme auf. Stellvertretend für die anderen Technologielösungen listet Tabelle 4 die entsprechenden Systeminformationen zu den solarelektrischen H&K-Systeme auf. Die jeweils erste Dreiergruppe der System-Nummern ist eine laufende Nummer und als Gebäudekennungen sind in der zweiten Dreiergruppe folgende Codes verwendet: Hotel (002), Q-Geb. (011), Salzachpark (008), Goethestr. 15 (010), MFH 1999 (005), Büro (001).

Die Dimensionierung der jeweiligen Systemdesigns basiert auf den Energie- und Leistungskennzahlen der definierten, modellierten und simulierten Gebäude. Tabelle 3 listet die Gebäudekennzahlen auf. Neben den generierten Gebäudelastzeitreihen zur Auslegung der einzelnen solaren Heiz- und Kühlsysteme waren außerdem die baulichen Gegebenheiten relevant. Naturgemäß bildet die verfügbare Dachfläche eines Gebäudes einen limitierenden Faktor und begrenzt die Systemgröße sowohl der Photovoltaik- als auch der

Solarthermieanlage am Dach (es besteht aber auch die Möglichkeit PV- oder solarthermische Kollektoren auf Garagendächern bzw. als Parkplatzüberdachungen zu installieren).

Tabelle 3: Daten und Energiekennzahlen der ausgewählten Gebäude:

Gebäude	BGF	DF	G	W	HWB	HL	KEB	KL	WWWB	WWL
	[m ²]	[m ²]	[-]	[-]	kWh/(m ² a)	[kW]	kWh/(m ² a)	[kW]	kWh/(m ² a)	[kW]
Büro	1.050	350	3	0	69	80	22	78	0	0
Hotel	737	370	2	0	41	20	16	20	29	84
MFH 1999	1.260	420	3	10	33	25	0	0	33	75
MFH SalzachPark	2.616	654	4	32	68	99	0	0	25	137
MFH Goethestraße 15	5.768	917	6	68	60	159	0	0	26	207
Q-Gebäude mit Mischnutzung	7.845	1.960	5	68	59	496	28	659	0	0

Tabelle 4 Solarelektrische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten

System-Nummer	Gebäude	ST-Kollektor [m ²]	PV [kWp]	FW [kW]	WP [kW]	AKM [kW]	KKM [kW]	Pu-Sp [m ³]	KW-Sp [m ³]
083_010_009_017	G15	0	40	200	100	0	0	10	0
085_010_009_017	G15	0	40	200	300	0	0	10	0
086_010_009_017	G15	0	40	200	190	0	0	10	0
089_010_009_017	G15	0	40	200	190	0	0	5	0
090_010_009_017	G15	0	40	200	300	0	0	5	0
091_010_009_017	G15	0	40	200	100	0	0	5	0
092_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	10	4
093_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	5	4
094_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	10	4
095_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	240	0	240	10	3
096_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	120	0	0	10	0
097_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	5	0
098_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	10	0
099_002_002_015	HOT	0	20	50	90	0	20	5	1
100_002_002_015	HOT	0	20	50	55	0	20	5	1
101_005_008_015	MFH H	0	20	50	65	0	0	5	0
102_005_008_015	MFH H	0	20	50	90	0	0	2	0
103_001_000_014	Büro	0	15	80	100	0	60	5	1
104_001_000_014	Büro	0	15	80	60	0	60	5	1
105_001_000_014	Büro	0	15	80	100	0	60	1	1
106_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	5	0
107_002_002_015	HOT	0	20	50	90	0	20	5	1
108_005_008_015	MFH H	0	20	50	90	0	0	2	0
094_011_009_003_noPV	Q-Geb	0	0	450	450	0	450	10	4
103_001_000_014_noPV	Büro	0	0	80	100	0	60	5	1
106_008_010_016_noPV	MFH Salz	0	0	100	90	0	0	5	0
107_002_002_015_noPV	HOT	0	0	50	90	0	20	5	1
108_005_008_015_noPV	MFH H	0	0	50	90	0	0	2	0

Abbildung 9 zeigt ein schematisches Energieflussbild mit allen verfügbaren Komponenten dargestellt, aus welchen die solaren H&K-Systeme für alle sechs Gebäude zusammengesetzt werden.

Abbildung 10 zeigt ein schematisches Energieflussbild des Modell-Quartiers für alle sechs Gebäude dargestellt, wie es miteinander mit dem Fernwärmenetz bzw. dem Stromnetz gekoppelt sein kann.

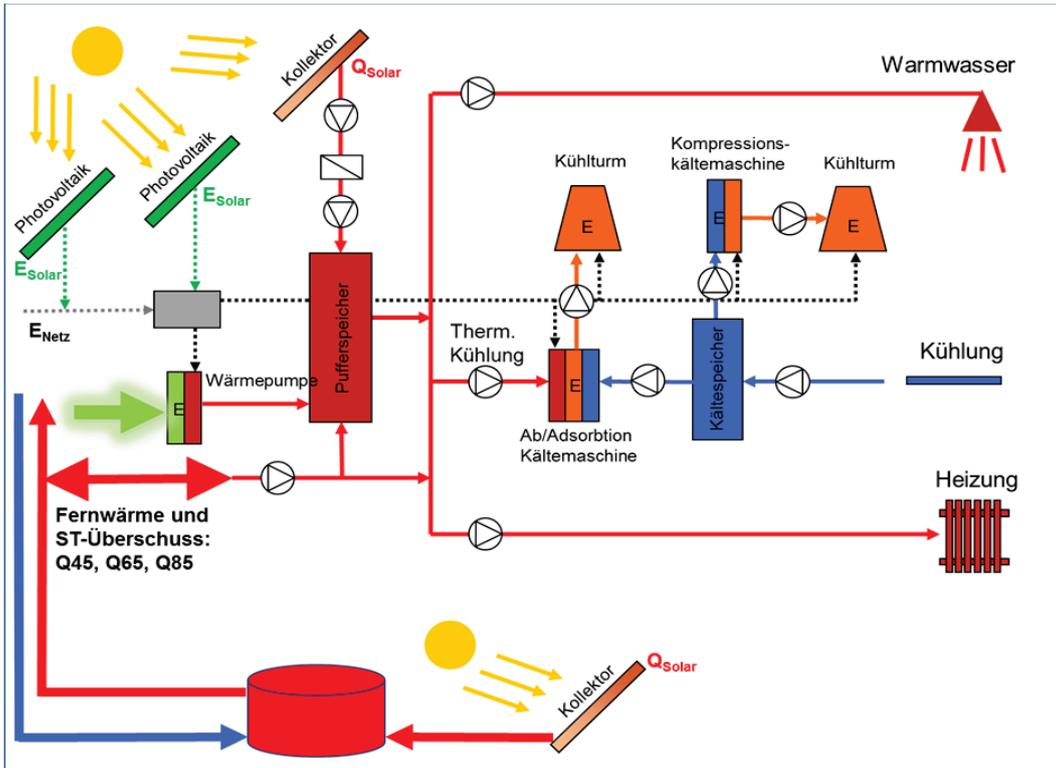


Abbildung 9: Schematisches Energieflussbild mit allen verfügbaren Komponenten aus welchen die H&K-Systeme für alle sechs Gebäude zusammengesetzt werden können.

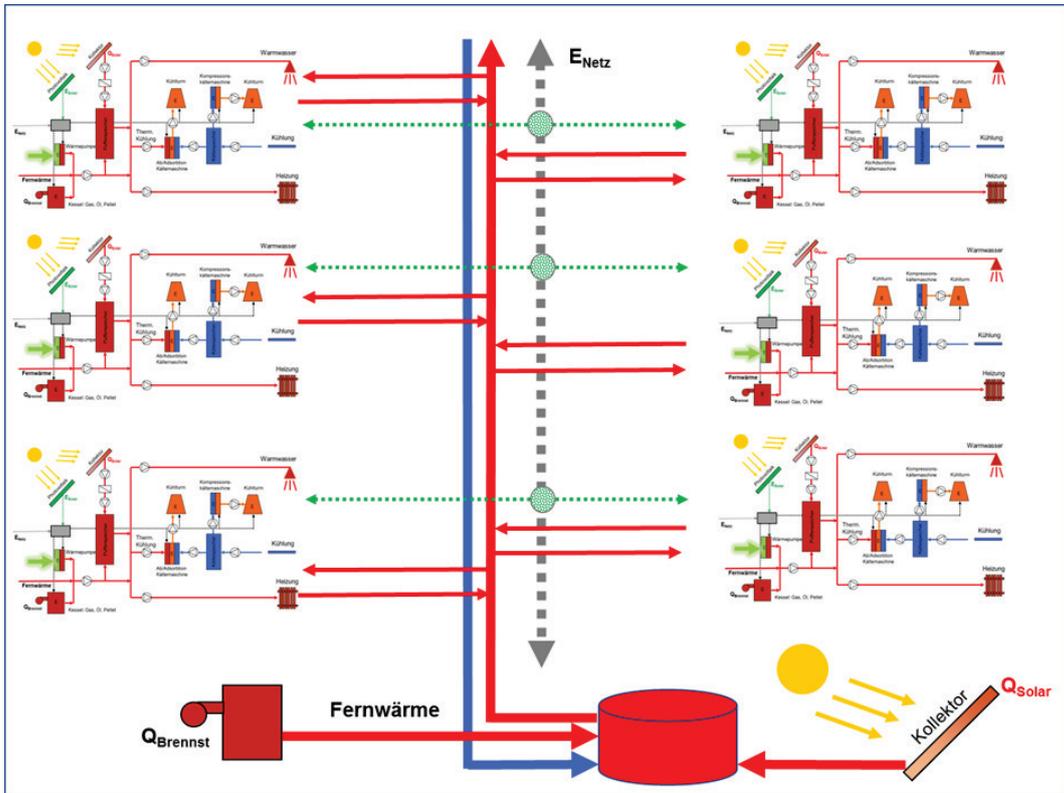


Abbildung 10: Schematisches Energieflussbild des Modell-Quartiers für alle sechs Gebäude miteinander gekoppelt mit dem Fernwärmenetz bzw. dem Stromnetz.

Energetische Bewertung

Nach Abschluss der positiven Systemtests erfolgte die Durchführung der Systemsimulationen der solarelektrischen, solarthermischen und solarhybriden Heiz- & Kühlsysteme für die ausgewählten Gebäude. Für die einzelnen Gebäude-Systemkonzepte wurden sowohl verschiedene Auslegungsvarianten als auch verschiedene Regelungsstrategien simuliert, um ein möglichst breites Spektrum an zusätzlichen Systemvariationen für die Optimierung und die Quantifizierung des Lastverschiebepotenzials bereitstellen zu können.

Zur einheitlichen Auswertung und Darstellung des energetischen Betriebsverhaltens der solaren H&K-Systeme wurden die Ergebniszeitreihen der zahlreichen Systemsimulationen anhand definierter Bewertungsvariablen verarbeitet und analysiert.

Diese energetischen Bewertungsindikatoren sind:

- **Energiebedarfszahlen der Gebäude:** a) Nutzenergiebedarf für Warmwasser und Zirkulationsverluste ($Q_{DHW+Zirc}$), b) Heizwärmebedarf ($Q_{Space\ Heating}$) und c) Kühlenergiebedarf ($Q_{Cooling}$)
- **Einspeiseenergie ins Strom- bzw. Nahwärmenetz:** a) Mögliche Fernwärmeeinspeisung durch Überschüsse der Solarthermieanlage auf dem Temperaturniveau Q45 (Vorlauf-/Rücklauftemperatur = 55/35°C) dargestellt (Solar Thermal => Feed in District Heating), b) ins Stromnetz eingespeister Photovoltaikstrom (PV => FeedIn Grid).
- **Strom- und Wärmeimporte ins Quartier:** a) Fernwärmehachheizung (Q_{Aux_therm}) im Falle der Unterdeckung des Wärmebedarfs, b) Bezug elektrischer Energie aus dem Stromnetz ($Q_{Aux_el\ Grid} => System$) im Falle der Unterdeckung des Strombedarfs
- **Weitere energetische Bewertungsindikatoren:** a) Von der Wärmepumpe genutzte Umweltenergie ($Q_{HP_environment}$), b) direkter Eigenverbrauch des Photovoltaikstromes (PV_Self Consumption) und c) in das Stromnetz eingespeister Photovoltaikstrom (PV => FeedIn Grid).

Anmerkung: Im Falle einer Wärmepumpe bzw. Kompressionskältemaschine ist die benötigte elektrische Energie für den Kompressor im Netzstrombezug ($Q_{Aux_el\ Grid} => System$) bzw. PV-Stromeigenverbrauch (PV_Self Consumption) enthalten.

Abbildung 11 zeigt für die Referenz-Systeme und Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen für alle modellierten und gerechneten solarelektrischen, solarthermischen und solarhybriden H&K-Systeme die Jahresenergiemengen für Verbrauch (Warmwasser und Zirkulationsverluste, Heizung und Kühlung) sowie die Art und Menge der Erzeugung. Die Auswertungen aller Systemsimulationsergebnisse wurde mit Hilfe eines Auswertungstools T53E⁴-Tool (Energy-Economy-Ecology-Evaluation Tool) bewerkstelligt, welches im Rahmen der Tätigkeiten der IEA SHC Task 53¹² der Internationalen Energieagentur des Implementing

¹² <http://task53.iea-shc.org/>

Agreement ‚Solar Heating and Cooling‘ (IEA SHC Task 53; FFG Nr. 843136) von der Universität Innsbruck entwickelt wurde. Weitere verschiedene Zielgrößen konnten mit diesem Werkzeug automatisiert bestimmt werden, beispielsweise CO₂-Emissionen, Primärenergiebedarf (nicht erneuerbaren Anteil) und auch relevante Größen der Wirtschaftlichkeitsberechnungen wie Investitions-, Betriebs-, Wartungs-, Instandhaltungs- und Betriebskosten bzw. die sich daraus ergebenden Annuitäten als Jahreskosten.

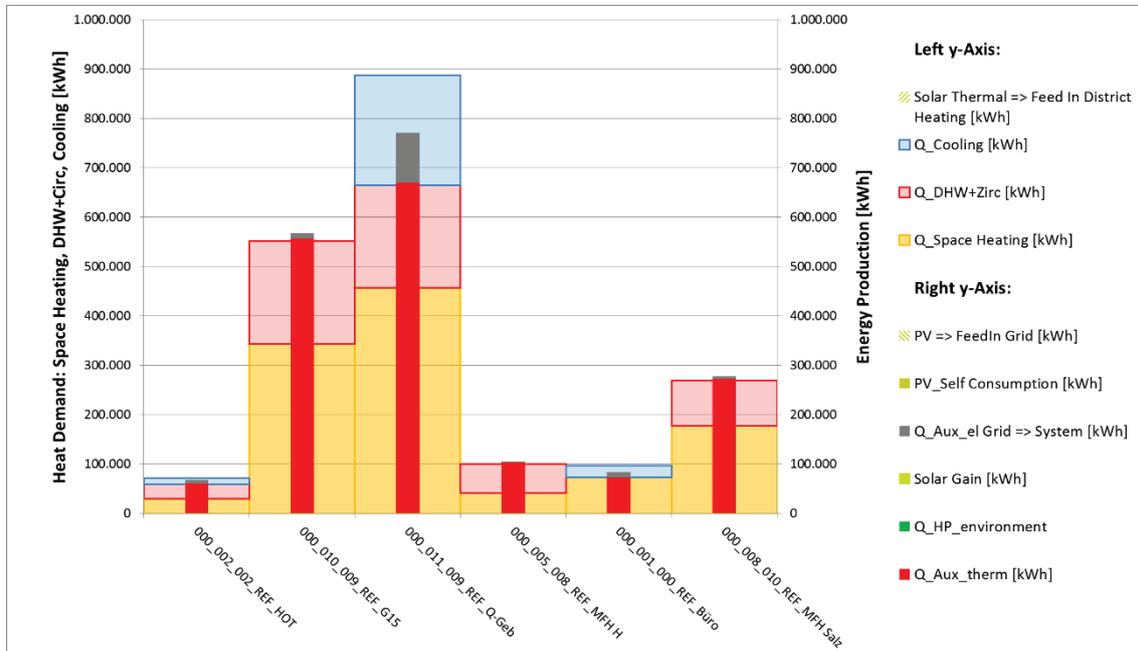


Abbildung 11: Energiebilanz für die **Referenz H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude.

