

GIS-BASIERTE ENERGETISCHE MODELLIERUNG UND SIMULATION VON STADTQUARTIEREN AUS DEM BESTAND AUF BASIS VON MODELICA

C. Nytsch-Geusen¹, D. Kreulitsch¹ und W. Kaul¹

¹Universität der Künste Berlin, Institut für Architektur und Städtebau, Berlin, Germany
Email: nytsch@udk-berlin.de , d.kreulitsch@udk-berlin.de, w.kaul@udk-berlin.de

KURZFASSUNG

Im Rahmen des Open eQuarter-Forschungsprojektes wurde ein GIS-basiertes Analysewerkzeug auf Grundlage von QGIS entwickelt, welches es ermöglicht, den thermischen Energiebedarf eines Stadtquartiers durch Auswertung allgemein verfügbarer georeferenzierte Gebäudeinformationen wie z.B. die Gebäudeumrisse, die Geschossanzahl und das Gebäudealter gebäudescharf zu analysieren. Bisher war dieser Ansatz noch auf Wohngebäude beschränkt.

Der Analyseumfang des Open eQuarter-Werkzeuges wurde nun durch energetische Gebäudeparameter für Nichtwohngebäude ergänzt. Die so erweiterten Parametersätze wurden genutzt, um mit Hilfe eines Codegenerators automatisch dynamische Stadtquartiersmodelle auf Basis von Modelica zu erzeugen und so Wärmelastprofile für Einzelgebäude als auch für ein gesamtes Stadtquartier zu berechnen.

Am Beispiel eines aus Wohn- und Nichtwohngebäuden bestehendes Stadtquartiers von ca. 500 Gebäuden aus dem Stadtzentrum von Berlin wurde die Prozesskette getestet. Hierbei wurde auch für ein ausgewähltes Wohngebäude, für welches mehrjährige Verbrauchsdaten vorliegen, eine gesonderte Simulationsanalyse zur Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse vorgenommen.

ABSTRACT

Within the Open eQuarter research project, a GIS analysis tool was developed based on QGIS which enables to analyse the building precise

thermal energy demand of a city district using open available geo-referenced building data, such as the building outlines, the number of storeys and the building age. Up to now, the approach was limited to residential buildings.

The analysis scale of the Open eQuarter tool was extended with energetic building parameters for non-residential buildings. The enhanced parameter set was used in order to automatically generate Modelica city district models for the calculation of thermal load profiles for individual buildings and the entire district.

With an example of a city district from the centre of Berlin, which includes approximately 500 residential and non-residential buildings, the process chain was evaluated. In addition, a simulation analysis for an individual building of the district, for which energy demand data are available, was performed for a plausibility check of the simulation results.

EINLEITUNG

Problemstellung

Ein Hauptproblem bei der Erstellung von energetischen Stadtquartiersmodellen besteht in der Beschaffung der hierfür notwendigen umfangreichen Parametersätze für den Gebäudebestand. Während sich die Verfügbarkeit georeferenzierter geometrischer Gebäudedaten durch die zunehmende flächendeckende Erstellung von 3D-Gebäudemodellen (LoD1 und zukünftig LoD2) kontinuierlich verbessert (DGfK, 2017), sind Angaben zu den energetischen Gebäudekennwerten (U-Werte der Gebäudefassade, der Fenster, des Dachs etc.) und zur Art der

Gebäudenutzung sowie zum Energieverbrauch grundsätzlich schwieriger zu gewinnen: in den meisten Stadtquartieren liegen heterogene Eigentümerstrukturen vor, weshalb diese Informationen somit verteilt sind. Ausnahmen stellen größere zusammenhängende Liegenschaften, wie z.B. der Gebäudebestand eines Hochschulcampus dar, bei denen die Gebäudeinformationen bei nur einem oder nur wenigen Eigentümern gebündelt vorliegen.

Stand der Forschung

Es wurden bisher verschiedene Ansätze zur gebäudescharfen energetischen Stadtquartiersanalyse auf Basis der dynamischen Gebäudesimulation entwickelt, wie z.B. das aus der Schweiz stammende CitySim (Perez et al., 2011), das im deutschen Forschungskontext entstandene SimStadt (Eicker et al., 2015) oder die beiden US-amerikanischen Tools UMI (Reinhardt et al., 2013) und Virtual PULSE (Heidarinejad et al., 2015). Zur Parametrierung der Gebäudemodelle nutzen diese Analysewerkzeuge meistens Archetypen für Wohn- und/oder Nichtwohngebäude, die sich i.d.R. auf den jeweils landestypischen Gebäudebestand beziehen. Die Gebäudeparameter (Geometrien, energetische Kennwerte etc.) werden bei dieser Art von Tools entweder manuell eingeben, aus 3D-Modellbeschreibungen wie CityGML gewonnen (SimStadt) oder aus Gebäudearchetypen auf Grundlage weniger Eingangsparameter wie die Gebäudenutzfläche und die Gebäudegeschossigkeit, wie z.B. mit dem Werkzeug TEASER abgeleitet (Remmen et al., 2017). Zur gebäudescharfen thermischen Gebäudesimulation werden in den genannten Ansätzen einerseits verbreitete Werkzeuge wie ESP-r und EnergyPlus, andererseits auch neu entwickelte reduzierte thermische Netzwerkmodelle mit wenigen Kapazitäten genutzt.

