

# Agentenbasierte Simulation der Gebäudeentwicklung in Hamburg

Autor(en): Thomas Preisler, Wolfgang Renz, Tim Dethlefs und Nils Weiss

Version 1.0, 17.11.2017

Für die Einhaltung der deutschen Klimaschutzziele spielt die Energieeffizienz im Wärmesektor eine entscheidende Rolle. Dabei ist neben der Modernisierung der Wärmeerzeugung und Versorgung auch die Entwicklung des Gebäudebestands entscheidend, also Sanierung, Umbau oder Nutzungsänderung sowie Neubau in Bebauungsflächen, im Zuge der Nachverdichtung oder nach Abriss. Gegenwärtig betrachten viele Studien die zu erwartende Entwicklung bis 2050 summarisch global für Deutschland (Henning und Palzer 2013) oder gemittelt für eine Stadtregion (Schuhmacher et al. 2015), wobei unterschiedliche Zukunftsszenarien angenommen werden, räumliche Bezüge jedoch nicht oder nur mittelbar berücksichtigt werden.

Bei der Erstellung von Zukunftsprojektionen für Wärmeversorgung und Wärmebedarf der Gebäude einer Stadtregion spielen allerdings räumliche Bezüge eine wichtige Rolle. Neben der Heizungstechnik im Gebäude sind die Fernwärmenetze zu berücksichtigen. Ferner variiert auch auf der Verbrauchsseite das Investitionsverhalten im Nichtwohngebäudebereich, im gewerblichen Wohnungsbau sowie im Eigenheimbereich mit Quartier bzw. Stadtteil und mit sozioökonomischen Faktoren der Einwohner und Nutzer. Auch Regulierungs- oder Fördermaßnahmen wirken daher in einzelnen Quartieren oder Stadtteilen unterschiedlich. Deshalb sind räumliche Zukunftssimulationen unter Berücksichtigung von Stadtplanung und Stadtentwicklung gefragt wie sie im Geografischen Wärme-Informationen und Simulations-System des über 4 Jahre vom BMWi geförderten GEWISS-Projekts<sup>1</sup> für die Stadtregion Hamburg geplant sind.

Gemeinsam mit dem Hamburger Landesamt für Geoinformation und Vermessungswesen (LGV) plant das GEWISS-Projekt ein öffentlich zugängliches, webbasiertes Informationssystem. Das Wärmekataster der gegenwärtigen Gebäudewärmebedarfe ist schon online<sup>2</sup>, während die Zukunftsprojektionen nach Projektabschluss veröffentlicht werden. Aus Datenschutzgründen werden im Informationssystem nur räumlich aggregierte Ergebnisse dargestellt.

## Simulationsmethode

In diesem Artikel zeigen wir die Methodik und exemplarische Ergebnisse von häuserscharfen Sanierungssimulationen der Wärmebedarfe für insgesamt (151.636) Einfamilien- und Reihenhäuser<sup>3</sup> in der gesamten Hamburger Stadtregion, die auch methodische Gründe für die räumliche Aggregation sichtbar machen und begründen. Zur Erzeugung der Zukunftsprojektionen wird die sogenannte Monte-Carlo-Simulationsmethode eingesetzt, bei der mit Hilfe von Zufallszahlen die bedingten Wahrscheinlichkeiten des Simulationsmodells zur Zukunftsentwicklung ausgewürfelt werden. Als Ausgangspunkt dienen die im Wärmekataster veröffentlichten Daten (Dochev et al. 2017) sowie Schätzungen der Partner an der HCU Hamburg über den Sanierungszustand der betrachteten

---

<sup>1</sup> In der Förderlinie Eneff:Stadt gefördertes Verbundprojekt mit der HCU Hamburg, dem Arrhenius-Institut Hamburg, ECOFYS Köln, GEF Leimen, OCF Hamburg, der BUE Hamburg und weiteren Partnerinstitutionen, verlängerte Laufzeit 1. Juli 2014 bis 30. Juni 2019

<sup>2</sup> <http://www.hamburg.de/energiewende/waermekataster/>, zugegriffen am 17.11.2017

<sup>3</sup> In zukünftigen Simulationen sollen dann Sanierungen von anderen Gebäudetypen wie Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäude wie Firmen- oder Verwaltungsgebäuden mit einer von ECOFYS für dieses Projekt entwickelten Typologie abgebildet werden.

