

ENERGYSIMCITY: MODELLIERUNG URBANER ENERGIESYSTEME

Gerald SCHWEIGER¹, Thomas MACH²,
Peter NAGELER², Richard HEIMRATH², Hermann SCHRANZHOFER²,
Daniel BRANDL², Christian FINK¹, Ingo LEUSBROCK¹

¹ AEE INTEC, 8200 Gleisdorf, g.schweiger@aee.at

² Institut für Wärmetechnik, Technische Universität Graz, 8010 Graz.

Kurzfassung:

Unsere Städte sind zentrale Hotspots für eine nachhaltige Energiewende. Diese enthält nicht nur einen Paradigmenwechsel von „Angebot folgt Nachfrage“ zu „Nachfrage folgt Angebot“, sondern erhöht die Komplexität des Gesamtsystems durch die Integration von dezentralen und zentralen Erzeugern, Kurz- und Langzeitspeichern, sowie durch die Kopplung verschiedener Sektoren. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die verfügbare Energie aus volatilen Quellen mit der Nachfrage örtlich, zeitlich und quantitativ abzustimmen. Dies erhöht folglich auch die Komplexität und die Anforderungen an Simulations- und Planungstools. Das Research Studio Austria „EnergySimCity“ widmet sich seit dem Jahr 2014 diesen Herausforderungen durch Entwicklung einer modularen Plattform zur Planung und Optimierung urbaner Energiesysteme.

Keywords:

Modellierung, Urbane Energiesysteme, Co-Simulation, Energiewende, Wärmewende

1 Einleitung

Unsere Städte sind im Wandel: der Anteil der Menschen, die weltweit in urbanen Gebieten leben, wird laut aktuellen Prognosen von 54% im Jahr 2014 auf 66% im Jahr 2050 steigen [1]. Städte sind demnach der zentrale Hotspot wenn es um die Lösung zukünftiger Energieprobleme geht. Konzepte für zukünftige, nachhaltige Energiesysteme sind großteils durch eine radikale Änderung des gesamten Systems und damit auch dessen Planung und Betrieb gekennzeichnet: Die Substitution einer flexibel regelbaren Energieversorgung mittels fossiler Kraftwerke durch eine erneuerbare, teilweise volatile Energiebereitstellung, führt zu einem Auseinanderklaffen von Angebot und Nachfrage. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, die verfügbare Energie aus volatilen Quellen mit der Nachfrage örtlich, zeitlich und quantitativ abzustimmen. Dieser Übergang zu nachhaltigen Systemen setzt Politik, Planer und Energieversorger zunehmend unter Druck. Bisher konnte weder ein einzelner Energieträger, noch eine einzelne Technologie als alleinige Lösung einer nachhaltigen Energieversorgung identifiziert werden. Vielmehr hat sich gezeigt, dass eine Kombination mehrerer, aufeinander abgestimmter Technologien, sowie die Kopplung verschiedener Sektoren, die Integration von Kurz- und Langzeitspeichern, der Ausbau von Übertragungskapazitäten, sowie die Erhöhung der Flexibilität sowohl angebotsseitig als auch nachfrageseitig, vielversprechend ist [2], [3].

Die genannten Transformationen stellen neue Herausforderungen an Planung, Simulation und Regelung dar. Von diesem Hintergrund ausgehend wird in dem laufenden Research Studio Austria „EnergySimCity“ (2014 - 2018) eine modulare Plattform zur Planung und Optimierung von urbanen Energiesystemen entwickelt. Im Zuge des Projektes wurden die grundlegenden Anforderungen an eine zukunftsfähige Energiesystemplanung durch die vier Anforderungen „intersektoral“, „dynamisch“, „interaktiv“ und „intermodular“ definiert (Abbildung 1).