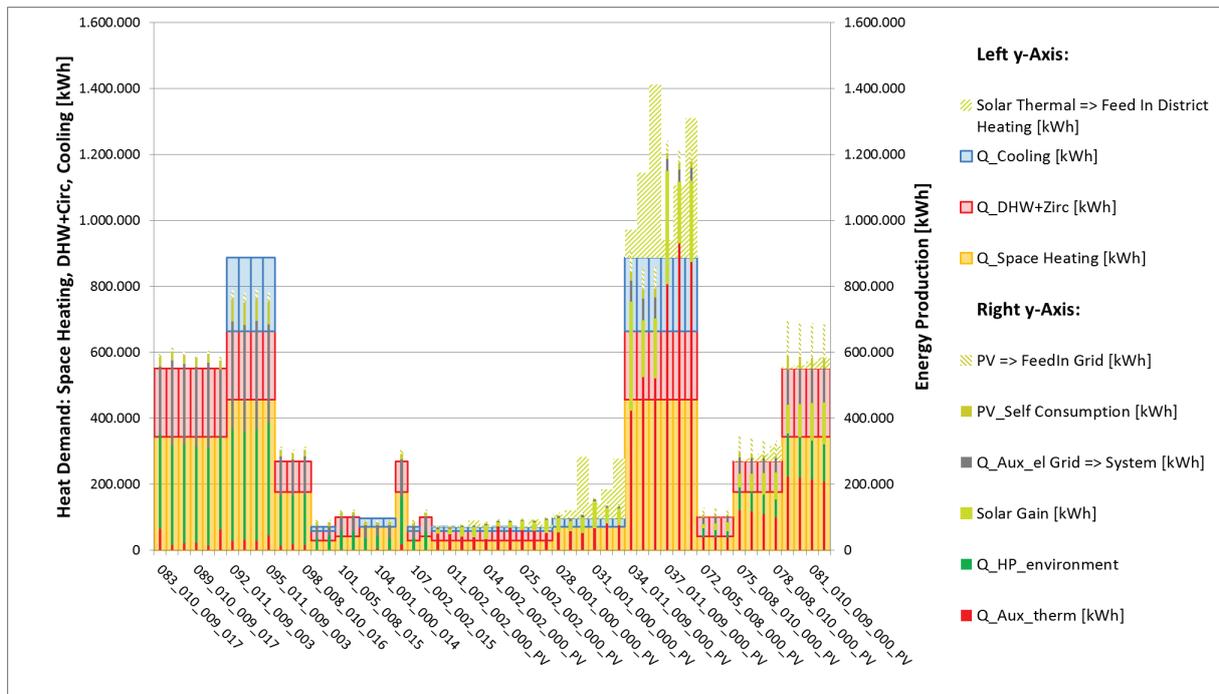


Abbildung 12: Energiebilanz für die **solarelektrischen H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).

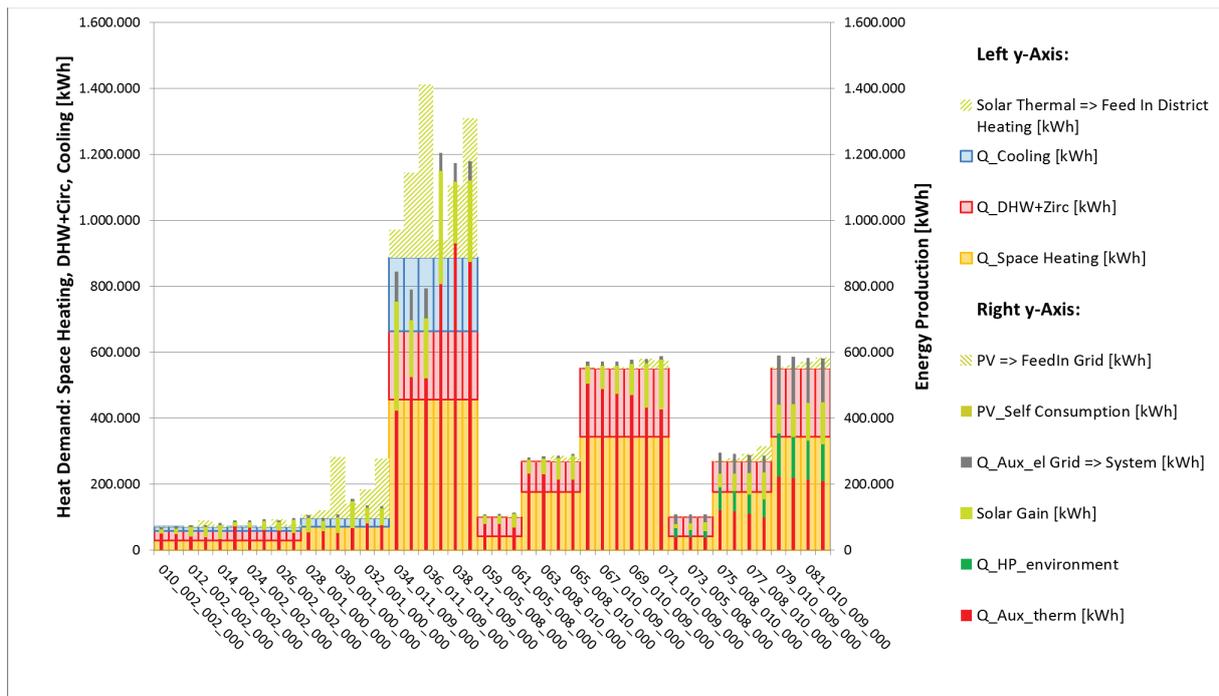


Abbildung 13: Energiebilanz für die **solarthermischen H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).

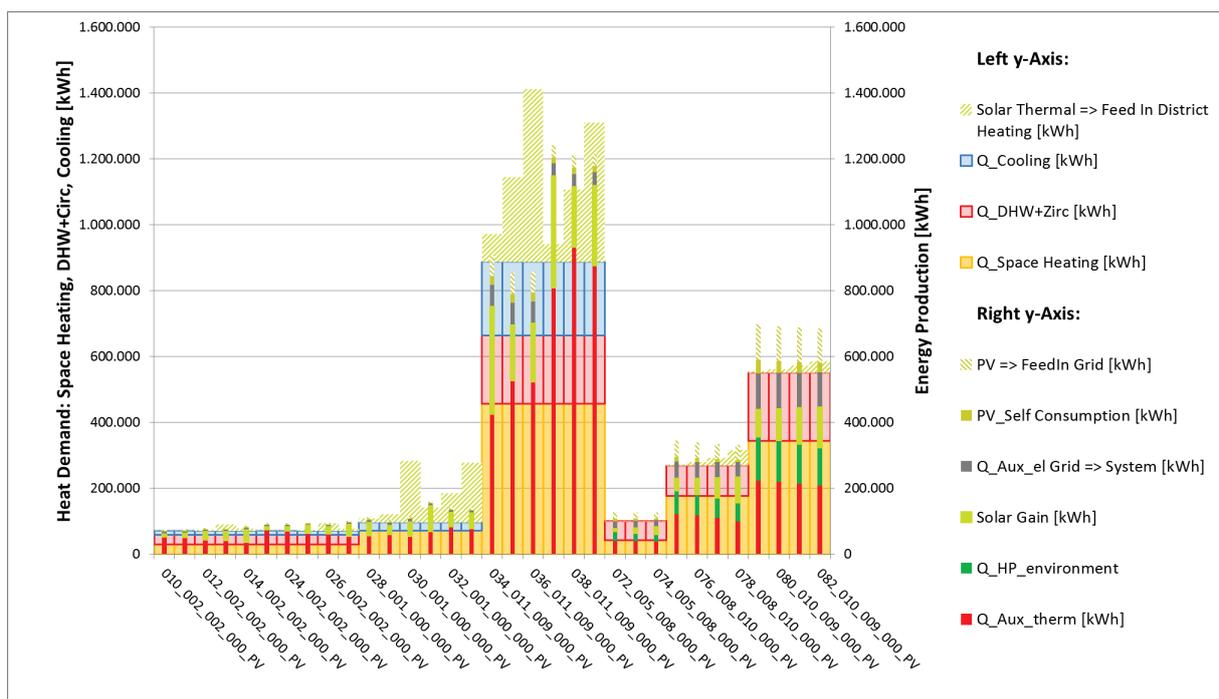


Abbildung 14: Energiebilanz für die **solarhybriden H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).

Ziel der Simulationen war es, einen Pool an möglichen Konfigurationen zu schaffen, der die Potenziale zum gebäudeübergreifenden Austausch von solarem Strom und solarer Wärme quantifiziert. In den Diagrammen ist dies durch die Komponente „Solar Thermal => Feed in District Heating“ bzw. „PV => FeedIn Grid“ dargestellt. Basierend auf diesen Ergebnissen sucht sich der „Quartiersoptimierer“ dann die optimale Konfiguration an H&K-Systemen der verschiedenen Gebäude heraus, welche beispielsweise zu geringsten Fernwärme-Importen

für die gesamte energetisch kooperierende Gebäudenachbarschaft (=Quartier) führt. So stellen beispielsweise das Bürogebäude bzw. das Q-Gebäude (großes Bürogebäude) im Sommer relativ viel Überschusswärme aus ihren Solarthermieranlagen dem Fernwärmenetz zur Verfügung (siehe Abbildung 13 Systeme 028 bis 033 bzw. 034 bis 039), um die umliegenden Wohngebäude mit Warmwasser zu versorgen. Die Ergebnisse dazu werden in Kapitel 4.8 dargestellt und diskutiert.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung und ökologische Betrachtung

Basierend auf dem entwickelten T53E⁴-Tool (Energy-Economy-Ecology-Evaluation Tool) wurde die Wirtschaftlichkeitsberechnung gemäß [VDI 2067:2012] durchgeführt. Die gesamten jährlichen Kosten sind die Summe der, nach Annuitätenmethode berechneten, jährlichen Kosten von Investition, Wiederbeschaffung, Wartung sowie die Verbrauchskosten für Elektrizität, Endenergieträger (hier Fernwärme) und die Minderung um die Einspeisevergütung sowie den Restwert der Anlage. Als Ergebnis wird die Annuität [EUR/Jahr] bzw. das „*CostRatio*“ als Verhältnis der Annuität des solaren H&K-Systems zur Annuität des Referenzsystems dargestellt. Für die Investitionskosten (C_{xx}) wurden im Rahmen der IEA SHC Task 53 basierend auf größenunabhängigen Grundkosten (d), größen-spezifischen Kosten (c) und einem Polynomkoeffizienten (e_{xx}) für die Anlagenspezifische Kenngröße (CAP) (z.B.: m² Kollektorfläche oder kW Kesselleistung) die Standardinvestitionskosten definiert und mit nachfolgender Gleichung berechnet: $C_{xx} = d + c * CAP^{e_{FPC}}$.

Für das Referenzsystem wurden in Abhängigkeit des Nutzwärme- bzw. -kältebedarfs der solaren H&K-Systeme die bestimmenden Kenngrößen eines konventionellen Standard-systems bestehend aus Fernwärme (für die Warmwasserbereitung und Heizung), Warmwasserspeicher, Kompressionskältemaschine und dazugehörigem Kaltwasserspeicher sowie die Endenergiebedarfe (Fernwärme bzw. Strom) mittels Standard-Effizienzfaktoren berechnet.

Für alle Systemkonfigurationen bzw. Referenzsysteme wurden mittels CO₂-Faktoren gemäß OIB-RL6 die CO₂-Emissionen für unterschiedliche Zeiträume berechnet. Für die Stromerzeugung wurden zwei Berechnungsansätze für die CO₂-Faktoren verwendet: a) Jahresdurchschnittswert (OIB-RL6) und b) Monatswerte (ergibt ebenfalls den OIB-RL6 Wert als gewichtetes Mittel über ein Jahr). Für die Fernwärme wurde als CO₂-Faktor ein 50:50 Mix von den laut OIB-RL6 angegebenen Werten für „Fernwärme aus Heizwerk (nicht erneuerbar)“ bzw. „Fernwärme aus Heizwerk (erneuerbar)“ angenommen. Abbildung 15 enthält die verwendeten CO₂ Konversionsfaktoren in monatlicher Auflösung.

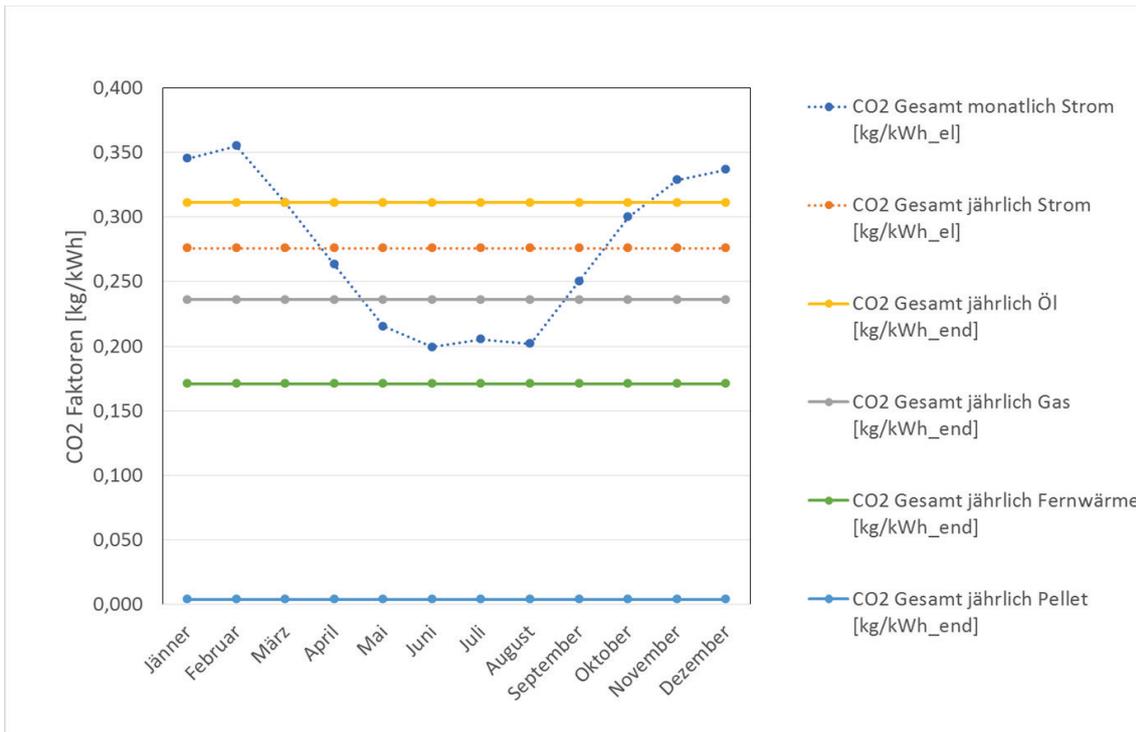


Abbildung 15: Verwendete CO₂-Faktoren nach OIB-RL6 (2015)

In Abbildung 16 sind beispielhaft die CO₂-Emissionen für rein elektrische H&K-Systeme unter Verwendung der zwei möglichen CO₂-Faktoren für Strom dargestellt. Die Verwendung des Monats-Faktors ergibt bis zu 14% höhere CO₂-Emissionen, da der Strombedarf im Winter mit deutlich „schlechterem“ Strom gedeckt wird bzw. die PV-Erzeugung hauptsächlich im Sommer einen grundsätzlich schon relativ „guten“ Strom ersetzt.

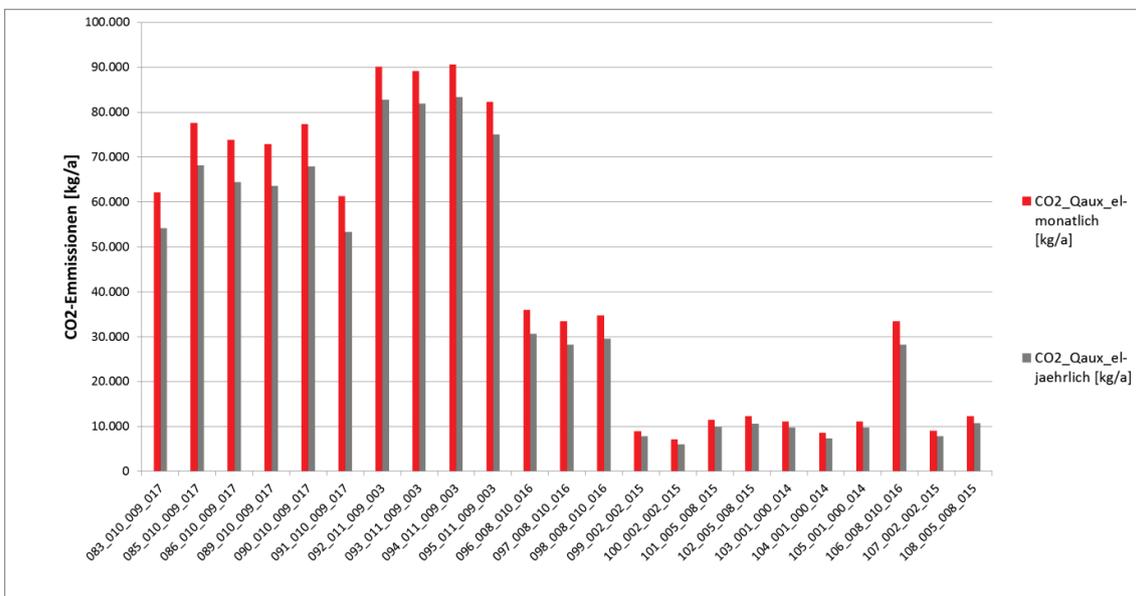


Abbildung 16: CO₂-Emissionen für rein elektrische H&K-Systeme mit den zwei möglichen CO₂-Faktoren für Strom: 1) Jahresdurchschnittswert nach OIB-RL6 (2015) oder 2) Monatsdurchschnittswerte, welche als gewichteten Jahresdurchschnittswert ebenfalls den Wert der OIB-RL6 ergeben.

In Abbildung 17 enthält ökonomische Größenordnungen zu den Auswirkungen der Einspeisung von Solarthermie-Überschusswärme in das Fernwärmenetz auf die Wirtschaftlichkeit am Beispiel eines Bürogebäudes. Der in Bürogebäuden üblicherweise

auftretende Nachteil der fehlenden Sommernutzung der Solarthermie zur Warmwasserbereitung kann durch eine Einspeisung zum Teil deutlich (Sys 030 und 033) entschärft werden. Die in diesem dargestellten Beispiel trotzdem hohen Kosten sind auf die Systemkonfiguration mit solarthermischem Kühlen zurückzuführen.