Wohngebäude. Das Simulationsmodell basiert auf einer energetischen Wohngebäudetypologie des *Instituts Wohnen und Umwelt (IWU)*, die die Wärmebedarfe für unterschiedliche Sanierungsstufen enthalten.

In der agentenbasierten Simulation (Davidsson 2001), wird jedem Gebäude ein Besitzer-Typ zugeordnet, der bestimmt, wie sich das Gebäude in Abhängigkeit von seinem Sanierungszustand, dem Baujahr und möglichen Förderprogrammen entwickelt. Die agentenbasierte Modellierung erlaubt dabei u.a. die Untersuchung von sich selbstverstärkenden Phänomenen wie der räumlichen Verbreitung technischer Lösungen (z.B. Solaranlagen auf dem Dach) aufgrund von Nachbarschaftseffekten und sozioökonomischer Faktoren.

Aktuell werden fünf unterschiedliche Besitzertypen von Einfamilien- und Reihenhäusern abgebildet, die in einer Studie über die Handlungsmotive von Eigenheimsanierern identifiziert wurden (Stieß et al. 2010), s. Tabelle 1. In der Simulation bedeutet Sanierungsstufe 0, dass ein Gebäude in der Vergangenheit noch nicht saniert wurde, Stufe 1 entspricht einer Sanierung gemäß der Energiesparverordnung (EnEV) von 2014 und ein Stufe 2 entspricht dem Passivhausstandard der ebenfalls in der EnEV 2014 festgelegt ist. Sanierungen im Sinne von Instandhaltungs- und Wartungsarbeiten, wie z.B. das Neustreichen einer Fassade werden dabei nicht berücksichtigt. Wie ebenfalls Tabelle 1 zu entnehmen ist die Modellannahme dieser Sanierungssimulation, dass 3 Besitzertypen entsprechend Stufe 1, die anderen entsprechend Stufe 2 sanieren. Innerhalb der Simulation entscheiden die Agenten der noch nicht sanierten Häuser in jedem Zeitschritt/Jahr gemäß der ihrem Typ im Simulationslauf zugeordneten Sanierungswahrscheinlichkeit.

*Tabelle 1: Verteilung und Sanierungsverhalten (vereinfacht) unterschiedlicher Hausbesitzertypen von Einfamilien- und Reihenhäusern nach (Stieß et al. 2010).*

Hausbesitzertyp	Verteilung	Sanierungsstufe	Sanierungswahrscheinlichkeit
Unreflektierter Instandhalter	12%	1	3%
Desinteressierter Unwilliger	14%	1	1%
Engagierter Wohnwertoptimierer	20%	1	5%
Überzeugter Energiesparer	25%	2	5%
Aufgeschlossener Skeptiker	29%	2	2,5%

Die Simulation berücksichtigt dabei auch, dass die Sanierungswahrscheinlichkeit höher ist, wenn sich das Gebäude in einem städtischen Sanierungsgebiet befindet (hier bei maximaler Förderung als vier Mal so hoch angesetzt), weiterhin wird die Sanierungswahrscheinlich verdoppelt wenn sich innerhalb eines Nachbarschaftsradius (hier 100 m) mindestens ein renoviertes Gebäude befindet.

Die technische Grundlage des Systems bildet die Open Source Software *Repast Symphony*<sup>4</sup> (North et al. 2013), eine agentenbasierte Modellierungs- und Simulationsplattform, die die hier geforderten Geoinformationssystem (GIS)-Funktionalitäten unterstützt. Die grundlegende Architektur des Simulationssystems ist in Abbildung 1 dargestellt und zeigt die Interaktionen der unterschiedlichen Komponenten sowie die Ausführungsreihenfolge innerhalb der Simulation.