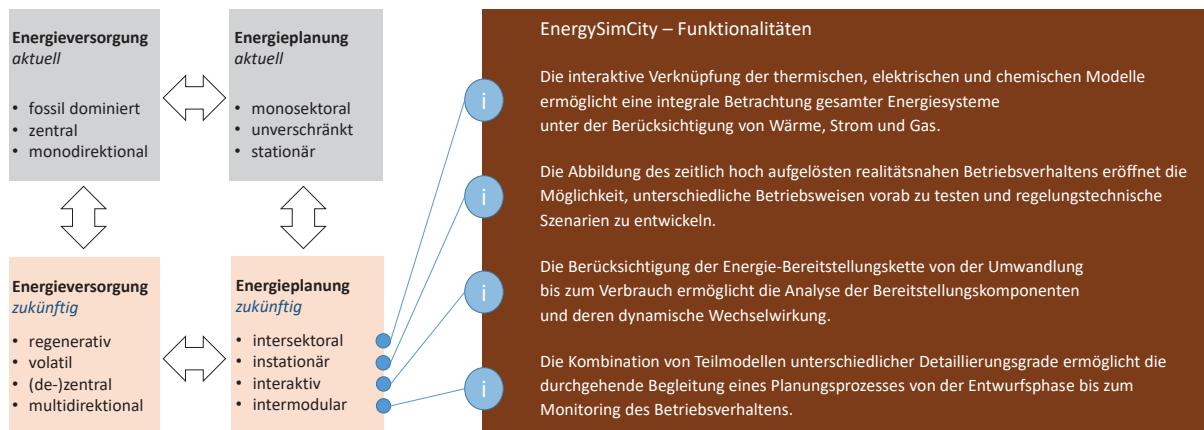


Abbildung 1: Aktuelle und zukünftige Energieversorgung und deren Anforderungen an die Energieplanung.

1.1 State of the Art in der Modellierung urbaner Energiesysteme

Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten diskutieren Methoden und Tools für die Modellierung von urbanen Energiesystemen auf unterschiedlichen Skalen. Allegrini et al. hat verschiedene Modellierungsansätze und Tools für Energiesysteme von Stadtquartieren diskutiert [4]. Connolly et al. hat Tools, die einzelne Gebäude betrachten bis hin zu Tools, die nationale Energiesystemen bewerten, in Bezug auf die Auswirkung der Integration erneuerbarer Energiesysteme analysiert [5]. Keirstead et al. diskutiert die aktuelle Literatur im Bereich urbaner Energiesystemmodellierung [6]. Die Erkenntnisse der Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden: (i) Die Simulation von urbanen Energiesystemen kann nicht in einem einzigen Tool erfolgen, da die Anforderungen der Subsysteme an die Simulationsumgebung sehr unterschiedlich sind. (ii) Ein Wechsel zu dynamischen Modellen ist notwendig, um verschiedene Konzepte vergleichen, und den Nutzen der Integration von Komponenten wie Speichern oder dezentraler Erzeuger bewerten zu können. (iii) Ausgefeilte Regelstrategien sind erforderlich, um den Anteil nicht regelbarer Energien zu erhöhen, sowie die Effizienz des gesamten Systems zu steigern.

Grundsätzlich können die Zusammenhänge verschiedener Systeme und Komponenten durch physikalische Gesetze, regel-basierte Beziehungen oder datengetriebene Beziehungen abgebildet werden. Oftmals wird auch zwischen sogenannten Black Box, Grey Box und White Box Modellen unterschieden. White Box Modelle (auch first-principle Modelle genannt) basieren auf der physikalischen Beschreibung des Systems durch (partielle) Differentialgleichungen oder Differential-algebraischen Gleichungen.

Black Box Modelle (auch data-driven Modelle genannt) benötigen keine a priori Informationen; das Ein- und Ausgangsverhalten des Systems wird modelliert, interne Zusammenhänge werden jedoch nicht physikalisch abgebildet. Grey Box-Modelle kombinieren quantitative Daten mit qualitativem Vorwissen und stellen demnach eine Mischform aus Black- und White Box Modellen dar. Welche Art der Modellierung in speziellen Fällen eingesetzt werden kann und soll, hängt davon ab, welche Erkenntnisse aus Simulationen abgeleitet werden sollen und welche Informationen und Daten a priori verfügbar sind. Der Fokus in EnergySimCity liegt auf der Entwicklung von flexiblen White- und Grey Box Modellen.

1.2 Modellierungsparadigmen

Generell kann zwischen dem kausalen und akausalen Modellierungsparadigma unterschieden werden [7]. In kausalen Modellen repräsentieren Verbindungen zwischen einzelnen Blöcken eine Liste von Input und Output Variablen, die in der Kausalität determiniert sind. Kausale Modelle erfordern eine explizite Darstellung in der sogenannten State Space Form. F. E. Cellier et al. [8] argumentiert, dass die Physik akausal ist und dass unser Wissen größtenteils in Gleichungen in Büchern „gespeichert“ ist, welches von Computer nicht direkt verarbeitet werden kann. Die Kausalisierung von Systemen erfordert viel Know-How und Zeit von Modellierern. Die Entwicklung von objektorientierten, akausalen Modellierungsansätzen war ein Paradigmenwechsel: akausale Modelle beschreiben das System durch implizite differential-algebraische Gleichungen und Verbindungen zwischen einzelnen Blöcken basieren auf gemeinsamen Variablen, die von beiden in der Form von Gleichungen benötigt werden. Akausale Modelle können einfacher erstellt, interpretiert, adaptiert und erweitert werden. Weiteres sind Modelle basierend auf akausalen Ansätzen gut geeignet, um dynamische Optimierungsprobleme zu definieren [9]. Bei der Simulation akausaler Modelle wird der Lösungsweg dem Algorithmus überlassen und daher werden für die effiziente Simulation hoch entwickelte Tools benötigt. In der Plattform EnergySimCity sind sowohl Tools, basierend auf kausalen, als auch auf akausalen Modellierungsparadigmen, integriert.