ZIELSETZUNG

Die Zielsetzung der hier beschriebenen Forschungsarbeiten bestand in der Realisierung einer automatisierten Prozesskette, welche eine GIS-basierte Datenerhebung und -verarbeitung mit der automatisierten Generierung und Parametrisierung vereinfachter dynamischer Gebäudemodelle auf Grundlage von Modelica verknüpfen soll, um auf diese Weise effizient gebäudescharfe und stadtquartiersbezogene thermische Bedarfsprofile erzeugen zu können.

METHODISCHER ANSATZ

Ausgangspunkt der Prozesskette ist der im Forschungsprojekt Open eQuarter entwickelte layer-basierte Ansatz (vgl. Abb. 1). Für das GIS-System QGIS haben die Autoren ein frei verfügbares Erweiterungsmodul entwickelt (https://github.com/UdK-VPT/Open_eQuarter), welches für jedes individuelle Gebäude eines definierten Stadtquartiers einen georeferenzierten Datensatz aus unterschiedlichen Informationslayern ermittelt. Auf dieser Basis werden für den Energiebedarf des Gebäudes relevante Merkmale abgeleitet: beispielweise wird von den beiden Informationslayern des Gebäudealters und des Gebäudetyps (z.B. Wohngebäude) auf die statistisch wahrscheinlich vorliegenden U-Werte der Baukonstruktion geschlossen (näheres hierzu in Nytsch-Geusen, Kaul, Wehage, Färber, 2016).

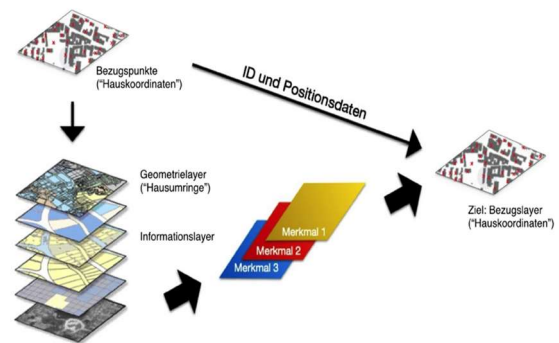


Abbildung 1: Layer-basierte Analyseverfahren von Open eQuarter

Der mit Open eQuarter gewonnene Datensatz für ein Stadtquartier wird als geojson-File exportiert. Das Werkzeug CoTeTo (Code Template Tool) liest dieses File, wertet die Quartiersinformationen aus und generiert und parametrisiert daraufhin Varianten von Stadtquartiermodellen auf Basis der Modelica-Bibliothek BuildingSystems. Anschließend kann mit einem Modelica-Werkzeug wie z.B. Dymola die Simulationsanalyse erfolgen (vgl. Abb. 2).

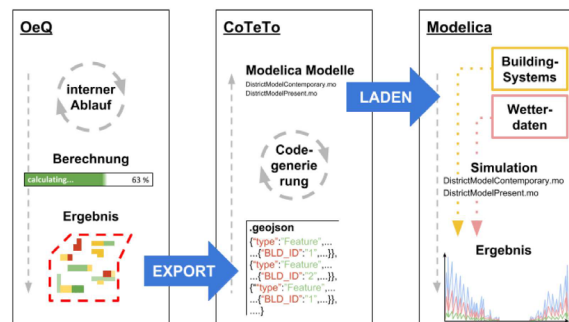


Abbildung 2: Methodischer Ansatz der Prozesskette zur Stadtquartierssimulation

Parametergewinnung über Open eQuarter

Derzeit decken im Open eQuarter-Tool die vorhandenen Informationslayer den größten Teil des Stadtraums von Berlin ab. Grundlage bilden zum einen die Datensätze des ALKIS-Objektartenkatalogs (ALKIS, 2018), aus denen z.B. die Hausumringe und die Geschoßanzahl, der Gebäudetyp und die Art der Gebäudenutzung bezogen werden. Zum anderen werden Karten zur Bevölkerungsdichte und zum Baualter des Gebäudebestands des Berliner Senatsservers verwendet (FIS-Broker, 2018). Aus der Kombination dieser Informationen werden baualtersabhängige statistische energetische Gebäudekenngrößen wie z.B. die U-Werte für Fassaden, Dächer, Fenster, Bodenplatte aus Lookup-Tabellen abgeleitet, wobei im ersten Entwicklungsschritt die vom IWU erhobenen Werte für die deutsche Wohngebäudetypologie verwendet wurden (Loga et al. 2015).