<sup>4</sup> <https://repast.github.io/>, zugegriffen am 17.11.2017

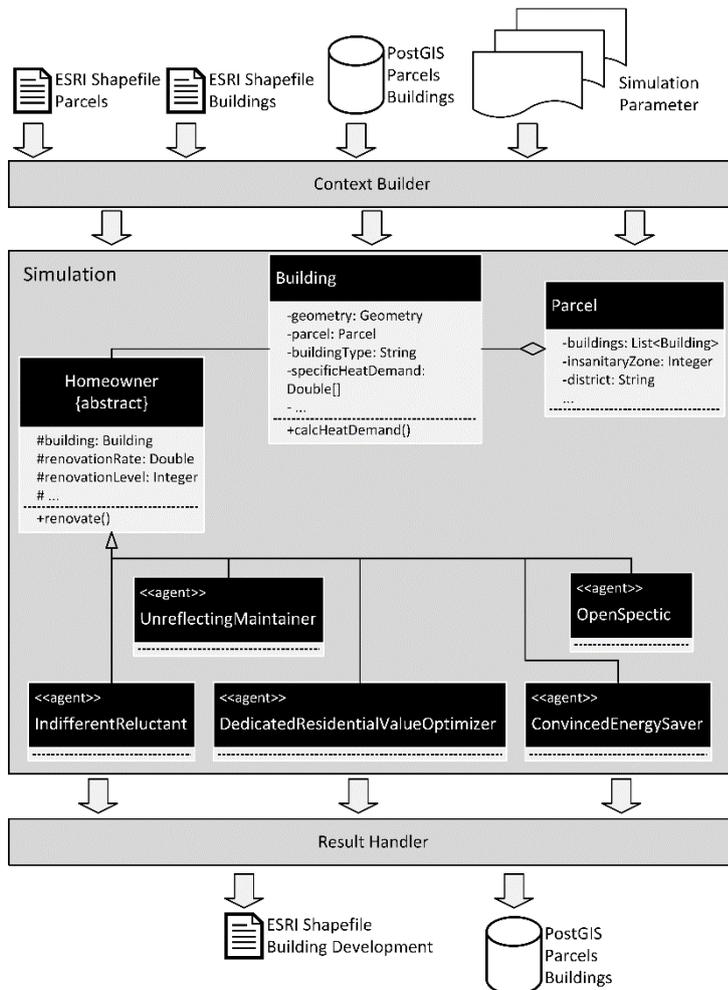


Abbildung 1: Architektur des GEWISS Simulationssystems (aus (Preisler et al. 2017)).

## Ergebnisse

In der Sanierungssimulation wird der Wärmebedarf eines Gebäudes ( $\frac{kWh}{a}$ ) berechnet, indem der spezifische Wärmebedarf des Gebäudetyps gemäß IWU Gebäudetypologie und Sanierungslevel (in  $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ ) mit der Bruttogeschossfläche (in  $m^2$ ) und einem Wohnfläche-Faktor multipliziert wird. Dieser Faktor gibt an, wieviel Prozent der Bruttogeschossfläche tatsächlich als Wohnraum verwendet und daher beheizt wird. Die Bruttogeschossfläche wird dabei aus der Grundfläche des Gebäudes und der Anzahl an Stockwerken approximiert. Der spezifische Wärmebedarf enthält kein Warmwasser. Zusätzlich wurde ein Korrekturfaktor für typische Verbrauchswerte nach (Loga et al. 2017) angewandt.

Ein erstes Entwicklungsszenario für den Gebäudebestand in Hamburg von 2016 bis 2050 wurde erstellt, indem das Simulationssystem mit den erläuterten Werten parametrisiert und ausgeführt wurde. Das Entwicklungsszenario zeigt die mögliche Reduktion des Wärmebedarfs und der, damit zusammenhängenden, CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die aggregierten Ergebnisse dieser Simulation sind in Abbildung 2 dargestellt. Die x-Achse zeigt dabei das simulierte Jahr und die linke y-Achse zeigt den summierten Wärmebedarf aller Gebäude in  $\frac{GWh}{a}$ . Auf der rechten y-Achse ist die Anzahl der Gebäude im jeweiligen Sanierungslevel abgebildet.

Die Abbildung zeigt dabei, dass der aggregierte Wärmebedarf aller betrachteten Gebäude um etwa ein Drittel von ca. 1500  $\frac{GWh}{a}$  im Jahr 2016 auf ca. 1000  $\frac{GWh}{a}$  im Jahr 2050 reduziert werden kann, sollten die Gebäude entsprechend der angenommenen Raten saniert werden. Dafür ist es nötig, dass etwa

130.000 der ca. 150.000 Gebäude im simulierten Zeitraum saniert werden müssen. Da der Ausgangszustand als unsaniert angenommen wurde, die meisten Gebäude allerdings nicht mehr die ursprünglichen Fenster oder Heizsysteme besitzen, wurde der initiale Wärmebedarf in der Simulation etwas überschätzt im Vergleich zum realen Gebäudebestand in Hamburg.