2 Methode und Tools

Die Modellierung und Simulation ganzer Stadtteile ist eine komplexe und sowohl für Anwender als auch Toolentwickler herausfordernde Aufgabe. Generell ergeben sich für Modellierung und Simulation komplexer Systeme, die aus mehreren Subsystemen (Gebäude, Netze, Speicher, etc.) bestehen, zwei Möglichkeiten: (i) Das gesamte System wird in einem einzelnen Tool modelliert und simuliert (monolithische Simulation) oder (ii) etablierte Tools für die jeweiligen Subsysteme werden gekoppelt und co-simuliert. Co-Simulation bezeichnet die Simulation von Systemen, die zumindest aus zwei Subsystemen bestehen, die in unterschiedlichen Programmen implementiert sind und gemeinsam ein (gekoppeltes) algebraisches Differentialgleichungssystem bilden. Der State of the Art im Bereich Co-Simulation wird in [10] diskutiert. Neben vielen Vorteilen wie Stabilität oder Fehlerabschätzung, haben monolithische Ansätze bei der Modellierung und Simulation von komplexen Systemen einige Nachteile gegenüber der Co-Simulation: (i) Komplexe Systeme sind in vielen Anwendungen in mehrere Subsysteme gegliedert, die jeweils in unterschiedlichen Teams und Tools entwickelt werden. Während Co-Simulation domain- und unternehmensübergreifende Kooperationen fördert, ist dies in monolithischen Ansätzen nur bedingt möglich.

(ii) Um die Modellierung und Simulation von komplexen urbanen Energiesystemen zu ermöglichen, ist oftmals eine Vereinfachung oder Adaption der einzelnen Submodelle erforderlich. Dafür ist die Domain-Expertise - welche auch auf speziellen Tools und deren integrierten numerischen Methoden beruht - essentiell. Diese Expertise ist nicht ohne weiteres auf andere Tools übertragbar. (iii) Einzelne Subsysteme stellen spezielle Anforderungen an die numerischen Lösungsverfahren, welche in monolithischen Simulationen nur begrenzt berücksichtigt werden können. Abbildung 2 gibt einen Überblick über den in EnergySimCity entwickelten Bearbeitungsprozess.

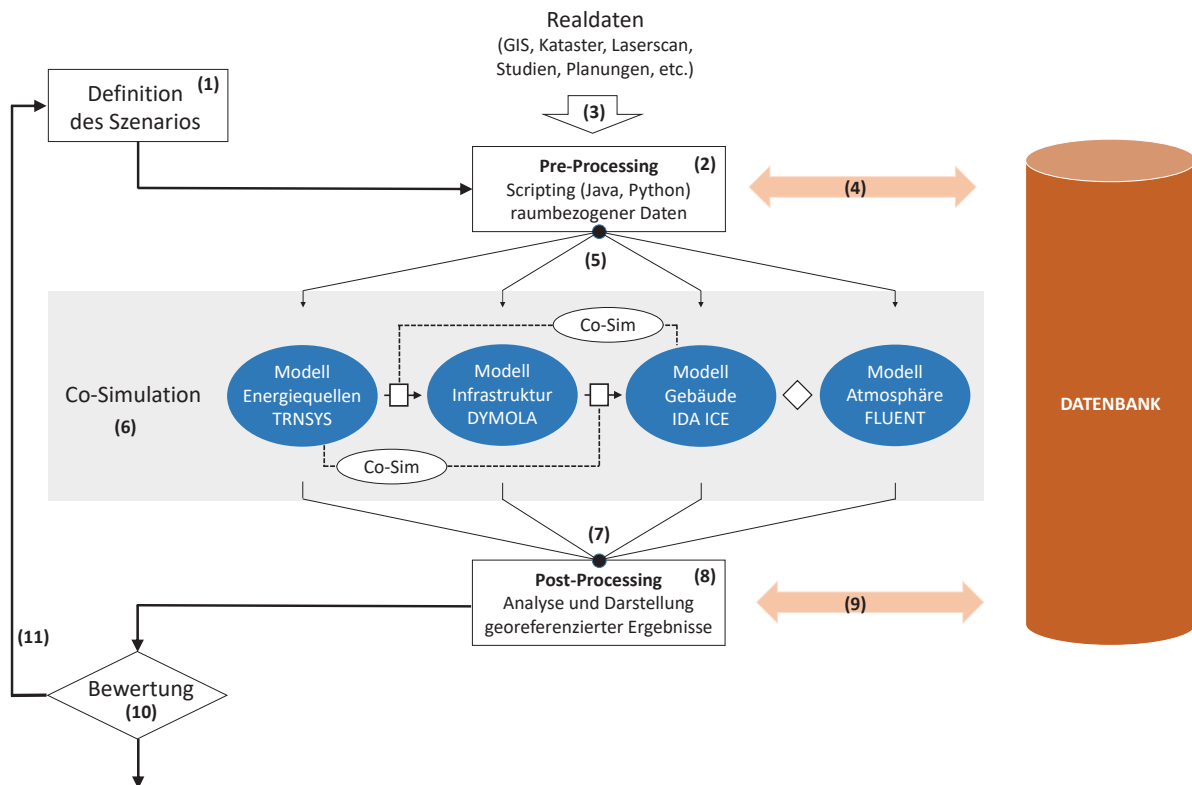


Abbildung 2: Bearbeitungsprozess in der Simulationsplattform EnergySimCity.