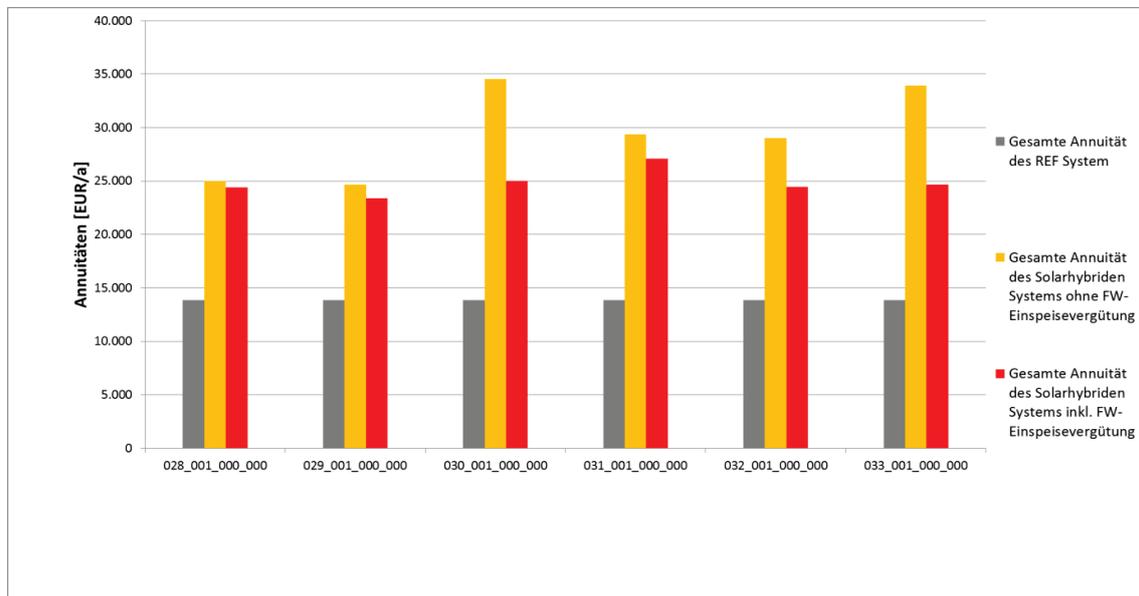


Abbildung 17: Einfluss der Einspeisung von Solarthermie-Überschusswärme in das Fernwärmenetz auf die Wirtschaftlichkeit am Beispiel des Bürogebäudes.

Da Absolutwerte für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen nur im Rahmen spezifischer Vergleiche an Hand eines speziellen Objektes sinnvoll sind, wurden die Annuitäten im Vergleich zum jeweiligen Referenzsystem als „CostRatio“ berechnet und wie in Abbildung 18 über die CO₂-Emissionen (mit monatlichen CO₂-Faktoren für Strom) dargestellt.

Diese Darstellung visualisiert übersichtlich die ökologische und die ökonomische Komponente der zu analysierenden Systemkonfigurationen. In diesen fiktiven Beispielen (hier sind alle simulierten Systeme dargestellt) sind die Systemkonfigurationen zum solaren Heizen und Kühlen für das Büro und das Q-Gebäude mit hohen Kosten verbunden, sie weisen allerdings auch die größte Bandbreite an möglichen CO₂-Einsparungspotenzialen auf. Für die fiktiven Beispiele der Wohngebäude liegt die Wirtschaftlichkeit im Bereich der Referenzsysteme, die Potentiale der CO₂-Einsparung lassen teilweise nur einen kleinen Spielraum zu.

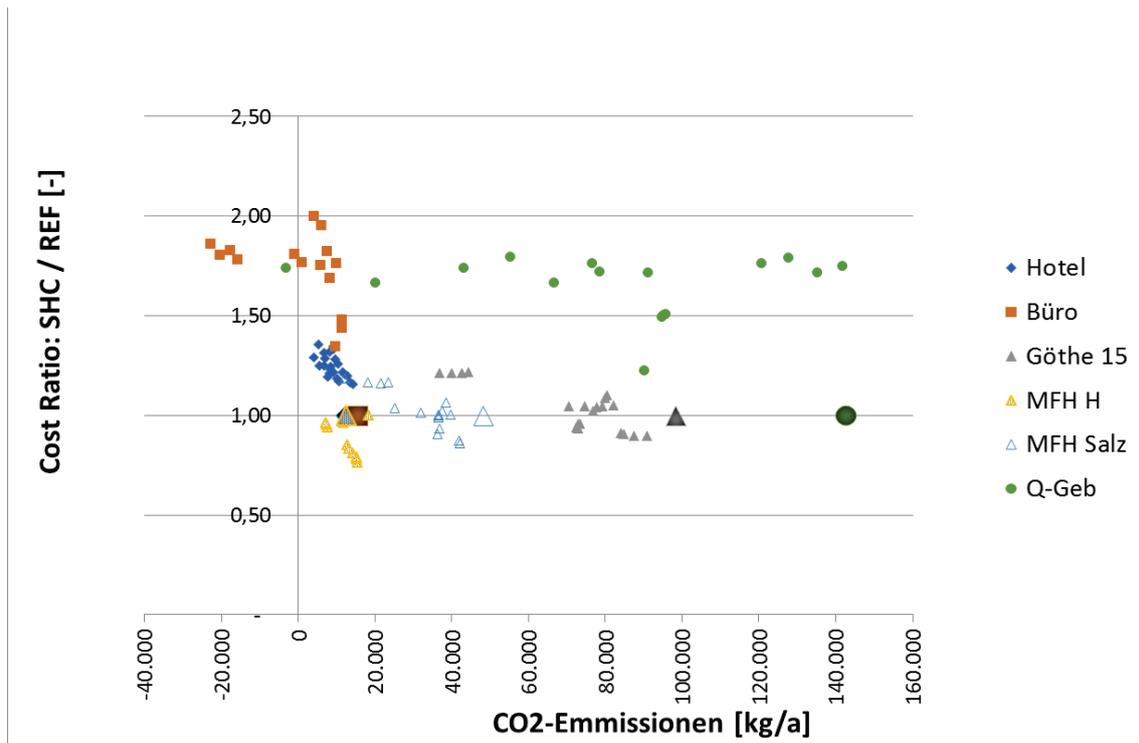


Abbildung 18: Gesamtannuität als ‚CostRatio‘ über die anfallenden CO2-Emissionen für alle Systemvarianten (große Symbole auf der CR=1 Linie entsprechen dem jeweiligen Referenzgebäude).

4.4 BIG Solar Energiesystem

In enger Abstimmung mit dem CiQuSo-Projektpartner Salzburg Wohnbau GmbH und dem Wärmeversorger Salzburg AG wurde vom Unternehmenspartner SOLID ein Konzept für die Integration von solarer Wärme durch eine Großanlage ins Itzlinger Fernwärmenetz bzw. für die Wärmeversorgung der Goethesiedlung mit rund 20 Wohnhäusern aus den 70er Jahren erstellt.

Im Zuge der Dachsanierung und der Neuerrichtung der Gebäude lassen sich auf den verfügbaren 16.000 m² Dachflächen solarthermische Kollektoren errichten.



Abbildung 19 Salzburg Itzling - Goethesiedlung und Heizkraftwerk (HKW) Nord (google.maps)

Mit einem maximalen Belegungsgrad von 46% (s. Abbildung 20) ergibt sich eine mögliche Gesamtkollektorfläche von rund 7.500 m². Vorgesehen sind solarthermische Hochtemperatur – Flachkollektoren.



Abbildung 20 Flachdach des Wohngebäudes Goethestraße 15, mit exemplarischer Solarkollektorbelegung (gelb), wobei gesetzliche Mindestabstände zu Dachaufbauten und notwendige Servicewege sind berücksichtigt.

Mit diesen Kollektoren wird vorrangig jene Wärme bereitgestellt, welche in der Siedlung direkt benötigt wird. Durch moderne Übergabestationen, intern neuerrichtete Gebäudeteile und verbesserte Energiesysteme in dem sanierten Altbestand können niedrigere Rücklauftemperaturen bereitgestellt werden, welche zu höheren Solarerträgen sowie zu einer besseren Speichernutzung führen.

Mit dieser Energie wird der Warmwasserbedarf im Sommer zur Gänze abgedeckt und in Verbindung mit einem saisonalen Pufferspeicher können die sommerlichen Überschüsse gespeichert werden. Durch Kombination mit einer Absorptionswärmepumpe kann die im Speicher enthaltene Energie bis in niedrige Temperaturbereiche (ca. 10 bis 20°C) genutzt

werden. Dadurch kann für die Übergangszeit bis in den Winter eine Deckung des Wärmebedarfs pro Tag bis zu 25% erreicht werden.

Basierend auf den lokalen Strahlungsdaten wurde ein jährlicher Energieertrag von 3.245 MWh berechnet. Tabelle 5 listet die Werte zu den Solarerträgen, dem Wärmebedarf, dem generierten Überschuss an solarer Wärme und der solaren Deckung der Goethesiedlung Goethestraße auf.

Tabelle 5 Bedarf, berechneter Solarertrag, Wärmemenge in/aus Saisonspeicher und solare Deckung

Monat	Bedarf (HWB, inkl. WW)	Solarertrag	ST in Saisonal-speicher	ST aus Saisonal-speicher	Solare Deckung
	MWh	MWh	MWh	MWh	[%]
Jänner	1.083,2	90,5		121,3	20
Februar	1.066,2	120,8		118,0	22
März	891,2	263,3			30
April	773,2	347,3			45
Mai	524,2	443,2			85
Juni	448,7	433,8			97
Juli	199,2	463,5	264,3		100
August	166,7	433,9	267,3		100
September	186,2	313,0	126,8		100
Oktober	348,7	216,1		70,0	82
November	509,7	71,8		120,0	38
Dezember	777,7	47,6		130,0	23
Gesamt	6.974,5	3.244,9	658,4	559,3	45

In den Monaten Juli bis September treten solare Überschüsse auf und für diese wurde ein notwendiges Speichervolumen von etwa 17.000 m³ ermittelt. Grundlegend stehen zur saisonalen Speicherung zwei Formen zur Auswahl, namentlich Erdbeckenspeicher und Tankspeicher. In der Studie wurde die Koppelung des Speichers mit einer Absorptionswärmepumpe angenommen, dadurch lässt sich die gespeicherte Wärme auch auf niedrigerem Temperaturniveau besser nutzen. Folglich reduziert sich die Speichergröße auf nahezu die Hälfte.

Nach eingehender Variation der Dimensionierung von technischen Teilkomponenten, des notwendigen Flächenbedarfs unter Einbeziehung der Verfügbarkeit und des Grundpreises sowie der jeweils notwendigen Rohrleitungslängen des Verteilnetzes wurde für diese Varianten eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser liegen dem Projektkonsortium vor und können auf Anfrage eingesehen werden.

4.5 Umgesetzte CiQuSo – Optimierungsmethode

Mit zunehmendem Projektfortschritt und der Analyse wesentlicher Teilergebnisse wurde deutlich, dass der gewählte CiQuSo-Ansatz unter Verwendung der generierten Ersatzmodelle zur Abbildung sowohl des thermischen Gebäudeverhaltens als auch des energetischen

Betriebsverhaltens der solaren Heiz- und Kühlsysteme nicht die erforderliche Ergebnisgenauigkeit aufweisen.

- Die Grundidee war ein möglichst generisches vereinfachtes Gebäudemodell zu entwickeln, welches den definierten SH&K-Systemen eine mittlere Raumtemperatur als Regelungssignal übergibt. Gewählt wurde der RC-Modellierungsansatz. Die Ergebnisse der RC-Modellierung zeigten trotz diverser Adaptionen und Verbesserungen keine ausreichend hohe Genauigkeit, sodass diese Ersatzmodelle für den CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene als ungeeignet einzustufen waren.
- Die Generierung von Ersatzmodellen zur vereinfachten und ausreichend genauen Abbildung des Betriebsverhaltens von solaren Heiz- und Kühlsystemen mittels BlackBox-Modellierung wurde nicht erreicht. Es stellte sich in Analogie zum RC-Modellierungsansatz heraus, dass bei einigen Modellierungsansätzen eine hinreichende Genauigkeit erzielt wurde, jedoch nicht bei allen BlackBox-Modellen garantiert werden konnte. Zusätzlich erschwerte die zeitlich aufwendige Rechenperformance und damit einhergehende erhöhte Simulationszeit die Anwendbarkeit der BlackBox-Modelle.

Durch diese einschränkenden Fakten hat das CiQuSo-Projektteam die Ansätze zur RC- und BlackBox-Modellierung verworfen und einen alternativen Weg umgesetzt. Der alternative CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene greift auf die Nutzung der jeweiligen Basismodelle und ihrer Ergebniszeitreihen der Simulationsumgebungen EnergyPlus (Gebäude) und TRNSYS (SH&K-Systeme) zurück. Diese Modelle und Ergebniszeitreihen wurden als Referenz im Zuge der RC- und BlackBox-Modellierung bereits entwickelt. Die Ergebniszeitreihen stehen mit Werten in 15-minütiger Auflösung zur Verfügung.

4.6 Quantifiziertes Lastverschiebepotenzial auf Quartiersebene

Abbildung 21 zeigt beispielhaft das Lastverschiebepotential für ein Quartier bestehend aus drei Gebäuden (B1, B2, B3). Jedem Gebäude wurde ein System zugewiesen (siehe blaue Markierung), anhand dessen, für jedes Gebäude individuell der thermische/elektrische Bedarf bzw. Überschuss je 15-minütigen Zeitschritt berechnet wird. Dabei ist der Bedarf rot und der Überschuss blau dargestellt (siehe Abbildung 21 beide Grafiken rechts oben).

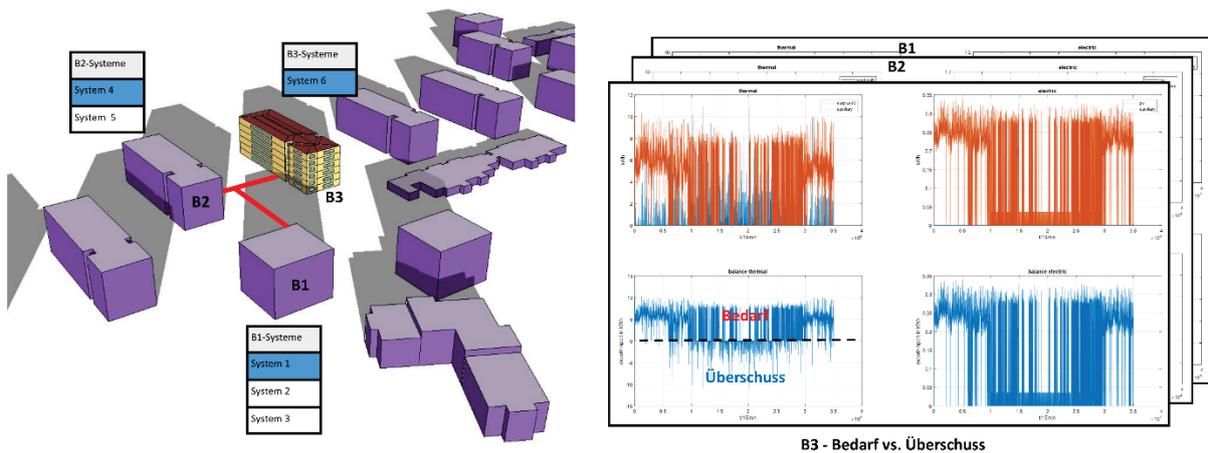


Abbildung 21: Erklärung Lastverschiebepotential auf Quartiersebene

Für die Quartiersbetrachtung wird der Gesamtbedarf bzw. -überschuss durch Addieren aller Gebäudebilanzergebnisse ermittelt. Auftretende thermische und elektrische Übertragungsverluste (z.B. durch Umformerstationen, Leitungsverluste, etc.) sind vereinfacht abgebildet. Pro Zeitschritt wird berechnet, ob das definierte Stadtquartier Energie (Strom und Wärme) importiert oder exportiert, d.h. die Information, ob Energiebedarf besteht oder eine Netzeinspeisung stattfinden kann, steht zur Verfügung.

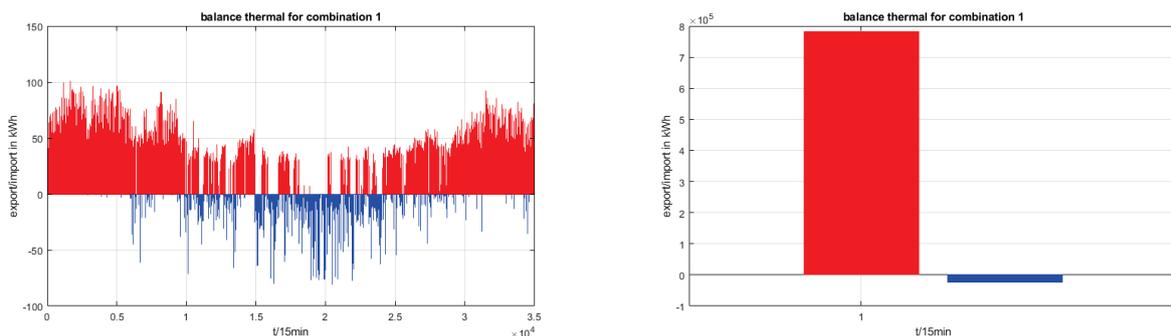


Abbildung 22 zeigt links den thermischen Bedarf (rot) bzw. thermischen Überschuss (blau) einer Viertelstunde über ein ganzes Jahr, sowie rechts wird die kumulierte Jahressumme in kWh beziffert.