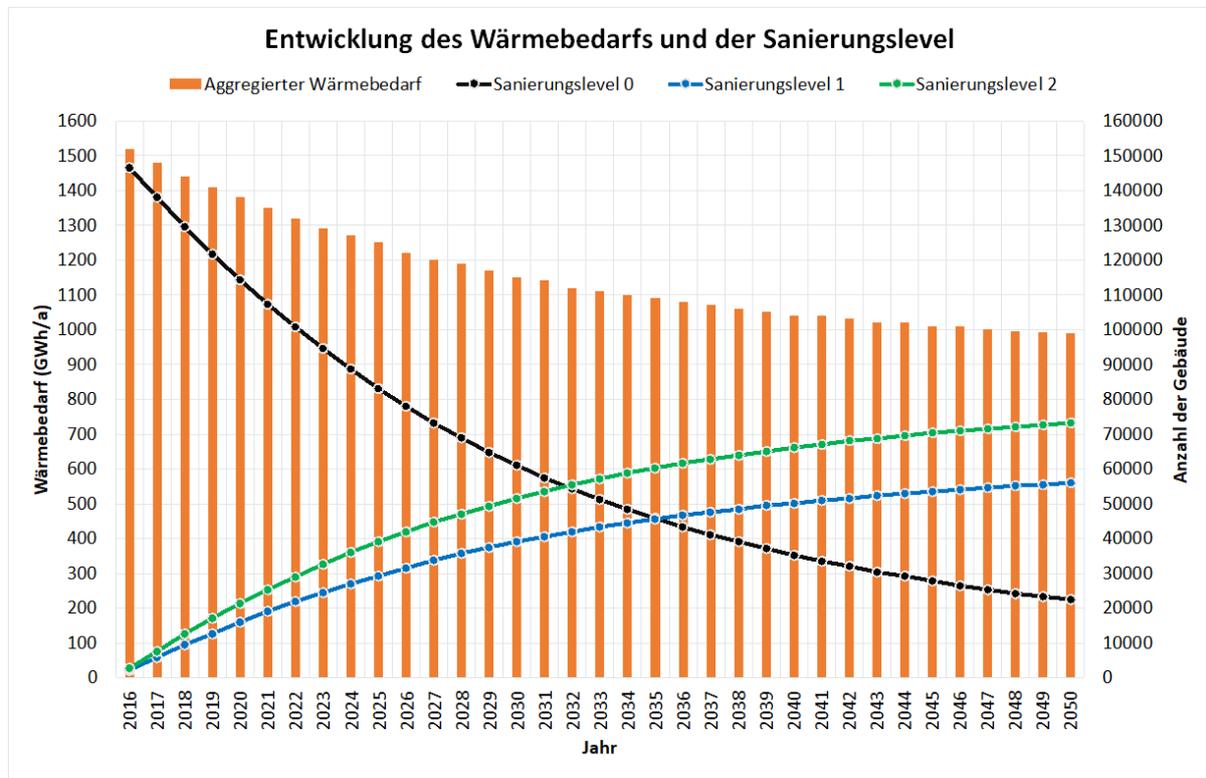


Abbildung 2: Simulationsergebnisse für das Szenario aus Tabelle 2. Die x-Achse zeigt dabei das simulierte Jahr, die primäre y-Achse zeigt den summierten Wärmebedarf alle Gebäude in GWh/a, und die sekundäre y-Achse zeigt die Anzahl der Gebäude in einem bestimmten Sanierungszustand.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Kartenausschnitt im Hamburger Stadtteil Othmarschen mit hauptsächlich Einfamilien- und Reihenhäusern. Abbildung 4 zeigt dann die kartographische Darstellung des simulierten Wärmebedarfs für das Jahr 2050. Die in der Abbildung grauen Gebäude wurden nicht simuliert und berechnet, da sie weder Einfamilien- noch Reihenhäuser sind. Es ist der absolute Wärmebedarf der Gebäude dargestellt und nicht der Wärmebedarf pro Quadratmeter. Das bedeutet, dass größere Gebäude einen entsprechend höheren Wärmebedarf haben als kleinere Gebäude. Abbildung 5 zeigt dazu die Sanierungsstufen der Gebäude im Jahr 2050. Dabei wird deutlich, dass bei den angenommenen Sanierungsraten nur wenige Gebäude in ihrem ursprünglichen Zustand verbleiben.