Wie alle planerischen Entwicklungsprozesse beginnt die Bearbeitung mit der Entwicklung möglicher Handlungs- bzw. Planungsoptionen. Die energietechnische Definition einer Planungsoption wird hier als Szenario bezeichnet. Die Definition eines Szenarios (siehe Prozessschritt (1) in Abbildung 2) enthält Beschreibungen der klimatischen Situation am Betrachtungsstandort, sowie sämtlicher energietechnischer Komponenten, inklusive deren Nutzung und Regelung. Im Pre-Processing (2) werden die dafür benötigten Daten bereitgestellt und für die Verwendung in Simulationsprogrammen aufbereitet. In der Regel basieren diese Daten auf ortsspezifischen Realdaten (d.h. auf Beschreibungen der im Betrachtungsgebiet bereits vorhandenen energietechnischen Systeme bzw. Gebäude). Dazu wurde eine Methode entwickelt [11], um aus unterschiedlichen Datenquellen (Geoinformationssysteme, Kataster, Laserscan, etc.) automatisiert, georeferenzierte Daten (z.B. Geometrien von Gebäuden [12] und Energienetzen) übernehmen zu können (3). Ergänzt werden diese Daten (4) durch virtuelle Daten aus einer dazu entwickelten PostgreSQL Datenbank, in der Erfahrungs- Literatur- und Normwerte hinterlegt sind (Konstruktionsaufbauten, Nutzungsverhalten, etc.).

Das Pre-Processing übergibt den derart entstandenen Datensatz (5), je nach Bedarf der jeweiligen Modelle, an die Simulationsprogramme TRNSYS, DYMOLA, IDA ICE und FLUENT.

Durch das geometrisch detaillierte Simulationsmodell (feines Netz mit mehreren Millionen Zellen) des atmosphärischen Körpers in FLUENT, werden zellweise Informationen von Strömungsgeschwindigkeit, Druck und Temperatur der Luft ermittelt, die in der Gebäudemodellierung als Randbedingung genutzt werden können. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, kleine Ausschnitte des atmosphärischen Körpers noch feiner aufzulösen, um besondere (lokale) Strömungsphänomene wie z.B. Verwirbelungen weiter im Detail zu betrachten. Die einzelnen Subsysteme (Erzeuger, Gebäude, Netze, Speicher, etc.), die in unterschiedlichen Tools implementiert sind, werden zu einer dynamischen Co-Simulation (6) gekoppelt. In der Plattform EnergySimCity wird die Co-Simulation je nach Anwendung über BCVTB (Building Controls Virtual Test Bed) [13] oder FMI (Functional Mock-up Interface) [14] realisiert. Die Simulationsergebnisse werden in der Folge an das Post-Processing übergeben (7). Dieses sichert einerseits die Rohdaten in einem Datenbanksystem (8) und bereitet andererseits die Ergebnisse für eine folgende Analyse auf. Dazu zählen Tabellen und Grafiken, insbesondere aber georeferenzierte Karten, die zusätzlich über die räumliche Verteilung der Ergebnisse (z.B. Heizwärmebedarf bzw. Kühlbedarf eines Stadtbezirkes) Auskunft geben. Im finalen Prozessschritt werden die Ergebnisse durch die jeweiligen Entscheidungsträger bewertet (10). In der Bewertung wird entschieden ob das Szenario ein Energiesystem beschreibt, das den gestellten Anforderungen entspricht. In diesem Fall ist der Prozess beendet und das gewünschte Ergebnis gefunden. Falls das Ergebnis als insuffizient angesehen wird, springt der Prozess wieder an den ersten Schritt (11) und führt zu einer Überarbeitung der Definition des Szenarios.