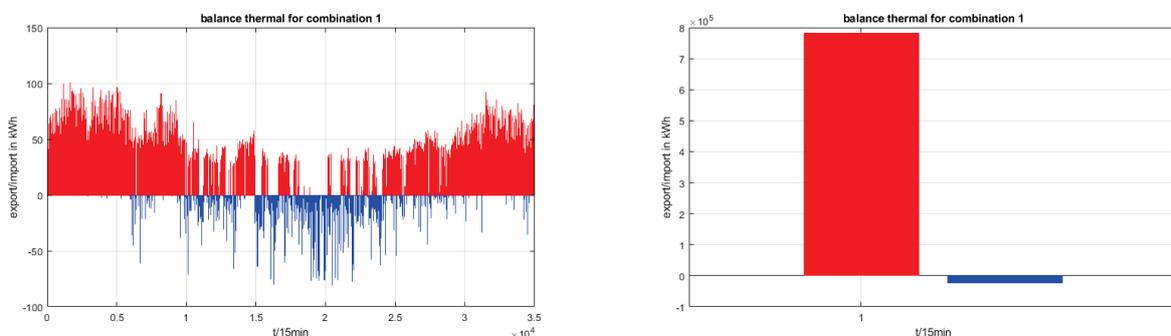


Abbildung 22: Beispielhaftes Lastverschiebepotential auf Quartiersebene (zeitlicher Verlauf und Jahressumme)
 Als Basis dieser Analysen dienen die Ergebniszeitreihen aus den vorhergegangenen Einzelsimulationen (Gebäude und SH&K-System). Mit dieser Methode lassen sich für beliebige Quartiere, sowohl zeitabhängig (je Zeitschritt) als auch kumulativ auf Monats- bzw.

Jahresbasis, die potenziell nutzbaren thermischen sowie elektrischen Überschüsse quantifizieren. Mit dieser Überschussenergie werden im CiQuSo-Ansatz einerseits andere Gebäude im Quartier versorgt oder andererseits erfolgt eine Netzeinspeisung.

4.7 GIS-Visualisierung

Das CiQuSo-Projektteam hat eine Webapplikation mit GIS-Visualisierung (Prototyp) entwickelt, um einerseits die Darstellung verschiedener CiQuSo-Ergebnisse visuell leicht erfassbar zu gestalten und andererseits dem Nutzer mit dieser webbasierten Applikation die Möglichkeit zu geben, interaktiv eigene Untersuchungen zu verschiedenen Gebäudenachbarschaften und Technologielösungen zum solaren Heizen und Kühlen im Stadtteil Itzling durchzuführen.

Im CiQuSo-Framework werden die Berechnungsergebnisse des Quartiersoptimierers in eine PostgreSQL Datenbank geschrieben, die für die GIS-Visualisierung benötigt wird. Dazu wurden alle Zeitreihen und Informationen der einzelnen Systeme, die Ergebniszeitreihen der Optimierungsaufgaben, alle erforderlichen Metadaten, z.B. Gebäude und Systemmetadaten, sowie die eigentliche Lösung, d.h. Gebäude-Systemkombinationen, in die entsprechenden Tabellen der Datenbank geschrieben.

Der Nutzer der Webanwendung hat grundsätzlich drei unterschiedliche Möglichkeiten, sich die CiQuSo Projektergebnisse darstellen zu lassen:

1. Als Vergleich von unterschiedlichen SH&K-Systemen für ein einzelnes ausgewähltes Gebäude (Funktion *Systemvergleich*)
2. Als gebäudeübergreifender Quartiersvergleich unter Anwendung des CiQuSo-Ansatzes für eine Anzahl von frei wählbaren Gebäuden (Funktion *Netzwerkvergleich*)
3. Als vorberechnetes Optimum für ein Quartierssszenario (Funktion *Optimiertes Quartier*)

In der 3D Kartenansicht der Webapplikation hat der Nutzer grundsätzlich die Möglichkeit auf eines der orangegefärbten Gebäude zu klicken, um sich die in der Datenbank hinterlegten Gebäudedaten anzeigen zu lassen – siehe Abbildung 23. Die Gebäudedaten beinhalten folgende grundsätzliche Informationen: eindeutige Gebäude-ID, Gebäudebaujahr, Bruttogeschossfläche, Anzahl der Stockwerke, Gebäudenutzung, Auswahl verfügbarer SH&K-System, Energiebedarf für Heizen, Kühlen, Warmwasser etc. Die derzeitig entwickelte Webapplikation lässt eine Auswahl zwischen fünf verschiedenen Gebäuden im Stadtteil Itzling zu.



Abbildung 23: Screenshot der GIS-Visualisierung und den fünf auswählbaren Gebäuden, Das gelbe Gebäude (ID_47) ist ausgewählt und das Menu zeigt die hinterlegten Daten und Informationen zu diesem Gebäude

Nach der Auswahl eines Gebäudes durch Anklicken lädt die Applikation, anhand der Gebäude-ID, die Informationen der verfügbaren SH&K-Systeme. Diese werden in einem bereits vordefinierten Bokeh¹³ Frame hinterlegt, um einen Vergleich der SH&K-Systeme für das ausgewählte Gebäude zu ermöglichen. Das Front-End wurde so entworfen, dass es dem Nutzer ermöglicht fünf unterschiedliche SH&K-Systeme für ein Gebäude gleichzeitig untereinander zu vergleichen. Die Auswahl der Systeme erfolgt über entsprechende Dropdown-Boxen innerhalb des Bokeh-Frames. Nach der Auswahl der SH&K-Systeme, lädt Bokeh die verfügbaren Informationen aus der Datenbank. Diese werden sowohl zeitlich als Jahresgang via Liniendiagrammen, als auch kumuliert als Jahreskennwerte via Balkendiagramme angezeigt. Um eine detaillierte Analyse zu ermöglichen, bietet eine Werkzeugleiste die Möglichkeit in alle fünf Graphen synchronisiert hineinzuzoomen. Abbildung 24 zeigt die GIS-Visualisierung und die Funktion Systemvergleich.

¹³ <https://bokeh.pydata.org>

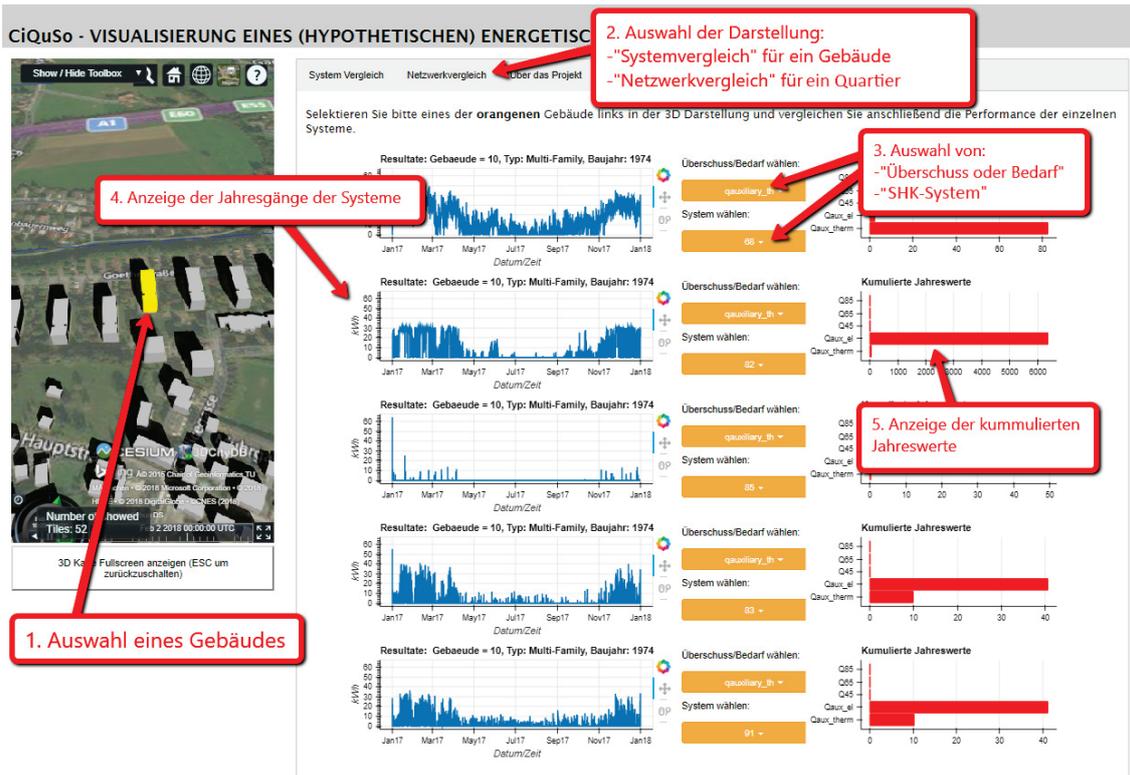


Abbildung 24: Front-End der GIS- Visualisierungswebanwendung als Beispiel "Systemvergleich"

Weiters wurde die Funktion *Netzwerkvergleich* (gebäudeübergreifender Quartiersvergleich) entwickelt. Diese wird aktiviert, sobald ein Nutzer zwei oder mehr orangegefärbte Gebäude selektiert – siehe Abbildung 25. Dadurch wird ein individuelles Gebäudequartier erstellt und mittels Funktion *Netzwerkvergleich* lädt die Applikation für jedes Gebäude, die SH&K-Systeminformationen in die vorgesehenen Dropdown-Boxen.

Der Nutzer der Applikation kann für jedes der fünf Gebäude ein eigenes SH&K-System auswählen. Mit Aktivierung des Buttons *Berechne Ergebnis* bilanziert die Applikation für die getroffene Auswahl (Gebäude und SH&K-Systeme) die Bedarfs- und Erzeugerzeitreihen. Eine Optimierung wird in der Funktion *Netzwerkvergleich* nicht durchgeführt. Abbildung 26 zeigt exemplarisch die Ergebnisse eines Quartiers. Mittels Liniendiagrammen werden die als Jahresgänge in kWh/m² jeweils für die thermische (links) und elektrische (rechts) Betrachtung angezeigt. Ein Balkendiagramm darunter zeigt kumulierte Jahreskennwerte. Für das betrachtete Quartier werden sowohl die energetischen Überschüsse (Exporte = negativ dargestellt), als auch der energetische Bedarf (Importe = positiv dargestellt) berechnet und in den Linien- und Balkendiagrammen angezeigt. Zusätzlich werden der Primärenergiebedarf (in kWh/m²) und die CO₂-Emissionen (in kg/m²) berechnet und beziffert.

CiQuSo - VISUALISIERUNG EINES (HYPOTHETISCHEN) ENERGETISCHEN NETZWERK

The screenshot shows the CiQuSo interface. On the left is a 3D map of a building district with a toolbar at the top and a status bar at the bottom. On the right is a system selection menu with the following content:

System Vergleich | Netzwerkvergleich | Über das Projekt

Selektieren Sie bitte ein oder mehrere Gebäude links in der 3D Darstellung.
CTRL+Klick: Gruppe von Häusern selektieren und deren Jahresgänge anzeigen
 danach die Systeme für die einzelnen Gebäude auswählen.

- Gebäude 11: Office
 BJ: 2008, BGF: 7845m² [36]
- Gebäude 2: Hotel
 BJ: 1999, BGF: 737m² [13]
- Gebäude 8: Multi-Family
 BJ: 1999, BGF: 2616m² [Bitte System wählen]
- Gebäude 5: Multi-Family
 BJ: 1999, BGF: 1260m²

[Berechne Ergebnis]

- V=2,5A=50
- V=5A=50
- V=10A=100
- V=5A=100
- V=10A=100
- V=10A=200
- V=20A=200
- V=1A=20WP=20
- V=2A=40WP=20
- V=3A=80WP=20
- V=5A=100WP=150
- V=7A=140WP=150
- V=10A=200WP=150
- V=15A=300WP=150
- V=10WP=120PV=30
- V=5WP=90PV=30
- V=10WP=90PV=30
- V=5WP=90PV=30

3D Karte Fullscreen anzeigen (ESC um zurückzuschalten)

Abbildung 25: Gebäude- und Systemauswahl für Gebäudequartiersvergleich

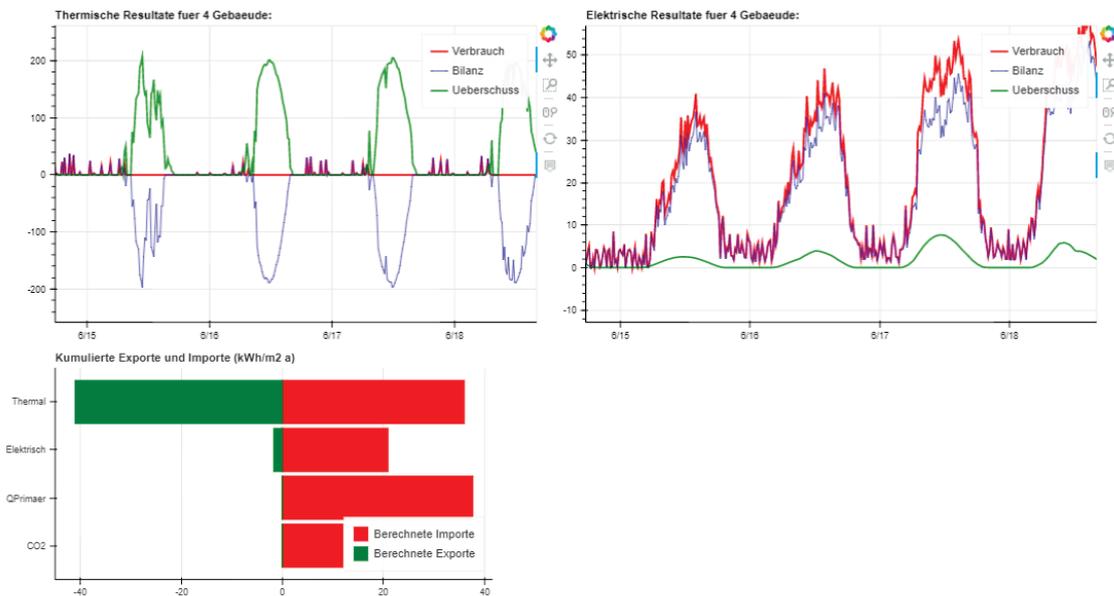


Abbildung 26: Ergebnis der Netzwerkberechnung (gezoomt)

Im Zuge der Funktion *Optimiertes Quartier* sind die vorausgerechneten Optimierungsergebnisse im Sinne des CiQuSo-Ansatzes ebenfalls in der Datenbank abgelegt. Für jedes

Gebäude werden mit Durchführung der Funktion *Optimiertes Quartier* die identifizierten Lösungen zu den unterschiedlichen Optimierungsaufgaben abgelegt. Die vier festgelegten Optimierungsparameter sind a) CO₂-Emissionen, b) Primärenergiebedarf, c) Stromimporte und d) Wärmeimporte die Jahreswerte des jeweiligen Parameters.

Der Nutzer ist in der Lage, sich die Ergebnisse des optimierten Quartiers manuell mit der Funktion *Netzwerkvergleich* nachzubauen (Auswahl der Gebäude und der entsprechenden SH&K-Systeme) und danach detailliert zu analysieren.

Die Webapplikation zur GIS-Visualisierung (Prototyp) kann nach Absprache mit den Mitarbeitern des AIT Austrian Institutes of Technology vorgestellt werden.

4.8 Quartiersoptimierung

Eines der wesentlichen CiQuSo-Projektergebnisse besteht in der Identifikation einer Kombination aus festgelegten Gebäuden im Quartier und jenen solarhybriden Heiz- und Kühlsystemen, die mittels des gebäudeübergreifenden Energieaustausches (Strom und Wärme) zu besten Resultaten hinsichtlich eines gewählten Zielparameters führt.

Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit und Funktionstüchtigkeit des entwickelten CiQuSo-Frameworks und der Optimierungsmethode wurden sechs Gebäude als Repräsentanten aus dem Itzlinger Quartier ausgewählt. Aus mehreren zehntausend Kombinationsmöglichkeiten sollte der Quartiersoptimierer die Technologiesystemlösungen zum solaren Heizen und Kühlen identifizieren, die zu den geringsten CO₂-Emissionen, dem geringsten Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil) und den geringsten Strom- und Wärmeimporten ins Quartier führen. Tabelle 6 listet die sechs ausgewählten Gebäudetypen auf und beziffert die spezifischen Energiebedarfszahlen für Heizen, Kühlen, Warmwasserbereiten und Gerätebetreiben. Jedem dieser Gebäude wurden unterschiedliche solarhybride H&K-Systeme zugeteilt, deren energetisches Betriebsverhalten als durchgerechnete Lastzeitreihen für den Optimierer in der Datenbank abrufbar sind. Diese solarhybriden H&K-Systeme variieren neben der Anlagengröße zur Solartechnik (PV und Solarthermie), auch die Heiz- und Kühlsysteme durch ihren Systemaufbau und ihre Teilkomponenten, wie Fernwärmeanschluss oder Wärmepumpe, thermische Kältemaschine und klassische Kompressionskältemaschine. Weiters wurden thermische Speichergrößen variiert und unterschiedliche Regelstrategien fanden ihre Anwendung.