In diesem Beitrag wurde eine Simulationsmethodik vorgestellt, die es erlaubt, auf dem gegenwärtigen Stand der Erkenntnisse quartiers- und stadtteilbezogene Zukunftsprojektionen der Wärmebedarfe im Gebäudesektor zu erstellen. Auf diese Weise leistet das GEWISS-Projekt einen Beitrag zur Verbesserung von Zukunftsstudien im Wärmesektor durch eine räumlich aufgelöste Datengrundlage mit Berücksichtigung sozioökonomischer Effekte.



Abbildung 3: Ausschnitt der Karte von Hamburg, die ein Wohngebiet mit Einfamilien-, Reihen- und Mehrfamilienhäusern im Stadtteil Othmarschen zeigt. (Detached House = Einfamilienhaus, Terraced House = Reihenhaus)



Abbildung 4: Kartographische Repräsentation des simulierten Wärmebedarfs für Einfamilien- und Reihenhäuser im Stadtteil Othmarschen im Jahr 2050.



Abbildung 5: Kartographische Repräsentation der Sanierungsstufen (Renovation Level) von Einfamilien- und Reihenhäuser im Stadtteil Othmarschen im Jahr 2050.

## Kontakt

Dr. Thomas Preisler (Modellierung, Softwareentwicklung und Simulation), MMLab – HAW Hamburg / Fraunhofer ISIT, [thomas.preisler@haw-hamburg.de](mailto:thomas.preisler@haw-hamburg.de)

Nils Weiss, M.Sc. (Softwareentwicklung), MMLab – HAW Hamburg, [nils.weiss@haw-hamburg.de](mailto:nils.weiss@haw-hamburg.de)

Prof. Dr. Wolfgang Renz (Modellbildung und Stochastik, Gesamtprojektleitung GEWISS), MMLab – HAW Hamburg, [wolfgang.renz@haw-hamburg.de](mailto:wolfgang.renz@haw-hamburg.de)

## Referenzen

Davidsson, Paul (2001): Multi Agent Based Simulation. Beyond Social Simulation. In: Scott Moss und Paul Davidsson (Hg.): Multi-Agent-Based Simulation. Second International Workshop, MABS 2000 Boston, MA, USA, July Revised and Additional Papers, Bd. 1979. Berlin, Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science, 1979), S. 97–107.

Dochev, Ivan; Munoz, Esteban; Seller, Hannes; Peters, Irene (2017): Assigning IWU Building Types to Buildings in the Hamburg ALKIS. HCU Hamburg.

ESRI: ESRI Shapefile Technical Description. Online verfügbar unter <https://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/shapefile.pdf>, zuletzt geprüft am 09.11.2017.

Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2013): Studie: Energiesystem Deutschland 2050. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE). Freiburg.

Loga, Tobias; Stein, Britta.; Diefenbach, Nikolaus; Born, Rolf (2017): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt (IWU). Darmstadt, zuletzt geprüft am 09.11.2017.

North, Michael J.; Collier, Nicholson T.; Ozik, Jonathan; Tatara, Eric R.; Macal, Charles M.; Bragen, Mark; Sydelko, Pam (2013): Complex adaptive systems modeling with Repast Simphony. In: *complex adapt syst model* 1 (1), S. 3. DOI: 10.1186/2194-3206-1-3.

Preisler, Thomas; Dethlefs, Tim; Renz, Wolfgang; Dochev, Ivan; Seller, Hannes; Peters, Irene (2017): Towards an Agent-based Simulation of Building Stock Development for the City of Hamburg. In: 2017 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, 3/9/2017 - 6/9/2017: IEEE (Annals of Computer Science and Information Systems), S. 317–326.

Schuhmacher, Patrick; Stroh, Kilian; Schurig, Marlen; Ellerbrok, Charlotte; Ramonat Andreas; Link, Sascha (2015): "Masterplan 100 % Klimaschutz" - Frankfurt am Main - Generalkonzept. Fraunhofer IBP. Stuttgart.

Stieß, Immanuel; van der Land, Victoria; Birzle-Harder, Barbara; Deffner, Jutta (2010): Handlungsmotive, -hemmnisse und Zielgruppen für eine energetische Gebäudesanierung. Ergebnisse einer standardisierten Befragung von Eigenheimsanierern. Energieeffiziente Sanierung von Eigenheimen.