2.1 Tools

In der Plattform EnergySimCity werden die Gebäude in IDA ICE, netzgebundene Energieversorgungssysteme in DYMOLA, Erzeugungsanlagen und Speicher in TRNSYS und DYMOLA sowie atmosphärische Modelle in FLUENT modelliert. IDA ICE ist ein kommerzielles Programm zur dynamischen Simulation von Gebäuden und HLK Systemen. Modelle können in den Modellierungssprachen NMF (Neutral Model Format) und Modelica geschrieben werden. IDA-ICE bietet Schnittstellen zu 2D - und 3D - CAD Programmen. Über eine IFC (Industry Foundation Classes) Schnittstelle zum BIM (Building Information Modeling) Import können nicht nur Geometriedaten, sondern auch Bauteilinformationen importiert werden. IDA ICE ermöglicht das Decoupling von Modellen. Dabei wird das Modell in mehrere kleinere Modelle aufgeteilt, welche anschließend parallel simuliert werden. DYMOLA ist eine kommerzielle Modellierungsumgebung, die auf der Modellierungssprache Modelica basiert. Modelica ist eine multi-domain Modellierungssprache die hybride (kontinuierliche und diskrete) Modellierungen ermöglicht. TRNSYS ist ein kommerzielles Programm, das zur Simulation von dynamischen Systemen entwickelt wurde. Es wird mehrheitlich in der Anlagensimulation eingesetzt und stellt eine große Bibliothek von gebäudetechnischen Komponenten zur Verfügung. ANSYS FLUENT ist eine Software zur numerischen Beschreibung einer Vielzahl von physikalischen und chemischen Phänomenen. Die als Computational Fluid Dynamics (CFD) bezeichnete Methode bedient sich dabei der Methodik „Finiter Volumen“, welche ein spezielles Berechnungsverfahren zum Lösen numerischer Problemstellungen darstellt.

Geoinformationssysteme (GIS) sowie CAD-Tools nehmen bei der ganzheitlichen Erhebung und simulationsgestützten Analyse von regionalen und überregionalen Energiesystemen eine wichtige Rolle ein. Wesentlich ist, dass es diese ermöglichen, den Komponenten eines Energiesystems (z.B.: Gebäude, Netze, Erzeugungsanlagen, etc.) sowie den energierelevanten Potentialen innerhalb eines Betrachtungsgebietes (z.B.: Solar-, Biomasse-, Geothermiepotentiale) einen Raumbezug zuzuweisen. Die möglichen Einsatzbereiche von GIS/CAD-Tools im Kontext von EnergySimCity sind vielfältig und umfassen: Datenbeschaffung, Darstellung und Filterung nach Gebäudemerkmale, Datenvisualisierung, Datenverwaltung sowie Datenübernahme.

BCVTB ist eine auf Ptolemy II basierende Softwareumgebung, die es Benutzern ermöglicht, verschiedene Simulationsprogramme via Co-Simulation zu koppeln. Aktuell können rund 10 Programme mit BCVTB gekoppelt werden; u.a. DYMOLA, MATLAB, SIMULINK, TRNSYS. FMI ist ein Tool-unabhängiger Standard, der sowohl Model Exchange als auch Co-Simulation von dynamischen Modellen unterstützt. FMI ist sowohl im akademischen Bereich als auch in der Industrie weit verbreitet und wird aktuell von 106 Tools unterstützt.

3 Anwendung

Im Folgenden zeigen zwei Fallstudien beispielhaft die Anwendung der Plattform EnergySimCity im Bereich der urbanen Energiesystemplanung.

3.1 Integration einer Power-to-Heat Anlage in ein urbanes Wärmesystem

Ein real existierendes urbanes Fernwärmesystem wurde adaptiert, um die zukünftigen Herausforderungen an die Simulation zu testen (Abbildung 3): Dazu wurde eine Power-to-Heat Anlage in die Energieversorgung integriert, welche die Rücklauf Temperatur des Fernwärmenetzes erhöht (Abbildung 4), und zudem sehr schnell auf Überschüsse im elektrischen Netz reagieren kann. Der Energieinhalt des Power-to-Heat Speichers ist in Abbildung 5 dargestellt. Abbildung 6 zeigt, die Versorgungstemperatur am Erzeuger, sowie an den Verbrauchern C1 und C2 (Abbildung 3): Die Temperaturwelle wird korrekt abgebildet und erreicht die Verbraucher C1 und C2 zeitlich verzögert. Des Weiteren wurden mehrere Prosumer sowie eine große dezentrale Solaranlage integriert, welche in das Fernwärmenetz einspeisen.

Diese durchgeführten Systemadaptionen erhöhen die Dynamiken im gesamten System; dies hat keinen Einfluss auf die Performance der Simulation, da die Umkehr der Strömungsrichtung, zero-flow Zustände sowie Temperatursprünge numerisch robust abgebildet werden können. Die dynamische, thermohydraulische Simulation basiert auf einer Modelica Bibliothek, die im Zuge des Research-Studios entwickelt wurde. Die Modelle wurden basierend auf den Anforderungen zukünftiger Systeme konzipiert; Details werden in [15] dargestellt. Eine zentrale Herausforderung im Bereich der dynamischen, thermo-hydraulischen Simulation von komplexen Systemen besteht darin, einen Kompromiss zwischen Genauigkeit und numerischer Robustheit zu ermöglichen; dabei sind vor allem extrem steife Systeme von Differentialgleichungen zu vermeiden.