Erweiterung für Nichtwohngebäude

Innerhalb der Masterarbeit von Kreulitsch, 2018 wurden jetzt erstmals auch statistische energetische Gebäudekenngrößen für Nichtwohngebäude im Open eQuarter-Tool implementiert, wobei auf Werte des GEMOD-Gebäudemodells für Nichtwohngebäude zurückgegriffen wurde (Jochum et al., 2012). Hierdurch wird erstmals die energetische Analyse von Stadtquartieren, welche nun einen Mischbestand von Wohn- und Nichtwohngebäuden aufweisen können, in der Prozesskette möglich.

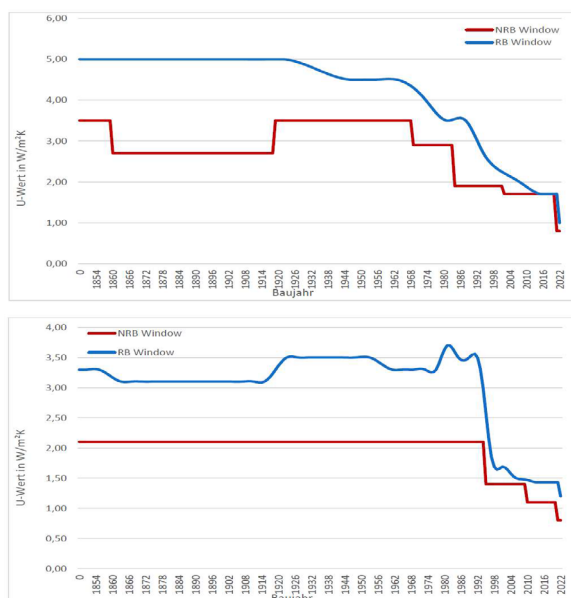


Abbildung 3: Open eQuarter-Funktionen statistisch wahrscheinlicher U-Werte der Fenster für Wohngebäude (RB) u. Nichtwohngebäude (NRB) zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung (oben) und zum heutigen Zeitpunkt (unten)

Abb. 3 zeigt exemplarisch die von Open eQuarter genutzten baualtersabhängigen Funktionen für die statistischen U-Werte der Fenster für Wohngebäude und für Nichtwohngebäude zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung und zum heutigen Zeitpunkt unter Einbeziehung der wahrscheinlichen Gebäudesanierung.

Dynamische Stadtquartierssimulation auf Basis von Modelica

Zur Berechnung der Wärmelastprofile der einzelnen Gebäude eines Stadtquartiers kommt ein vereinfachtes thermisches einzoniges Gebäudemodell auf Basis der Modelica-Bibliothek BuildingSystems (Nytsch-Geusen et al., 2016) zum Einsatz. In diesem Gebäudemodell, welches genauer in Nytsch-Geusen et al., 2015 beschrieben wird, werden alle außenluftberührenden opaken Bauteile, alle an den Gebäudeuntergrund angrenzenden Bauteile und alle innenliegenden Bauteilmassen (Wände, Zwischengeschosdecken) jeweils über eine thermische Ersatzkapazität abgebildet. In diesem Gebäudemodell können eine variable Anzahl von Fenstern unterschiedlicher Orientierung genutzt werden, im vorliegenden Anwendungskontext sind es vier Fenstermodelle für die vier Haupthimmelsrichtungen.

Modelica-Codegenerierung für Stadtquartiere

Ausgehend von den in Open eQuarter gewonnenen und als geojson-File exportierten Datensätzen für ein Stadtquartier werden mit Hilfe des frei verfügbare Tools CoTeTo (<https://github.com/UdK-VPT/CoTeTo>) zur Codegenerierung die notwendigen geometrischen, wärmetechnischen und nutzungsspezifischen Parameter für die Modelica-Gebäudemodelle bestimmt und der entsprechende Modelica-Code automatisch erzeugt. Die Prozesskette der Modelica-Codegenerierung über CoTeTo für Zwecke der energetischen Gebäudesimulation wird in Nytsch-Geusen et al., 2017 detailliert beschrieben.