Fünf Vergleichsszenarien wurden definiert und ausgewertet:

- **Referenzszenario** – Die sechs Gebäude werden energetisch konventionell versorgt, d.h. Fernwärme (für Warmwasser und Heizung), Warmwasserspeicher, Kompressionskältemaschine und dazugehörigem Kaltwasserspeicher.
- **Szenario Solarthermisch** – Die sechs Gebäude werden jeweils mit jenen solarthermischen H&K-Systemen versorgt, die für den jeweiligen Zielparameter **auf Gebäudeebene** zur besten Technologielösung führt.

- **Szenario Solarelektrisch** – Die sechs Gebäude werden jeweils mit jenen solar elektrischen H&K-Systemen versorgt, die für den jeweiligen Zielparameter auf Gebäudeebene zur besten Technologielösung führt.
- **Szenario Solarhybrid** - Die sechs Gebäude werden jeweils mit jenen solarhybrid H&K-Systemen versorgt, die für den jeweiligen Zielparameter auf Gebäudeebene zur besten Technologielösung führt.
- **Szenario Quartiersoptimierer** - Die sechs Gebäude werden jeweils mit jenen solarhybride H&K-Systemen versorgt, die für den jeweiligen Zielparameter der Optimierung **auf Quartiersebene** mit gebäudeübergreifendem Energieaustausch und Netzeinspeisung zur besten Technologiesystemlösung führt.

Tabelle 6: Ausgewählte Gebäudetypen für Quartiersoptimierung und ihre spezifischen Energiebedarfswerte

Gebäudetyp	BGF	Strombedarf	HWB	KEB	WWWB
	m ²	[kWh/a m ²]			
Büro	1.050	18,5	70	23	0
Hotel	737	8	41	16	40
MFH 1999	1.260	15,5	33	0	47
SalzachPark-Adolf Kolping 'Str 4-8	2.616	17	68	0	35
Wohngebäude Goethestrasse 15	5.768	16,5	60	0	36
Bürogebäude IQ Salzburg (Arbeiten und Wohnen)	7.845	18,5	59	28	26

Beispielsweise hat der Quartiersoptimierer aus dem festgelegten Systempool der sechs Gebäudetypen jene solarhybriden H&K-Systeme identifiziert, die zu den geringsten CO₂-Emissionen über den Zeitraum eines Jahres führen. In Abbildung 28 bis Abbildung 31 sind jene Anlagenkonfigurationen aufgeführt, welche beispielsweise zu den geringsten CO₂-Emissionen für das Quartier (= 26.443 kg CO₂/a) führen.

Abbildung 27 zeigt für jede der fünf Optimierungsgrößen die Jahressummen der fünf verschiedenen Szenarien bezüglich der Optimierungsparameter CO₂-Emissionen, Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil, Strom- und Wärmeimporte und Gesamtannuität).

Die Optimierungsergebnisse sind jeweils für sich als potenzieller Bestwert zu betrachten und vollkommen unabhängig voneinander, d.h. aus den 26.443 kg CO₂/a für das „Optimierte Quartier“ kann nicht gefolgert werden, dass für dieses „Optimierte Quartier“ die Gesamtannuitäten 220.051 EUR/a sind, diese ist in diesem Fall 302.671 EUR/a.

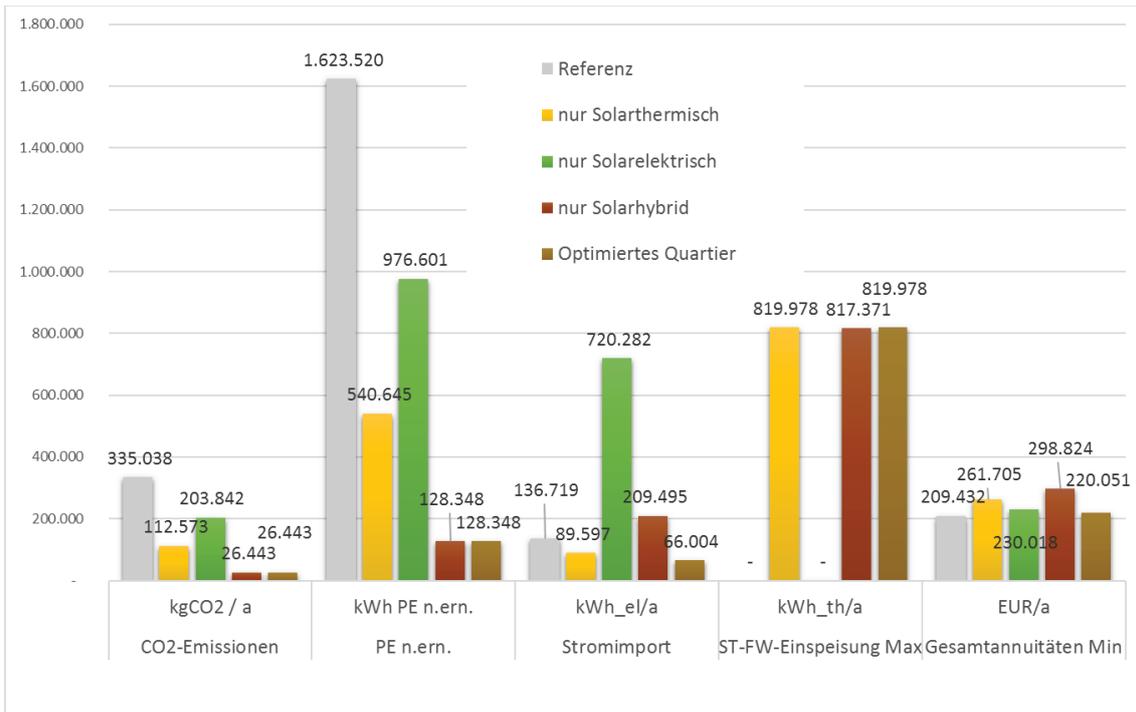


Abbildung 27: Optimierungsergebnisse für die Zielparame-ter a) geringste CO₂ Emissionen, b) geringster Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil), c) geringste Stromimporte und d) geringste Wärmeimporte. Alle Werte sind jeweils vollkommen unabhängig voneinander als jeweiliger potentieller Bestwert zu betrachten!

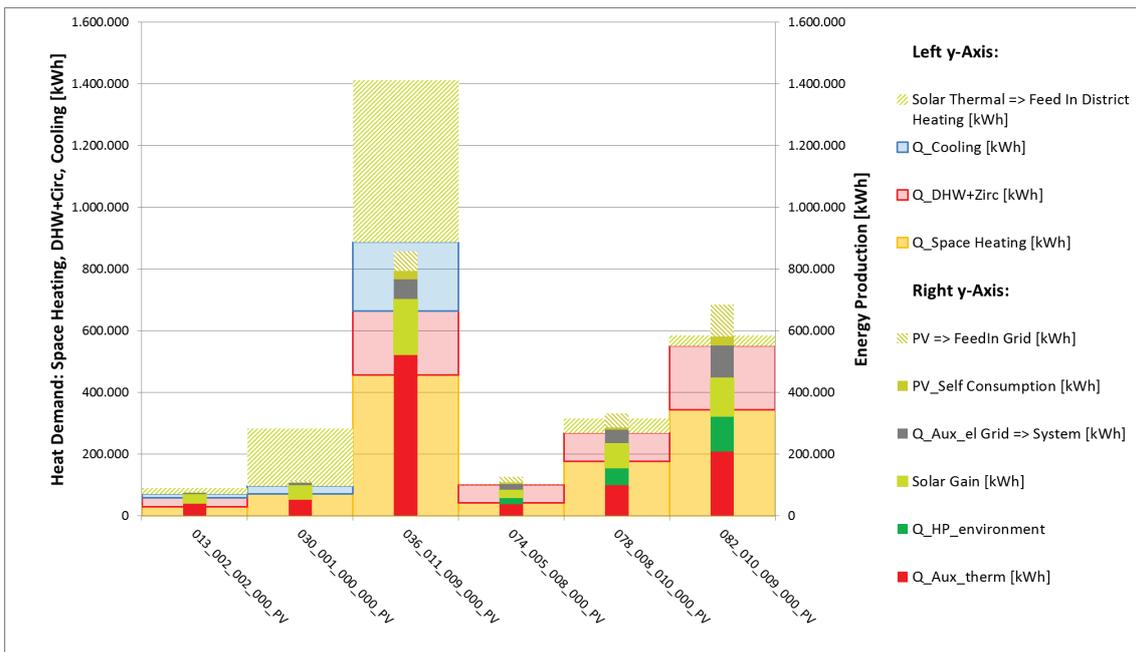


Abbildung 28: Energiebilanzen der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparame-ter geringste CO₂ Emissionen (CO₂-Faktor Strom – Jahresdurchschnittswert) für das Quartier. Gebäude von links nach rechts: Hotel (002), Büro (001), IQ-Sbg (011), MFH 1999 (005), Salzachpark (008), Goethestr. 15 (010)

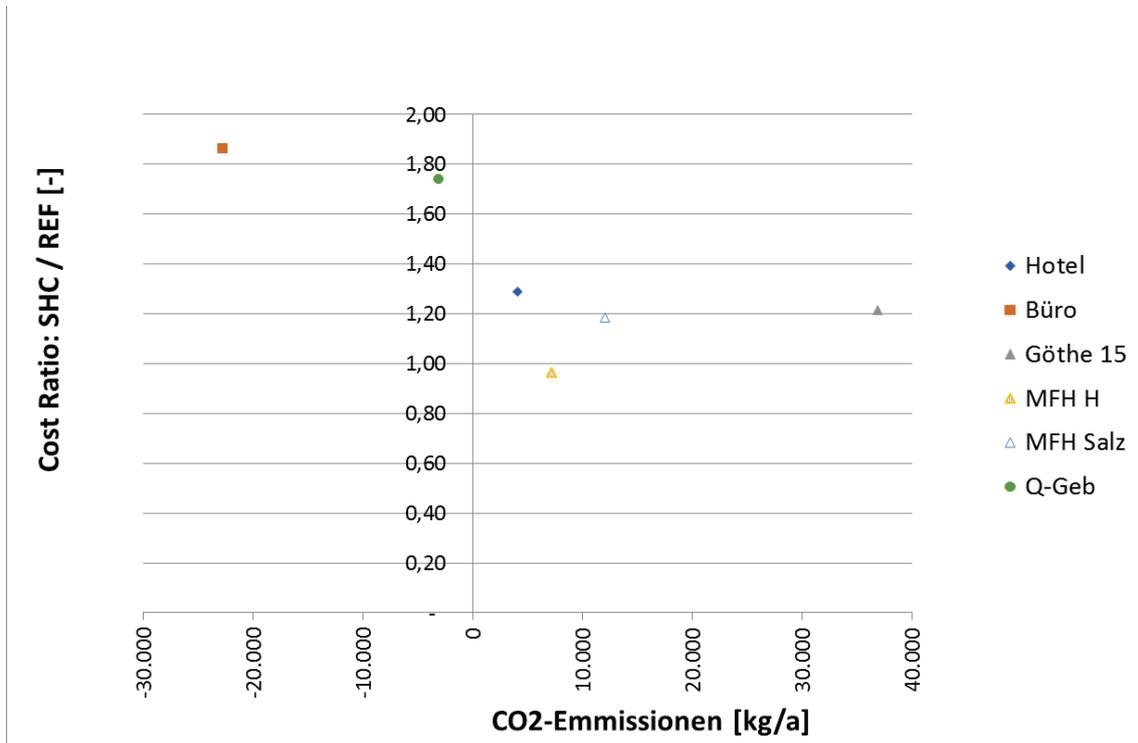


Abbildung 29: Gesamtannuität als ‚CostRatio‘ über die anfallenden CO2-Emissionen der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO2 Emissionen (CO2-Faktor Strom – Jahresdurchschnittswerte) für das Quartier.

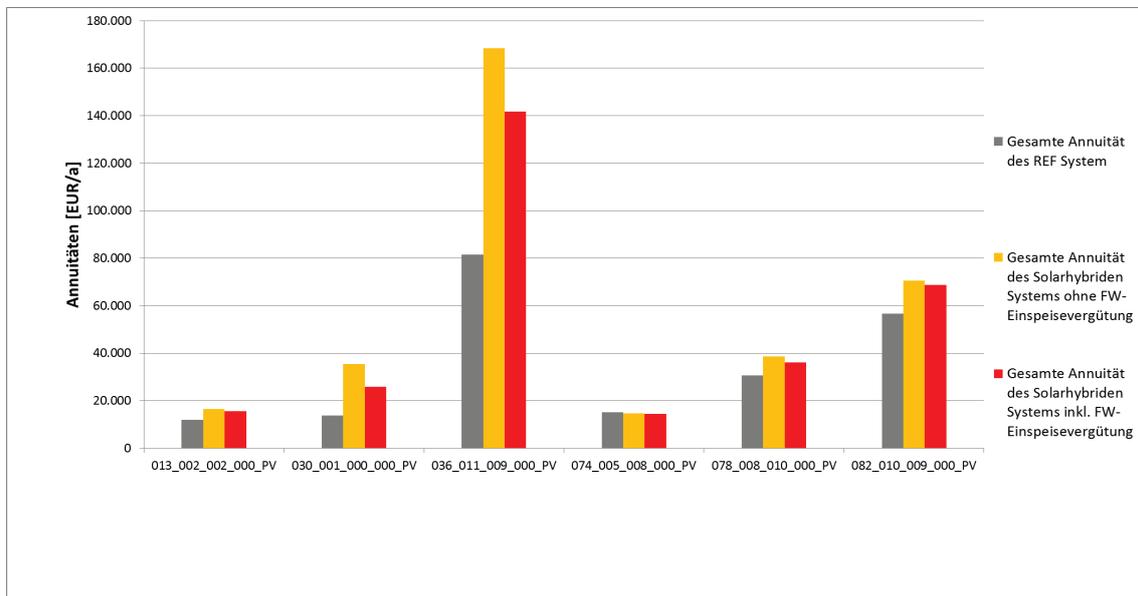


Abbildung 30: Gesamtannuitäten (mit/ohne Berücksichtigung der Fernwärmeeinspeisung) der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO2 Emissionen (CO2-Faktor Strom – Jahresdurchschnittswerte) für das Quartier.

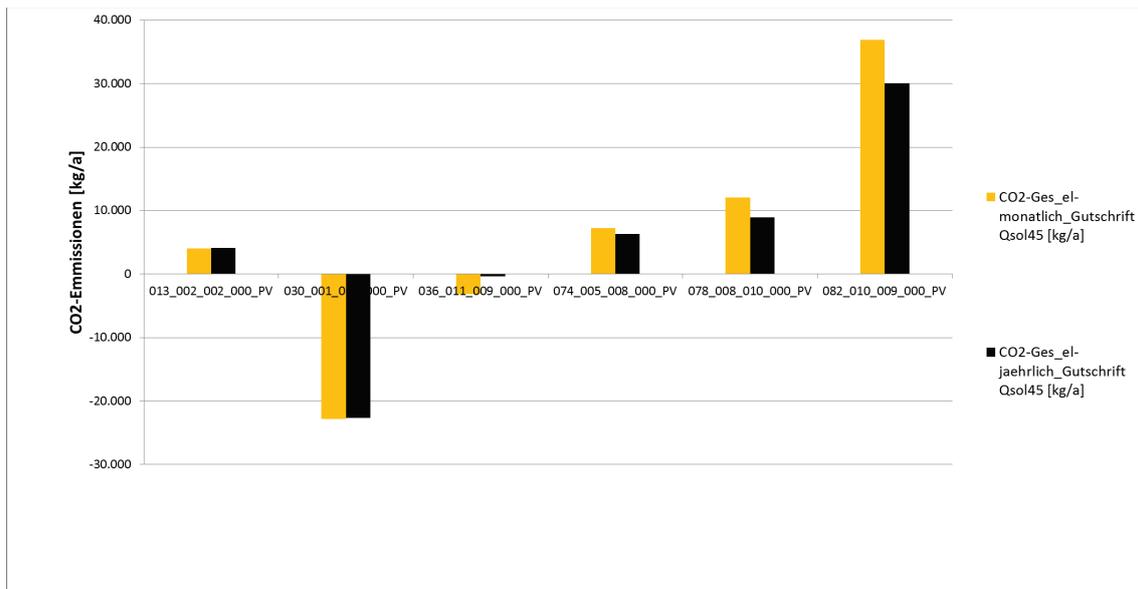


Abbildung 31: CO₂-Emissionen (mit Berücksichtigung des monatlichen bzw. jährlichen CO₂-Faktors für den Strom) der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO₂-Emissionen für das Quartier.

Mit Diskussion der Berechnungsergebnisse des Quartier-Optimierers hinsichtlich geringster CO₂-Emissionen sind die Auswirkungen unterschiedlicher Bewertungsparameter quantifiziert. Abbildung 28 beziffert die Potenziale der Einspeisung von Solarthermie-Überschuss der Systeme 030 und 036 in das Fernwärmenetz, die sich ökonomisch (Abbildung 30) wie auch ökologisch (Abbildung 31) deutlich bemerkbar machen, wenn sie durch Vernetzung über das Fernwärmenetz genutzt werden können.