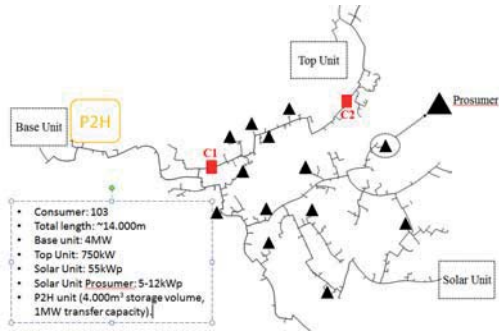


Abbildung 3: Adaptiertes urbanes Energiesystem.

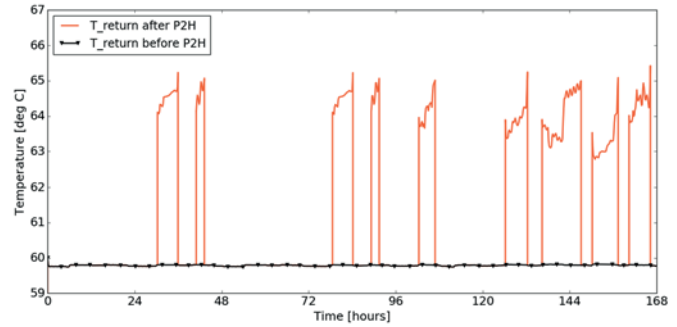


Abbildung 4: Power-to-Heat Anlage erhöht bei Bedarf die Rücklauftemperatur.

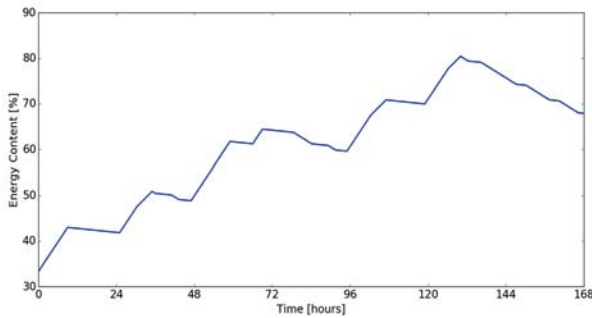


Abbildung 5: Energieinhalt der Power-to-Heat Anlage

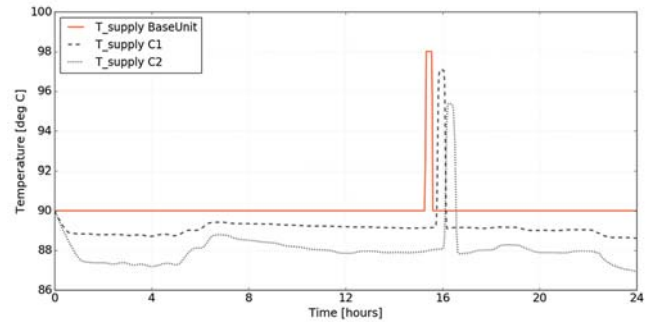


Abbildung 6: Temperaturwelle durch das Fernwärmenetz.

3.2 Wärmedichteanalyse bei unterschiedlicher Wärmenetz Vorlauftemperatur

Die GIS-basierte automatisierte Methode zur thermischen Analyse des Gebäudebestandes [11] wurde anhand einer Case Study mit 441 Gebäuden im Rahmen des FFG Projektes „coldHEAT“ angewandt. Untersucht wurde, auf der Grundlage einer angenommenen Datenlage, inwieweit sich der Heizenergiebedarf (HEB) bei unterschiedlichen Temperaturen im Wärmeverteilungssystem der Gebäude ändert.