Ebenfalls zeigt Abbildung 31, dass eine „ehrliche“ Betrachtung der CO₂-Faktoren auf Basis von zumindest monatlichen CO₂-Faktoren zu doch deutlich höheren CO₂-Emissionen führt, da der Anteil der Stromerzeugung mit Nutzung erneuerbarer Energiequellen im Winter abnimmt und daher zu deutlich schlechteren CO₂-Faktoren in den Wintermonaten führt.

5 Schlussfolgerungen

Das **Hauptziel** des *CiQuSo*-Projektes war die Entwicklung, Evaluierung und Optimierung von Systemlösungen zum solaren Heizen und Kühlen auf Stadtquartiersebene. Eine der *CiQuSo*-Kernforschungsarbeiten umfasste die Methodenentwicklung zur Identifikation der Technologie- und Gebäudekombinationen, die eine maximierte Eigennutzung der lokal im Quartier genutzten und umgewandelten Solarenergie unter Nutzung des quartierinternen gebäudeübergreifenden Energie-Austausches (Strom und Wärme) aufweisen. Einerseits werden so die Energieimporte und -exporte über die Quartiersbilanzgrenze hinweg stark reduziert und andererseits versorgt sich das Quartier zunehmend durch die maximierte Eigennutzung lokal verfügbarer urbaner erneuerbarer Energiequellen energetisch im hohen Grade selbst.

Das *CiQuSo*-Projektteam hat mit der entwickelten, durchgeführten und überprüften Methode zur Quartiersoptimierung definitiv im Energiebereich Neuland betreten. Mit der Festlegung die Methode zur Quartiersoptimierung nicht über Co-Simulationen von vielen geeigneten Expertentools auszuführen und stattdessen die Erstellung und Nutzung von vereinfachten Ersatzmodellen zur Abbildung des energetischen Verhaltens sowohl von Gebäuden als auch der neuartigen solarhybriden Heiz- und Kühlsysteme voranzutreiben, wurden neue Modellierungsansätze erprobt und analysiert.

Im Sinne der voranschreitenden und forcierten Digitalisierung der Baubranche (Goger) und der Energieraumplanung hat das *CiQuSo*-Projektteam neue Ansätze der Modellierung und Optimierung untersucht und weiterentwickelt. Das energetische Verhalten einer Gebäudenachbarschaft (Quartier) wurde in einem Framework abgebildet und dieses Quartiersmodell lässt sich somit als digitaler Zwilling interpretieren. Grundsätzlich verbindet das *CiQuSo*-Team mit der Anwendung der entwickelten Methode zur Quartiersoptimierung die frühzeitige Bereitstellung von belastbaren Informationen in der Entscheidungs- und Entwurfsphase von Quartiersbauvorhaben. Quantifiziert wird das Potenzial der verstärkten Solarenergienutzung im Quartier mit dem Spezifikum von energetisch kooperierenden Gebäuden und unter Berücksichtigung von erprobten aber auch neuartigen solarhybriden H&K-Systemen. Ergebnisse der entwickelten Methode zur *CiQuSo*-Quartiersoptimierung können Eingang finden in die planerischen Grundüberlegungen einer Quartiersentwicklung mit gebäudeübergreifendem Energieaustausch.

Ersatzmodelle Gebäude

Eingangs war die Grundidee möglichst generische, vereinfachte Ersatzmodelle für viele repräsentative Gebäude im Stadtteil Itzling zu erzeugen, die das thermische Gebäudeverhalten hinsichtlich Heizwärme- und Kühlenergiebedarf in der Zeitauflösung von 15 Minuten ausreichend gut abbilden. Ausgewählte Gebäude wurden als Ein-Zonen-Modell aufgebaut und in der Gebäudesimulationsumgebung EnergyPlus abgebildet. Das Ersatzmodell wurde aus mathematisch beschriebenen Widerstand-Kapazitätsmodellen (RC) erstellt

und beinhaltet die Information zur mittleren Raumlufthtemperatur, die den definierten solar-hybriden H&K-Systemen als Regelungssignal übergeben werden. Die Ergebnisse der RC-Modellierung zeigten trotz diverser Adaptionen und Iterationsschleifen keine ausreichend hohe Genauigkeit, sodass vom CiQuSo-Projektteam letztlich diese generierten Ersatzmodelle für den CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene nicht zum Einsatz kamen.

Mit Blick auf die zentrale Rolle der Ersatzmodelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens, ist die Berechnungsqualität zum zeitlichen Verlauf der Energiebedarfsmengen und der Raumtemperaturen essentiell. Die identifizierten Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Gebäudesimulation in EnergyPlus und der vereinfachten Ersatzmodelle ergeben sich einerseits aus dem Vereinfachungsansatz selbst und andererseits durch den Versuch das komplexe Gebäudeverhalten mehrerer thermischer Zonen eines EnergyPlus Gebäudemodells auf einen Luftknoten zu aggregieren. Hier bedarf es weiterführender Untersuchungen zu unterschiedlicher Parametrisierung und Verschaltung der RC-Modellstruktur.

Ersatzmodelle zur Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens der solaren urbanen Energiesysteme

Das CiQuSo-Projektteam hat festgelegt, mit welcher Methode Ersatzmodelle zur vereinfachten Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens von solaren Heiz- und Kühlsystemen erstellt werden. Künstliche neuronale Netze (KNN) wurden zur BlackBox-Modellierung verwendet und dazu wurden geeignete Trainingsmethoden zur Erstellung der gewünschten Ersatzmodelle durchgeführt, analysiert und nachgebessert. Sehr viele Parameter beeinflussen die Güte der KNN, d.h. das virtuelle Trainieren der KNN ist ein iterativer Trial & Error-Prozess. Unterschiedlichste KNN-Architekturen und Trainingsszenarien wurden generiert und getestet. Die Trainingsdaten zur BlackBox-Erstellung sind in diesem Fall die Ergebniszeitreihen der Jahressimulationen der Simulationsumgebung TRNSYS der unterschiedlichen solaren Heiz- und Kühlsysteme. In einigen Fällen der BlackBox-Modellierung führte der KNN Ansatz zu recht guten Ergebnissen, in anderen, eher komplexeren Systemen aber nicht zum erwünschten Erfolg. Daher wurde ergänzend die Methode *Extremely Randomized Trees* angewendet, um eine verbesserte Vorhersagegüte zum energetischen Betriebsverhalten von solaren H&K-Systeme zu erzielen.

Die Ergebnisse der BlackBox-Modellierung zeigten analog zum RC-Ansatz trotz verschiedener Trainingsdaten und unterschiedlicher Methoden keine ausreichend hohe Berechnungsgenauigkeit, sodass auch hier das CiQuSo-Projektteam letztlich diese Methodik zur Erstellung von Ersatzmodellen für den CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene als ungeeignet einstufte.

Schlussfolgernd lässt sich grundsätzlich für die Wahl des Blackbox-Modellansatzes Nachfolgendes formulieren: *Je größer Sparsity und Varianz der Outputgröße ist, umso mehr sind die Extremely Randomized Trees gegenüber den neuronalen Netzen zu bevorzugen. Extremely Randomized Trees benötigen wesentlich mehr Speicherplatz (etwa Faktor 300), sind aber im Training deutlich schneller (etwa Faktor 4) als neuronale Netze. In der Auswertung*

benötigen die Trees etwa doppelt so lang wie die Netze, wobei beide Zeiten mit <0.8s als akzeptabel angesehen wurden.

Grundsätzlich steht die Methodik der BlackBox-Modellierung mit Hilfe von KNN und/oder Extremely Randomized Trees zur Abbildung des energetischen Betriebsverhaltens von solaren Heiz- und Kühlsystemen am Anfang. In diesem Forschungsfeld steht die Community am Anfang und es besteht Forschungsbedarf, um diese Methoden im Energiebereich anzuwenden oder sogar zu etablieren.

CiQuSo-Optimierungsansatz auf Quartiersebene

Auf Grundlage der nicht ausreichenden Ergebnistüte der erstellten Ersatzmodelle wurde alternativ auf die Berechnungszeitreihen in 15-minütiger Auflösung der jeweiligen Basismodelle in den Simulationsumgebungen EnergyPlus (Gebäude) und TRNSYS (SH&K-Systeme) zurückgegriffen. Konkret wurden die Simulationszeitreihen in einer eigenen SVN-Datenbank angelegt, d.h. die Datenbank enthält digitale Zwillinge der Gebäude und der solaren H&K-Systeme im Quartier, die das jeweilige energetische Gebäude- bzw. Betriebsverhalten abbilden. Der Quartiersoptimierer identifiziert für eine auszuwählende Gebäudenachbarschaft jene solaren H&K-Systemlösungen, die bezüglich der festgelegten Optimierungszielgröße die beste Lösung darstellt.

Im Rahmen der Projektlaufzeit wurde die **Leistungsfähigkeit** und die **Funktionalität** des entwickelten CiQuSo-Quartiersoptimierers auf Basis eines konkreten Untersuchungsfalls bestehend aus sechs verschiedenen Gebäuden und zahlreichen solaren H&K-Systemlösungen grundsätzlich nachgewiesen. Je nach Optimierungszielgröße wurden den sechs ausgewählten Gebäuden unterschiedliche solare H&K-Systemlösungen als beste Lösung zugeordnet. Für weitere Untersuchungsfälle steht das CiQuSo-Framework zur Verfügung, die **Datenbank ist grundsätzlich erweiterbar**, um weitere Ergebniszeitreihen sowohl für die Abbildung des energetischen Gebäude- als auch Betriebsverhaltens weiterer interessanter solarer H&K-Systeme einzubinden. Je nach Anzahl der möglichen Kombinationen aus Gebäude und solarer H&K-Systeme wird der entwickelte CiQuSo-Quartiersoptimierer an die Grenzen der sinnvollen Rechenzeiten gelangen. Einen ganzen Stadtteil bestehend aus mehreren Hundert Gebäuden mit dem entwickelten Framework zu optimieren, bedarf großer Rechenleistung und -zeit.

Die Analyse und Auswertung der Optimierungsergebnisse zu einer beispielhaften Gebäudenachbarschaft aus dem Stadtteil Itzling zeigt das theoretische Potenzial einer Symbiose aus neuartigen solarhybriden Systemlösungen zum Heizen und Kühlen und der Nutzung des gebäudeübergreifenden Energieaustausches. Signifikante Reduktionspotenziale hinsichtlich CO₂-Einsparungen werden in der Regel mit einem wirtschaftlichen Mehraufwand erreicht. In wenigen Ausnahmen können geringere Annuitäten im Vergleich zur Referenzsystemlösung bei hohen Reduktionspotenzialen auftreten. Insbesondere die definierten und modellierten neuartigen solarhybriden Systemlösungen weisen hinsichtlich der gewählten Zielparameter eine gute Performance auf.

BIG Solar Fallstudie

Mit der durchgeführten Fallstudie zu einer großtechnischen solaren Wärmeversorgung der Itzlinger Goethesiedlung liegen erste Auslegungsgrößen der technischen Komponenten und eine Abschätzung zum energetischen Betriebsverhalten der Anlage vor. Ein Dialog zwischen den Salzburger Interessensvertretern und dem Projektteam wurde dazu geführt. Weiterführend bietet das technische Konzept der Langzeitspeicherung der Wärme die Möglichkeit zur potentiellen Integration vorhandener (günstiger) Abwärmequellen. Des Weiteren wäre eine flexible, strompreisgetriebene Betriebsführung von KWK-Anlagen möglich. Darüber hinaus sind auch Power-to-heat-Konzepte potentiell integrierbar.

6 Ausblick und Empfehlungen

Prinzipiell konnte die Funktionalität des entwickelten CiQuSo-Frameworks nachgewiesen werden. Für nachgelagerte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten benennt das Projektteam nachfolgende Schwerpunkte:

- Für eine Weiterentwicklung in Richtung CiQuSo-Framework 2.0 sollten vereinfachte mathematisch-physikalisch formulierte Modelle zur Abbildung des thermischen Gebäudeverhaltens und des energetischen Betriebsverhaltens der Gebäudetechniksysteme aufgebaut werden. Die generelle Herausforderung liegt darin einen ausgewogenen Kompromiss zu finden zwischen akzeptabler Rechenzeit und ausreichender Flexibilität hinsichtlich Systemkonfiguration und Berechnungsgüte der vereinfachten Modelle.
- Um beliebige Stadtquartiere mit mehreren Hunderten Gebäuden unterschiedlicher Nutzungstypen modellieren und durchrechnen zu können, bedarf es der Simplifizierung der Gebäudemodelle. Ziel der Entwicklungen sollte es sein, bei Angabe von wenigen Gebäudeparametern (beispielsweise Bruttogeschossfläche, konditionierte Nutzfläche, charakteristische Länge, Glasflächenanteile in der Fassade, gesamter Wärmedurchgangskoeffizient der Gebäudeaußenhülle U_{Ges} -Wert usw.), automatisiert einfache und repräsentative Gebäudemodelle in ausreichender Güte zur Abbildung der thermischen Gebäudeperformance zu erstellen bzw. aus einer Datenbank auszuwählen. Weitere Untersuchungen zur Parametrisierung und Konfiguration der Widerstand-Kapazitätsmodellen und anderer Ansätze sind notwendig.
- Das entwickelte CiQuSo-Framework fokussiert die lokale direkte Nutzung von Solarstrom und solarer Wärme durch die entsprechenden Technologien innerhalb des Quartieres. Eine Erweiterung in Richtung anderer Energiequellen und Technologien erscheint sinnvoll, beispielsweise können urbane Abwärmequellen mit aufgenommen werden oder andere Technologien wie das Blockheizkraftwerk modelliert werden.
- Im Projekt CiQuSo wurden technische Systemlösungen zur Wärme-, Kälte- und Stromversorgung einzelner Gebäude modelliert und für die energetisch kooperierende Gebäudenachbarschaft im Stadtquartier optimiert. Die solare Wärme- und Stromversorgung von ganzen Siedlungen durch Großanlagen der Solartechnologien sollten zukünftig über simplifizierte Modelle in das CiQuSo-Framework integriert werden.
- Um die CiQuSo-Methodik und Berechnungsergebnisse der Quartiersoptimierung zu kommunizieren, wurde ein Prototyp einer Webbasierten GIS-Visualisierungsapplikation erstellt. Um eine intensive Verwertung der entwickelten CiQuSo-Methode voranzutreiben, ist einerseits die Verbesserung der simplifizierten Gebäude- und solaren H&K-Systeme und andererseits die Umsetzung einer professionellen Webbasierten GIS-Visualisierungsapplikation zielführend. Für alle Quartiere in Österreich mit

geeigneten verfügbaren GIS-Daten ließe sich die weiterentwickelte CiQuSo-Quartiersoptimierung durchführen.

Zur technischen und wirtschaftlichen Umsetzung von Quartieren mit verstärkter Nutzung neuartiger solarhybrider Heiz- und Kühlsysteme und gebäudeübergreifendem Energieaustausch bedarf es definitiv finanziell vielversprechende Geschäfts- und Finanzierungsmodelle. Neue Unternehmensarten müssen entwickelt werden, die solche Energieversorgungssysteme technisch umsetzen und wirtschaftlich betreiben können bzw. die auch in die notwendigen Energieinfrastruktursysteme investieren. Wer sich dieser Aufgabe annimmt, ist derzeit nicht zu erkennen. Dieses Dilemma ist bereits erkannt und in zahlreichen österreichischen Forschungsprojekten werden vielversprechende Geschäfts- und Finanzierungsmodelle systematisch entwickelt und untersucht.

Im Strombereich wurden mit der EIWOG-Novelle 2017 rechtliche Rahmenbedingungen für PV-Gemeinschaftsanlagen geschaffen, womit Solarstrom aus solchen Anlagen nach unterschiedlichen Modellen in die einzelnen Wohnungen geliefert werden kann. Jetzt werden hohe Eigennutzungsgrade möglich, die für den wirtschaftlichen Einsatz von PV unverzichtbar sind. Die Umsetzung lässt allerdings noch auf sich warten, da noch energie- und wohnrechtliche sowie Unsicherheiten hinsichtlich der komplexen Vertragsgestaltung bestehen. Dies sind Anzeichen dafür, dass regulative Barrieren abgebaut werden können, um für die Umsetzung ganzer Quartiere mit verstärkter Nutzung urbaner Solartechniken zu stimulieren.

Die aktuelle 5. Ausschreibung des nationalen Programms Stadt der Zukunft fokussiert das Themenfeld ‚Auf dem Weg zu Plus-Energie-Quartieren‘ und verbindet mit der Förderung dieser Quartiere die Umsetzung von Demonstrationsprojekte. Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der nationalen Förderung Umsetzungsvorhaben in Richtung Plus-Energie-Quartiere auch mit solarhybriden Technologielösungen und den dazugehörigen Infrastrukturen zum gebäudeübergreifenden Energieaustausch vorbereitet werden und in die Demonstrationsphase gehen. Methodische Ansätze und ausgewählte grundlegende Ergebnisse des durchgeführten CiQuSo-Projektes bilden eine erste Grundlage und können in diesen Projekten weiterentwickelt werden. Sicherlich wird dazu der klassische Planungsprozess der Baubranche, der sich traditioneller Weise der Planung des einzelnen Gebäudes widmet, aufgebrochen. Für eine ganzheitliche Quartiersplanung sind neue Methoden und integrale Ansätze notwendig und zielführend.