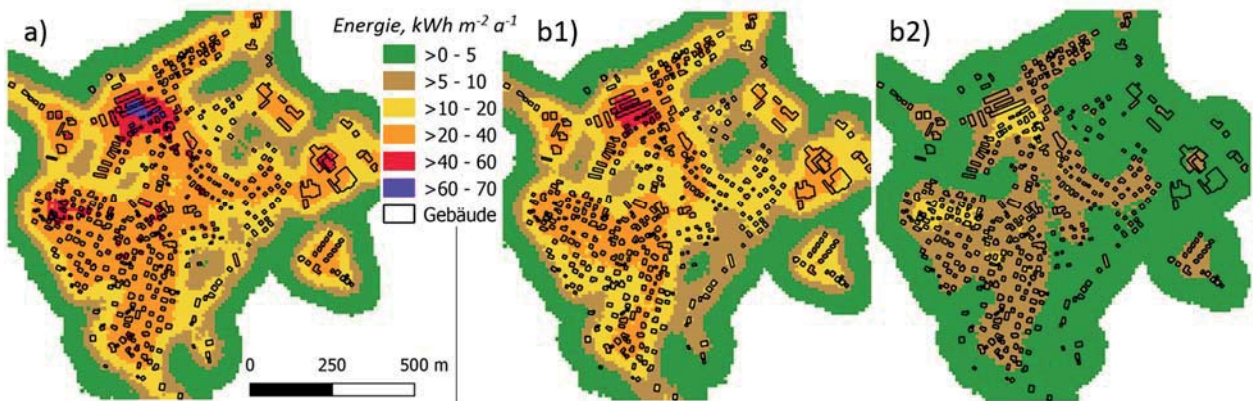


Abbildung 7: Energiedichtekarten: a) 80°C, b) 35°C im Wärmeverteilungssystem der Gebäude; b1) Wärmepotential, b2) zusätzliche notwendiger Strombedarf zur Warmwasserbereitung.

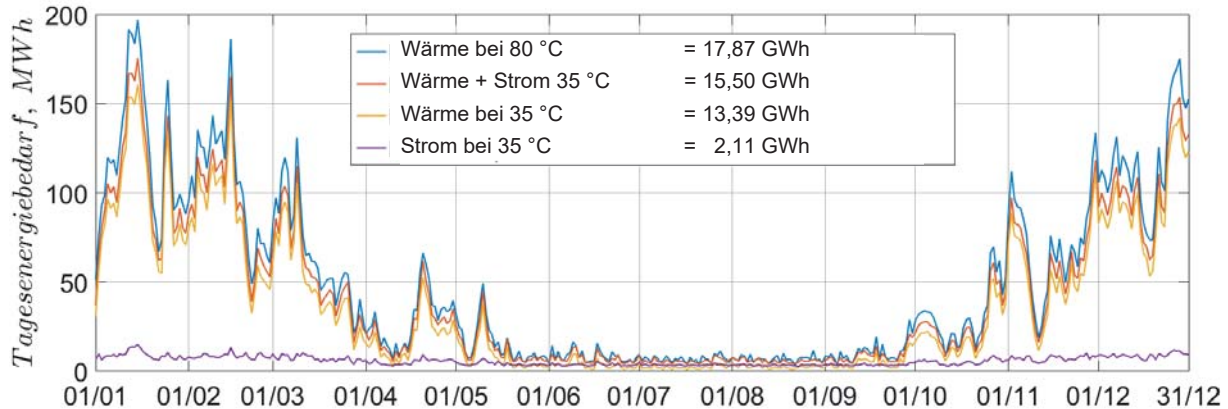


Abbildung 8: Vergleich der Lastverläufe zwischen hohem (80 °C) und niedrigem (35 °C) Temperaturniveau.

Untersucht wurden Wärmeverteilttemperaturen von 80 °C und 35 °C bei gleichbleibenden Gebäudestandard, wobei sekundärseitige Wärmeverluste berücksichtigt wurden. Bei einer Vorlauftemperatur von 35 °C muss beachtet werden, dass das Heizungssystem eigentlich adaptiert werden müsste. Einerseits ist eine E-Patrone oder eine Wärmepumpe notwendig, um das Wasser im Warmwasserspeicher von 35 °C auf 55 °C aufzuwärmen und andererseits muss das gesamte Wärmeabgabesystem im Gebäude auf das niedrigere Temperaturniveau angepasst werden.

Abbildung 7 vergleicht das Wärmepotential bei hohem und niedrigem Temperaturniveau und zeigt, dass für einen Energieversorger die zu liefernde Wärmemenge sinkt (siehe Abbildung 7 a) und b1)). Allerdings ist ein zusätzlicher Strombedarf zur Warmwasserbereitung (siehe Abbildung 7 b2); Strom direkt) die Folge. Das Wärmeeinsparungspotential würde sich bei Berücksichtigung der Wärmeverluste des Fernwärmenetzes noch weiter erhöhen. Abbildung 8 vergleicht den kumulierten Tagesenergiebedarf aller untersuchten Gebäude zwischen hohem und niedrigem Temperaturniveau. Der Jahresenergiebedarf sinkt durch die reduzierten Wärmeverluste von 17,87 GWh (blaue Linie) auf 15,50 GWh (orange Linie). Die Energiemenge bei niedrigem Temperaturniveau setzt sich aus Wärme (gelbe Linie) und zusätzlich notwendigen Strom zur Warmwasseraufbereitung (violette Linie) zusammen.

Energieversorger können derartige Studien nutzen, um beispielsweise Wirtschaftlichkeitsberechnungen für unterschiedliche Energieversorgungskonzepte und deren Netzvorlauftemperaturen durchzuführen. Die Energiedichte des Untersuchungsgebietes sinkt zwar von 23,7 kWh/m²/a (bei 80° Vorlauftemperatur) auf 17,4 kWh/m²/a (bei 35° Vorlauftemperatur), allerdings kann Wärme aus Niedertemperaturprozessen genutzt werden, welche in Hochtemperaturnetzen nur aufwendig mittels Wärmepumpen genutzt werden könnte. Dies stellt Energieversorger vor neue ökonomische Fragestellungen, die es in Zukunft zu lösen gilt. Es zeigt sich, dass GIS-basierte detaillierte Analysen, Energieversorger oder Städteplaner bei wichtigen Entscheidungen hinsichtlich Wärmenetzadaptionen unterstützen können.

4 Conclusio

Die Plattform EnergySimCity wurde für die Simulation und Optimierung von urbanen Energiesystemen entwickelt; sie wird den zu Grunde gelegten Anforderungen „intersektoral“, „dynamisch“, „interaktiv“ und „intermodular“ gerecht und ermöglicht zukünftige Systeme zu planen, sowie die Effizienz existierender Systeme zu erhöhen. Die Gebäude werden in IDA ICE, netzgebundene Energieversorgungssysteme in DYMOLA, Erzeugungsanlagen und Speicher in TRNSYS und DYMOLA sowie atmosphärische Modelle in FLUENT modelliert. Die Plattform lässt sich flexibel einsetzen und je nach Ziel und a priori verfügbaren Informationen werden White- und Grey Box Modelle der verschiedenen Subsysteme zu einer dynamischen Co-Simulation gekoppelt. Die Co-Simulation ermöglicht die Kopplung von Tools, die speziell für Subsysteme wie Gebäude oder Netze entwickelt wurden. Zwei Anwendungen zeigen die Möglichkeiten der Plattform EnergySimCity. Die erste Anwendung zeigt die Möglichkeiten der Plattform im Bereich der Modellierung und effizienten Simulation von Fernwärmenetzen der vierten Generation. Die zweite Anwendung beschreibt eine GIS-basierte Methode zur Analyse von urbanen Energiesystemen.

5 Danksagung

Das Research Studio Austria - EnergySimCity - Ganzheitliche Analyse und Simulation von Energiesystemen und Ressourcenverbänden in Städten und Stadtquartieren (FFG Projekt 844732) und das Projekt coldHEAT - Integrative Analyse zur räumlichen und techno-ökonomischen Bewertung von Konzepten zu kalter Fernwärme (FFG Projekt 853638), werden durch das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft gefördert.

6 Referenzen

- [1] United Nations, “World Urbannization Prospects,” 2014.
- [2] H. Lund *et al.*, “4th Generation District Heating (4GDH): Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems,” *Energy*, 2014.
- [3] G. Schweiger, J. Rantzer, K. Ericsson, and P. Lauenburg, “The potential of power-to-heat in Swedish district heating systems,” *Energy*, 2017.
- [4] J. Allegrini, K. Orehounig, G. Mavromatidis, F. Ruesch, V. Dorer, and R. Evins, “A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015.
- [5] D. Connolly, H. Lund, B. V Mathiesen, and M. Leahy, “A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems,” *Appl. Energy*, 2009.
- [6] J. Keirstead, M. Jennings, and A. Sivakumar, “A review of urban energy system models: approaches, challenges and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011.
- [7] G. Schweiger, G. Engel, and I. Leusbrock, “Multi-domain, open general tools for modelling urban energy systems,” *Energy (submitted)*, 2018.
- [8] F. E. Cellier, H. Elmqvist, and M. Otter, “Modeling from Physical Principles,” in *The control Handbook (W.S.Leveine, ed.)*, 1995.

- [9] J. Åkesson, K. Årzén, M. Gäfvert, T. Bergdahl, and H. Tummescheit, "Modeling and Optimization with Optimica and JModelica.org — Languages and Tools for Solving Large-Scale Dynamic Optimization Problems," *Comput. Chem. Eng.*, 2010.
- [10] C. Gomes, C. Thule, D. Broman, P. Gorm Larsen, and H. Vangheluwe, "Co-simulation: State of the art," Report, 2017.
- [11] P. Nageler *et al.*, "Novel validated method for GIS based automated dynamic urban building energy simulations," *Energy*, 2017.
- [12] P. Nageler, T. Mach, R. Heimrath, H. Schranzhofer, and C. Hochenauer, "Generation tool for automated thermal city modelling," *Appl. Mech. Mater.*, 2018.
- [13] M. Wetter, "Co-simulation of building energy and control systems with the Building Controls Virtual Test Bed," *J. Build. Perform. Simul.*, 2011.
- [14] T. Blochwitz *et al.*, "The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models," in *8th International Modelica Conference, 2011*.
- [15] G. Schweiger, P.-O. Larsson, F. Magnusson, P. Lauenburg, and S. Velut, "District heating and cooling systems - Framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization," *Energy*, 2017.