7 Verzeichnisse

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ausschnitt aus dem Stadtteil Itzling mit Widmung (Quelle: AIT).....	20
Abbildung 2: Luftbild – Ausschnitt aus dem Stadtteil Itzling mit bezifferten Gebäuden bzw. Siedlungen (Quelle: https://maps.stadt-salzburg.at)	21
Abbildung 3: Workflow zur Berechnung des optimierten Energieaustausches auf Quartiersebene.....	28
Abbildung 4: CiQuSo-Framework (Optimierung und Energieaustausch- grau, GIS-Visualisierung (Quelle: AIT).....	29
Abbildung 5: Schema des solarhybriden Systemdesigns (Quelle UIBK).....	32
Abbildung 6: Vergleich RC-Modell vs. EnergyPlus Modell für ein gutes (links) bzw. schlechtes (rechts) Kalibrierungsergebnis; Legende: Die violette Kurve entspricht der Raumtemperatur des RC-Modells, die türkise Kurve entspricht der durchschnittlichen Raumlufthtemperatur von EnergyPlus, die graue Kurve entspricht der Bandbreite der Raumlufthtemperatur in EnergyPlus und die gelbe Kurve repräsentiert jene Zeitpunkte, wo das RC-Modell außerhalb der Bandbreite liegt dar.....	37
Abbildung 7: Ein Vergleich für Qauxel[kW] in einer typischen Sommerwoche links: Extremely Randomized Trees, rechts: ein neuronales Netz.	39
Abbildung 8: Die Vorhersage für Qauxtherm[kW] funktioniert mit den Extremely Randomized Trees (links) relativ gut. Sehr kleine Werte könnten noch bewusst durch 0 ersetzt werden. Das neuronale Netz (rechts) funktioniert hier nicht zufriedenstellend.....	39
Abbildung 9: Schematisches Energieflussbild mit allen verfügbaren Komponenten aus welchen die H&K-Systeme für alle sechs Gebäude zusammengesetzt werden können.	41
Abbildung 10: Schematisches Energieflussbild des Modell-Quartiers für alle sechs Gebäude miteinander gekoppelt mit dem Fernwärmenetz bzw. dem Stromnetz.	41
Abbildung 11: Energiebilanz für die Referenz H&K-Systeme für alle sechs Gebäude.....	43
Abbildung 12: Energiebilanz für die solarelektrischen H&K-Systeme für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).....	43
Abbildung 13: Energiebilanz für die solarthermischen H&K-Systeme für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).....	44
Abbildung 14: Energiebilanz für die solarhybriden H&K-Systeme für alle sechs Gebäude (Großformat siehe Anhang).....	44
Abbildung 15: Verwendete CO ₂ -Faktoren nach OIB-RL6 (2015).....	46
Abbildung 16: CO ₂ -Emissionen für rein elektrische H&K-Systeme mit den zwei möglichen CO ₂ -Faktoren für Strom: 1) Jahresdurchschnittswert nach OIB-RL6 (2015) oder 2) Monatsdurchschnittswerte, welche als gewichteten Jahresdurchschnittswert ebenfalls den Wert der OIB-RL6 ergeben.....	46
Abbildung 17: Einfluss der Einspeisung von Solarthermie-Überschusswärme in das Fernwärmenetz auf die Wirtschaftlichkeit am Beispiel des Bürogebäudes.....	47

Abbildung 18: Gesamtannuität als ‚CostRatio‘ über die anfallenden CO ₂ -Emissionen für alle Systemvarianten (große Symbole auf der CR=1 Linie entsprechen dem jeweiligen Referenzgebäude).....	48
Abbildung 19 Salzburg Itzling - Goethesiedlung und Heizkraftwerk (HKW) Nord (google.maps)	49
Abbildung 20 Flachdach des Wohngebäudes Goethestraße 15, mit exemplarischer Solarkollektorbelegung (gelb), wobei gesetzliche Mindestabstände zu Dachaufbauten und notwendige Servicewege sind berücksichtigt.....	49
Abbildung 21: Erklärung Lastverschiebepotential auf Quartiersebene	52
Abbildung 22: Beispielhaftes Lastverschiebepotential auf Quartiersebene (zeitlicher Verlauf und Jahressumme).....	52
Abbildung 23: Screenshot der GIS-Visualisierung und den fünf auswählbaren Gebäuden, Das gelbe Gebäude (ID_47) ist ausgewählt und das Menu zeigt die hinterlegten Daten und Informationen zu diesem Gebäude.....	54
Abbildung 24: Front-End der GIS- Visualisierungswebanwendung als Beispiel "Systemvergleich"	55
Abbildung 25: Gebäude- und Systemauswahl für Gebäudequartiersvergleich.....	56
Abbildung 26: Ergebnis der Netzberechnung (gezoomt)	56
Abbildung 27: Optimierungsergebnisse für die Zielparameter a) geringste CO ₂ Emissionen, b) geringster Primärenergiebedarf (nicht erneuerbarer Anteil), c) geringste Stromimporte und d) geringste Wärmeimporte. Alle Werte sind jeweils vollkommen unabhängig voneinander als jeweiliger potentieller Bestwert zu betrachten!.....	59
Abbildung 28: Energiebilanzen der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO ₂ Emissionen (CO ₂ -Faktor Strom – Jahresdurchschnittswert) für das Quartier. Gebäude von links nach rechts: Hotel (002), Büro (001), IQ-Sbg (011), MFH 1999 (005), Salzachpark (008), Goethestr. 15 (010).....	59
Abbildung 29: Gesamtannuität als ‚CostRatio‘ über die anfallenden CO ₂ -Emissionen der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO ₂ Emissionen (CO ₂ -Faktor Strom – Jahresdurchschnittswerte) für das Quartier.	60
Abbildung 30: Gesamtannuitäten (mit/ohne Berücksichtigung der Fernwärmeeinspeisung) der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO ₂ Emissionen (CO ₂ -Faktor Strom – Jahresdurchschnittswerte) für das Quartier.	60
Abbildung 31: CO ₂ -Emissionen (mit Berücksichtigung des monatlichen bzw. jährlichen CO ₂ -Faktors für den Strom) der ausgewählten Gebäude und Versorgungssysteme für das Optimierungsergebnis für den Zielparameter geringste CO ₂ -Emissionen für das Quartier. ...	61

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Referenzgebäude für den Stadtteil Itzling	33
Tabelle 2: Zusammenfassung Ergebnisse RC-Modell vs. EnergyPlus.....	38
Tabelle 3: Daten und Energiekennzahlen der ausgewählten Gebäude:.....	40
Tabelle 4 Solarelektrische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten...	40
Tabelle 5 Bedarf, berechneter Solarertrag, Wärmemenge in/aus Saisonspeicher und solare Deckung	50
Tabelle 6: Ausgewählte Gebäudetypen für Quartiersoptimierung und ihre spezifischen Energiebedarfswerte	58
Tabelle 7 Referenzsysteme der H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten	73
Tabelle 8 Solarthermische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten ..	74
Tabelle 9 Solarelektrische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten...	75
Tabelle 10 Solarhybride Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten	76

7.3 Literaturverzeichnis

- Blindenbacher, T., Herbst, N., n.d. 2000-Watt-Gesellschaft, <http://www.2000watt.ch/> (Zugriff 4.6.2016).
- Catal, J., 2017. Energetische Optimierung eines virtuellen Stadtquartiers anhand vereinfachter mathematischer Modellierung der Gebäude und Energiesysteme, FH Technikum Wien 2017, Wien.
- Droege P., (ed.), 2009, 100% Renewable. Energy Autonomy in Action. Earthscan, London, UK & Sterling, VA, pp. 251-262
- ENERGIE; ENERGIE Forschungs- und Innovationsstrategie 2017
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/e2050/publikationen/energie-forschungs-innovationsstrategie.php>
- Erhorn-Klutig H., Jank R. et al., 2011, Energetische Quartiersplanung. Methoden-Technologien-Praxisbeispiele, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Everding, D., (Hrsg.), 2007, Solarer Städtebau. W. Kohlhammer Verlag GmbH, Stuttgart, pp. 14-17.
- Fonseca, J.A., Nguyen, T.-A., Schlueter, A., Marechal, F., 2016. City Energy Analyst (CEA): Integrated framework for analysis and optimization of building energy systems in neighborhoods and city districts. Energy Build. 113, 202–226.
doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.055
- Goger G., Piskernik M., Urban H.; Studie: Potenziale der Digitalisierung im Bauwesen, Berichte aus Energie- und Umweltforschung Schriftenreihe 2/2018, Herausgeber: BMVIT, WKO; Deutsch, 151 Seiten
- Kreulitsch, D., 2016. Untersuchung vereinfachter Gebäudemodelle für Optimierungszwecke auf Quartiersebene, HTW 2016, Berlin.
- Robinson, D., Haldi, F., 2009. CITYSIM: Comprehensive Micro-Simulation of Resource Flows for Sustainable Urban Planning. IBPSA 2009 - Int. Build. Perform. Simul. Assoc. 2009.
- RP2017-2022; Regierungsprogramm 2017–2022: Zusammen. Für unser Österreich.
https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/569203/Regierungsprogramm_2017%e2%80%932022.pdf/b2fe3f65-5a04-47b6-913d-2fe512ff4ce6
- Steinbeis-Europa-Zentrum der Steinbeis Innovation gGmbH, 2015. OptEEemAL - <https://www.opteemal-project.eu/> (Zugriff 4.6.2016).
- Vallenti R., Solare Optimierung im Städtebau – eine Fragwürdige Strategie? In: Greenbuilding, 06/2011, pp. 23-29

VDI, 6020: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation
Gebäudesimulation. May 2001.

Voss K., Musall E., „Nullenergie Gebäude“ Internationale Projekte zum klimaneutralen
Wohnen und Arbeiten, Verlag DETAIL Green Books, ISBN: 978-920034-50-8, 2011

8 Anhang

Legende zu den Tabellen:

ST-Kollektor... Solarthermischer Kollektor, PV...Photovoltaik, FW...Fernwärme,
WP...Wärmepumpe, AKM...Absorptionskältemaschine, KKM...Kompressionskältemaschine,
Pu-Sp...Pufferspeicher, KW-Sp...Kaltwasserspeicher

Tabelle 7 Referenzsysteme der H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten

System-Nummer	Gebäude	ST-Kollektor [m ²]	PV [kWp]	FW [kW]	WP [kW]	AKM [kW]	KKM [kW]	Pu-Sp [m ³]	KW-Sp [m ³]
000_002_002_REF_HOT	Hotel	0	0	100	0	0	20	1,2	1
000_010_009_REF_G15	G 15	0	0	350	0	0	0	8,2	0
000_011_009_REF_Q-Geb	Q-Geb	0	0	600	0	0	450	8,2	4
000_005_008_REF_MFH H	MFH H	0	0	100	0	0	0	2,3	0
000_001_000_REF_Büro	Büro	0	0	80	0	0	60	0,0	1
000_008_010_REF_MFH	MFH Salz	0	0	240	0	0	0	3,7	0

Tabelle 8 Solarthermische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten

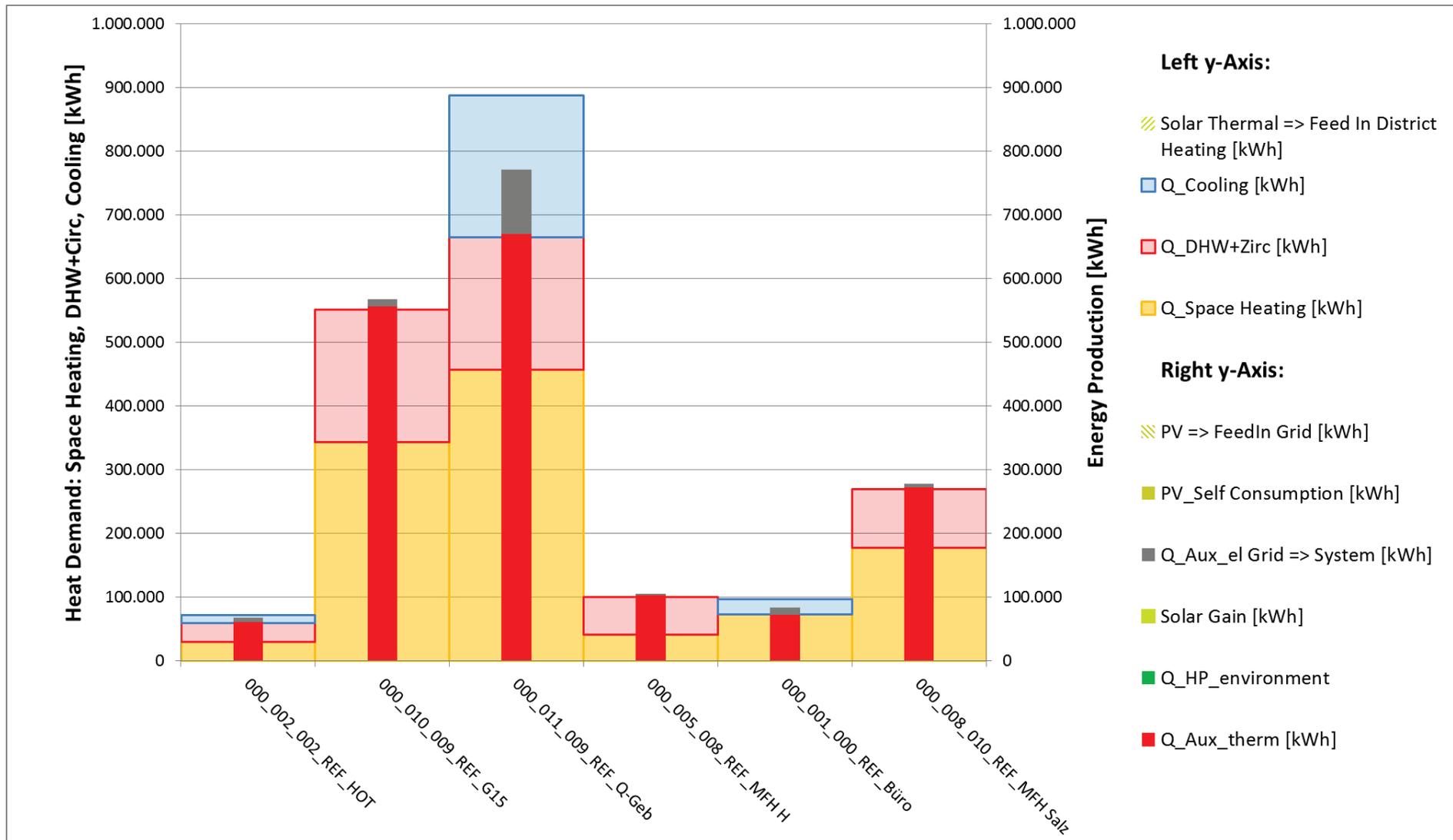
System-Nummer	Gebäude	ST-Kollektor [m2]	PV [kWp]	FW [kW]	WP [kW]	AKM [kW]	KKM [kW]	Pu-Sp [m3]	KW-Sp [m3]
010_002_002_000	HOT	20	0	50	0	20	20	1	2
011_002_002_000	HOT	30	0	50	0	20	20	1	2
012_002_002_000	HOT	60	0	50	0	20	20	3	2
013_002_002_000	HOT	100	0	50	0	20	20	1	2
014_002_002_000	HOT	100	0	50	0	20	20	5	2
023_002_002_000	HOT	20	0	50	0	30	0	1	1
024_002_002_000	HOT	30	0	50	0	30	0	1	1
025_002_002_000	HOT	60	0	50	0	30	0	3	1
026_002_002_000	HOT	100	0	50	0	30	0	1	1
027_002_002_000	HOT	100	0	50	0	30	0	5	1
028_001_000_000	Büro	120	0	80	0	40	80	6	3
029_001_000_000	Büro	120	0	80	0	40	80	1	3
030_001_000_000	Büro	500	0	80	0	40	80	2	3
031_001_000_000	Büro	300	0	80	0	100	0	15	0
032_001_000_000	Büro	300	0	80	0	100	0	2	0
033_001_000_000	Büro	500	0	80	0	100	0	2	0
034_011_009_000	Q-Geb	900	0	450	0	300	650	45	8
035_011_009_000	Q-Geb	900	0	450	0	300	650	5	8
036_011_009_000	Q-Geb	1500	0	450	0	300	650	5	8
037_011_009_000	Q-Geb	900	0	450	0	800	0	45	0
038_011_009_000	Q-Geb	900	0	450	0	800	0	5	0
039_011_009_000	Q-Geb	1500	0	450	0	800	0	5	0
059_005_008_000	MFH H	50	0	50	0	0	0	2,5	0
060_005_008_000	MFH H	50	0	50	0	0	0	5	0
061_005_008_000	MFH H	100	0	50	0	0	0	10	0
062_008_010_000	MFH Salz	100	0	100	0	0	0	5	0
063_008_010_000	MFH Salz	100	0	100	0	0	0	10	0
064_008_010_000	MFH Salz	200	0	100	0	0	0	10	0
065_008_010_000	MFH Salz	200	0	100	0	0	0	20	0
066_010_009_000	G15	100	0	200	0	0	0	10	0
067_010_009_000	G15	150	0	200	0	0	0	10	0
068_010_009_000	G15	200	0	200	0	0	0	10	0
069_010_009_000	G15	200	0	200	0	0	0	20	0
070_010_009_000	G15	400	0	200	0	0	0	20	0
071_010_009_000	G15	400	0	200	0	0	0	40	0
072_005_008_000	MFH H	20	0	50	20	0	0	1	0
073_005_008_000	MFH H	40	0	50	20	0	0	2	0
074_005_008_000	MFH H	60	0	50	20	0	0	3	0
075_008_010_000	MFH Salz	100	0	100	150	0	0	5	0
076_008_010_000	MFH Salz	140	0	100	150	0	0	7	0
077_008_010_000	MFH Salz	200	0	100	150	0	0	10	0
078_008_010_000	MFH Salz	300	0	100	150	0	0	15	0
079_010_009_000	G15	200	0	200	200	0	0	10	0
080_010_009_000	G15	240	0	200	200	0	0	12	0
081_010_009_000	G15	300	0	200	200	0	0	15	0
082_010_009_000	G15	360	0	200	200	0	0	18	0
010_002_002_000	HOT	20	0	50	0	20	20	1	2

Tabelle 9 Solarelektrische H&K-Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten

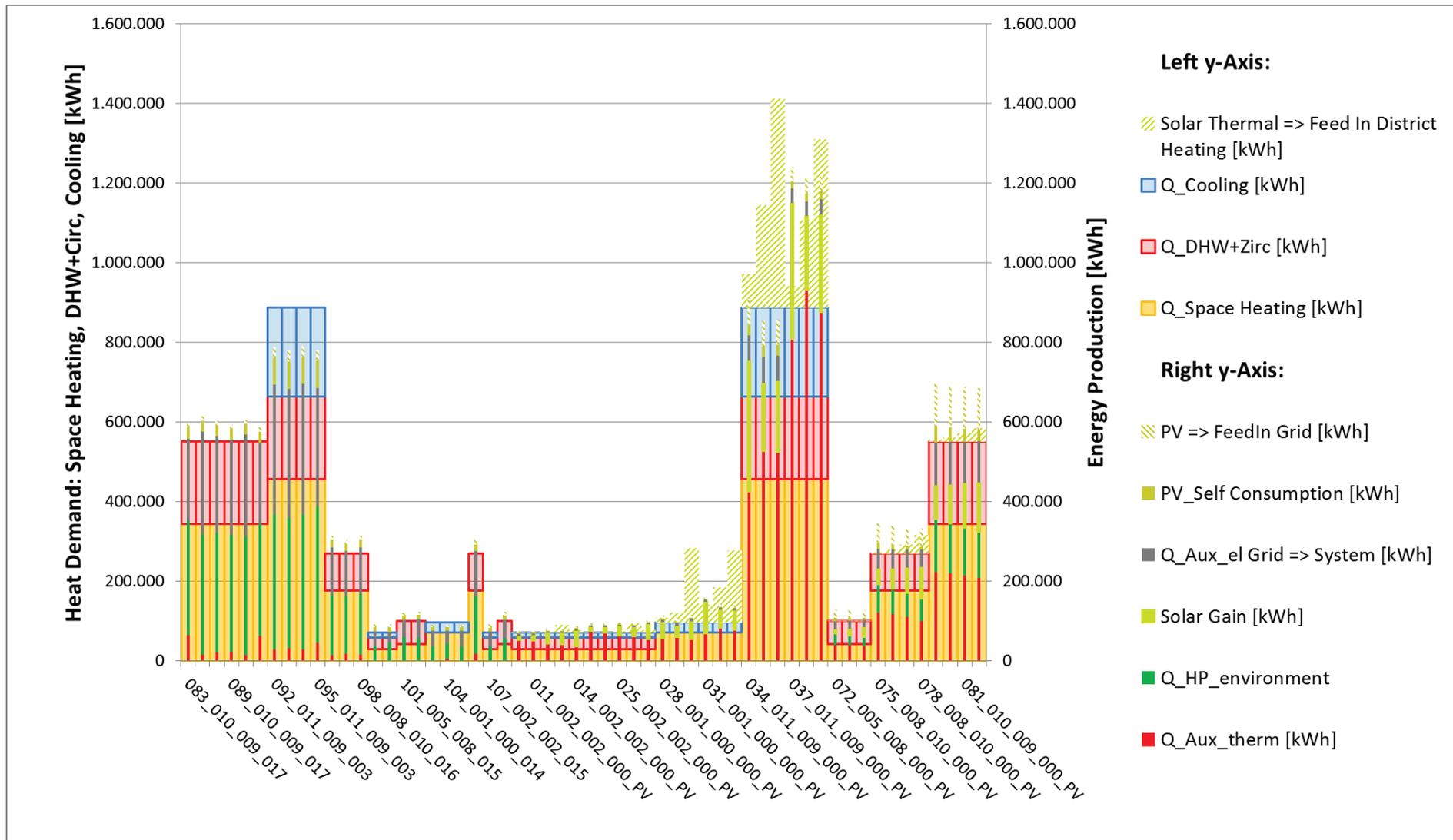
System-Nummer	Gebäude	ST-Kollektor [m2]	PV [kWp]	FW [kW]	WP [kW]	AKM [kW]	KKM [kW]	Pu-Sp [m3]	KW-Sp [m3]
083_010_009_017	G15	0	40	200	100	0	0	10	0
085_010_009_017	G15	0	40	200	300	0	0	10	0
086_010_009_017	G15	0	40	200	190	0	0	10	0
089_010_009_017	G15	0	40	200	190	0	0	5	0
090_010_009_017	G15	0	40	200	300	0	0	5	0
091_010_009_017	G15	0	40	200	100	0	0	5	0
092_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	10	4
093_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	5	4
094_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	450	0	450	10	4
095_011_009_003	Q-Geb	0	100	450	240	0	240	10	3
096_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	120	0	0	10	0
097_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	5	0
098_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	10	0
099_002_002_015	HOT	0	20	50	90	0	20	5	1
100_002_002_015	HOT	0	20	50	55	0	20	5	1
101_005_008_015	MFH H	0	20	50	65	0	0	5	0
102_005_008_015	MFH H	0	20	50	90	0	0	2	0
103_001_000_014	Büro	0	15	80	100	0	60	5	1
104_001_000_014	Büro	0	15	80	60	0	60	5	1
105_001_000_014	Büro	0	15	80	100	0	60	1	1
106_008_010_016	MFH Salz	0	30	100	90	0	0	5	0
107_002_002_015	HOT	0	20	50	90	0	20	5	1
108_005_008_015	MFH H	0	20	50	90	0	0	2	0
094_011_009_003_noPV	Q-Geb	0	0	450	450	0	450	10	4
103_001_000_014_noPV	Büro	0	0	80	100	0	60	5	1
106_008_010_016_noPV	MFH Salz	0	0	100	90	0	0	5	0
107_002_002_015_noPV	HOT	0	0	50	90	0	20	5	1
108_005_008_015_noPV	MFH H	0	0	50	90	0	0	2	0

Tabelle 10 Solarhybride Systemkonfigurationen für die simulierten Gebäudearten

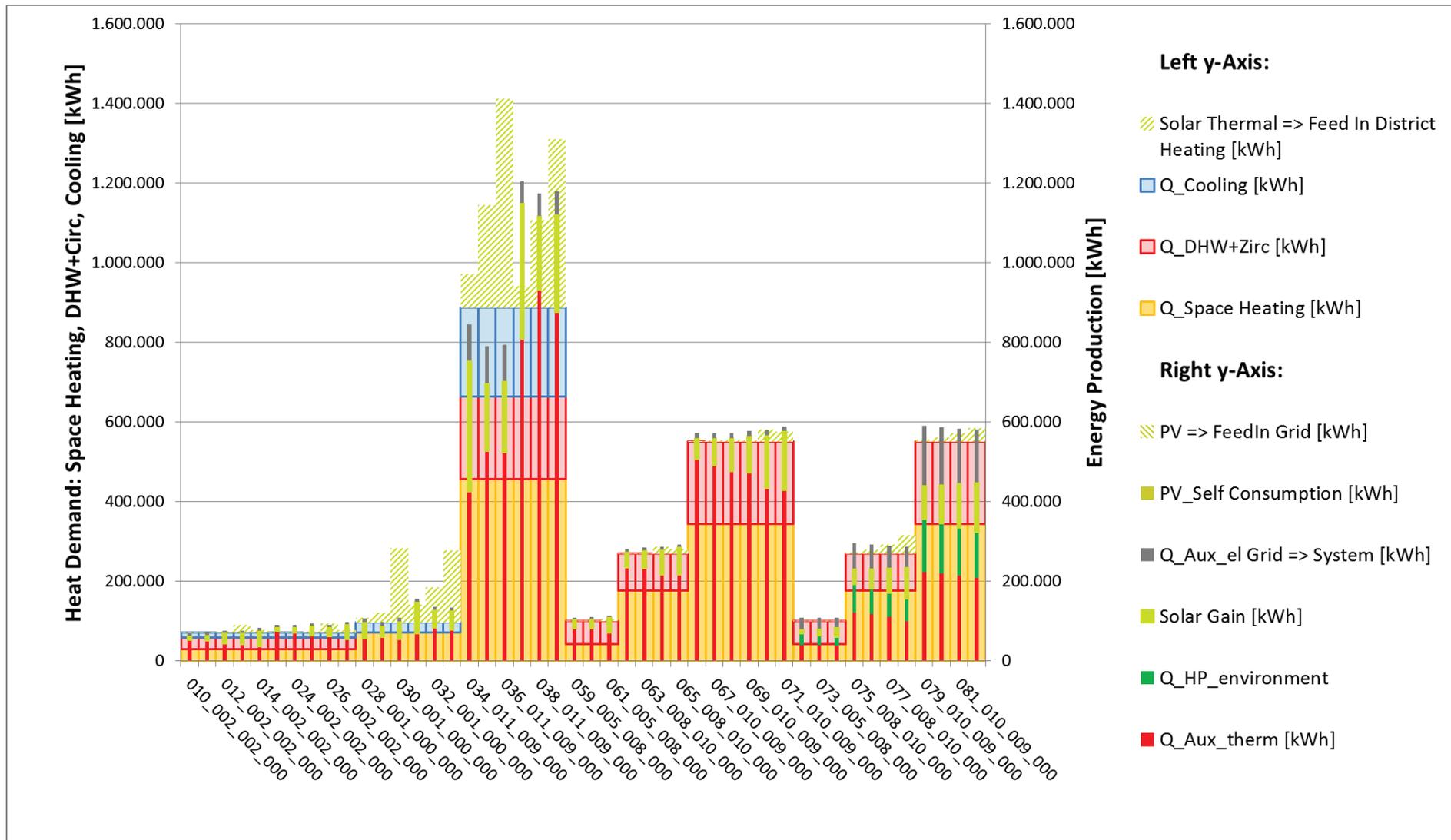
System-Nummer	Gebäude	ST-Kollektor [m2]	PV [kWp]	FW [kW]	WP [kW]	AKM [kW]	KKM [kW]	Pu-Sp [m3]	KW-Sp [m3]
010_002_002_000_PV	HOT	20	6,81	50	0	20	20	1	2
011_002_002_000_PV	HOT	30	6,66	50	0	20	20	1	2
012_002_002_000_PV	HOT	60	6,27	50	0	20	20	3	2
013_002_002_000_PV	HOT	100	6,1	50	0	20	20	1	2
014_002_002_000_PV	HOT	100	6	50	0	20	20	5	2
023_002_002_000_PV	HOT	20	5,87	50	0	30	0	1	1
024_002_002_000_PV	HOT	30	5,84	50	0	30	0	1	1
025_002_002_000_PV	HOT	60	5,6	50	0	30	0	3	1
026_002_002_000_PV	HOT	100	5,7	50	0	30	0	1	1
027_002_002_000_PV	HOT	100	5,55	50	0	30	0	5	1
028_001_000_000_PV	Büro	120	10,41	80	0	40	80	6	3
029_001_000_000_PV	Büro	120	10,55	80	0	40	80	1	3
030_001_000_000_PV	Büro	500	9,51	80	0	40	80	2	3
031_001_000_000_PV	Büro	300	8,24	80	0	100	0	15	0
032_001_000_000_PV	Büro	300	7,68	80	0	100	0	2	0
033_001_000_000_PV	Büro	500	7,99	80	0	100	0	2	0
034_011_009_000_PV	Q-Geb	900	95,51	450	0	300	650	45	8
035_011_009_000_PV	Q-Geb	900	96,22	450	0	300	650	5	8
036_011_009_000_PV	Q-Geb	1500	95,65	450	0	300	650	5	8
037_011_009_000_PV	Q-Geb	900	57,72	450	0	800	0	45	0
038_011_009_000_PV	Q-Geb	900	60,29	450	0	800	0	5	0
039_011_009_000_PV	Q-Geb	1500	59,83	450	0	800	0	5	0
072_005_008_000_PV	MFH H	20	31,28	50	20	0	0	1	0
073_005_008_000_PV	MFH H	40	27,91	50	20	0	0	2	0
074_005_008_000_PV	MFH H	60	25,22	50	20	0	0	3	0
075_008_010_000_PV	MFH Salz	100	66,7	100	150	0	0	5	0
076_008_010_000_PV	MFH Salz	140	61,52	100	150	0	0	7	0
077_008_010_000_PV	MFH Salz	200	57,43	100	150	0	0	10	0
078_008_010_000_PV	MFH Salz	300	53,82	100	150	0	0	15	0
079_010_009_000_PV	G15	200	156,19	200	200	0	0	10	0
080_010_009_000_PV	G15	240	150,12	200	200	0	0	12	0
081_010_009_000_PV	G15	300	143,33	200	200	0	0	15	0
082_010_009_000_PV	G15	360	138,5	200	200	0	0	18	0



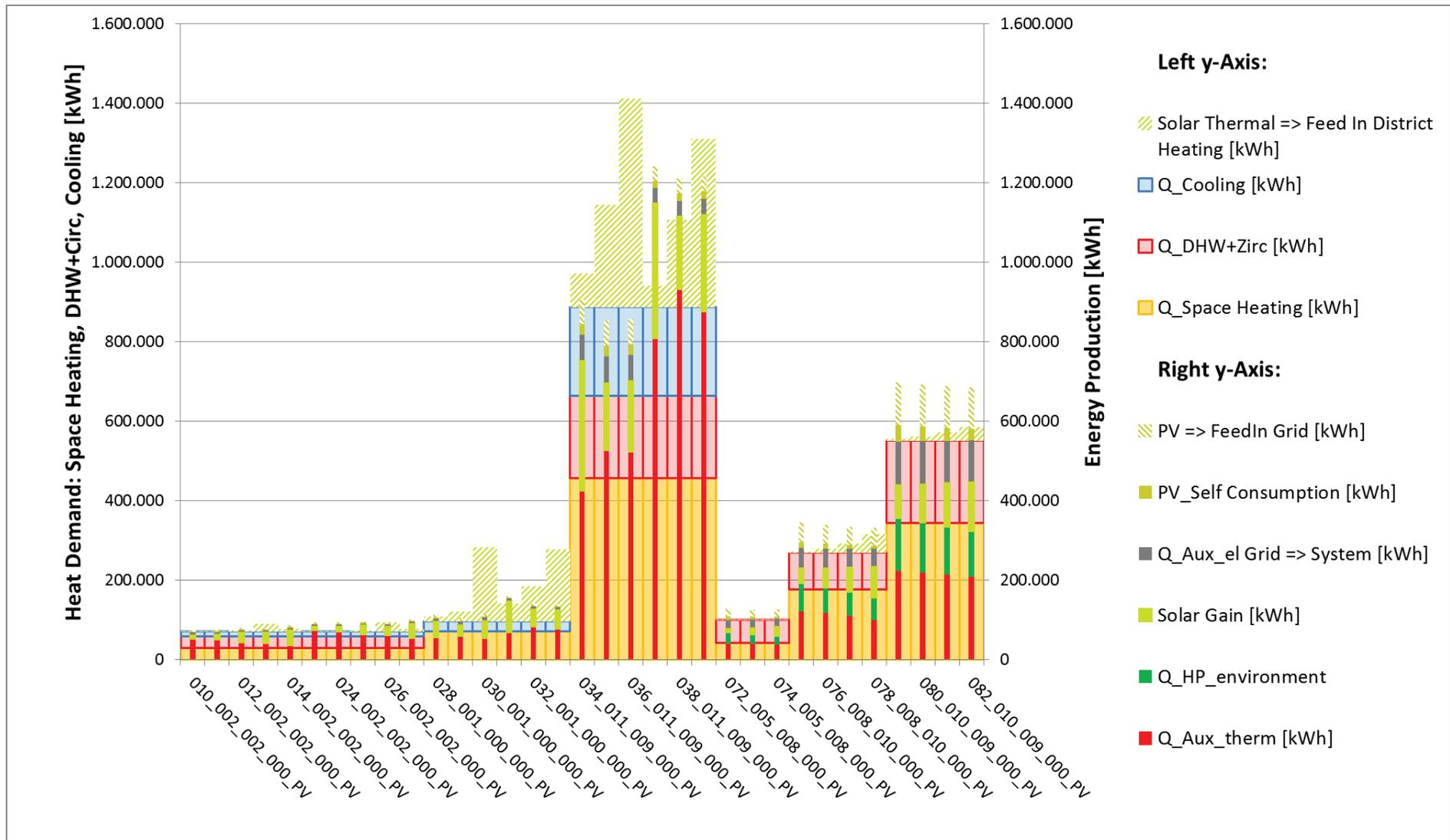
Energiebilanz für die **Referenz H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude.



Energiebilanz für die **solarelektrischen H&K-Systeme** für alle sechs Gebäude



Energiebilanz für die solarthermischen H&K-Systeme für alle sechs Gebäude



Energiebilanz für die solarhybriden H&K-Systeme für alle sechs Gebäude

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a parallelogram, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
bmvit.gv.at