Zur Parametrisierung der Gebäudegeometrie (Fassaden- und Dachfläche, Bodenplatte) werden in Open eQuarter für jedes Gebäude zunächst das ALKIS-Polygon seines Hausumrings (Gebäudeaußenmaße) auf ein Rechteck gleicher Fläche umgerechnet. Die Außenmaße dieses Rechtecks werden um die mittlere Dicke der Fassadenkonstruktion reduziert (Wärmeverlustflächen als Mittelwert zwischen Innen- und Außenmaßbezug). Unter

Verwendung der Anzahl der beheizten Geschosse und Annahme einer mittleren Geschosshöhe wird dieses reduzierte Rechteck danach vertikal zur Bestimmung der Fassadenfläche extrudiert.

Zur Berücksichtigung sich berührender Wände von benachbarten Gebäuden wurde ein Flächenreduktionsfaktor eingeführt. Dieser wird auf Basis der Hausumringe (für jedes Gebäude ein geschlossenes Polygon mit m Kanten) und unter Berücksichtigung der potentiell unterschiedlichen Geschossigkeit zweier aneinandergrenzender Gebäude i und j für jedes i -te Gebäude wie folgt berechnet:

$$f_{red,i} = \sum_{j=1}^{j=n} \sum_{k=1}^{k=m} \frac{\text{commonedge}_{i,j,k} \cdot \min\left(\frac{nSto_j}{nSto_i}, 1.0\right)}{\text{perimeter}_{\text{polygon},i}} \quad (1)$$

Hierbei ist $\text{commonedge}_{i,j,k}$ die Länge der k -ten gemeinsamen Linie zwei sich berührender Kanten des Polygons i des aktuellen Gebäudes und des Polygons j des angrenzenden Gebäudes, welche die n benachbarten Gebäude repräsentieren und $\text{edge}_{i,k}$ die Länge der k -ten Kante des Polygons des i -ten Gebäudes, für den der Flächenreduktionsfaktor bestimmt wird. Es wird weiterhin angenommen, dass im benachbarten angrenzenden j -ten Gebäude die gleiche Innenraumtemperatur vorliegt wie im betrachteten i -ten Gebäude, weshalb die gemeinsamen Flächen benachbarter Gebäude als adiabat betrachtet werden (vgl. Abb. 4).

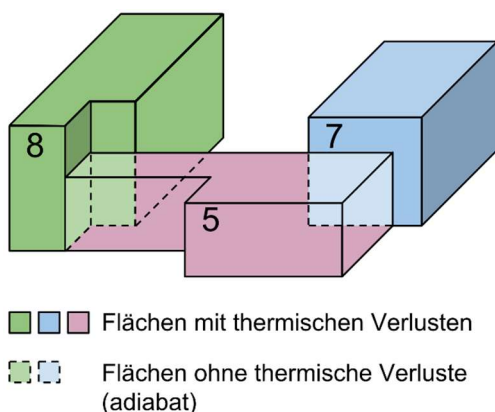


Abbildung 4: Berücksichtigung angrenzender Gebäude für den Wärmeverlust über einen Flächenreduktionsfaktor

Die extrudierte Wandfläche wird mit dem Flächenreduktionsfaktor multipliziert und mit dem vom Gebäudealter abhängigen Fensterflächenanteil reduziert, wodurch sich die opaken und transparenten Fassadenflächen ergeben.

Die beheizte Wohnfläche wird über die Bruttogeschosshöhe über einen Minderungs-

faktor von 0,75, wie er in Loga et al., 2015 als statistisches Mittel für Wohngebäude erhoben wurde, reduziert. Für die Fläche der Bodenplatte, der Einzelgeschosse und des Daches, welches vereinfachend als Flachdach angenommen wird, wird jeweils die gleiche reduzierte Rechteckfläche angenommen, wodurch ein systematischer Geometriefehler bei Gebäuden mit abweichender Geschosshöhe entsteht.

Die wärmetechnischen Kenngrößen (U-Werte) werden wie weiter oben beschrieben aus den baualtersabhängigen Funktionen für Wohngebäude und Nichtwohngebäude bestimmt. Es können für jedes Gebäude wahlweise Datensätze für seine Energieeffizienz zum Zeitpunkt der Gebäudeerrichtung, zum derzeitigen Zeitpunkt und für die Annahme einer energetischen Sanierung nach der aktuellen EnEV 2016 erzeugt werden.

Zur Abbildung eines differenzierten Nutzerverhaltens werden aus den ALKIS-Informationen zur Gebäudenutzung für die Gebäudemodelle individuelle Annahmen zur Soll-Heiz-Temperatur, für die inneren Wärmequellen und den Außenluftwechsel getroffen, die als Funktionen im CoTeTo-Codegenerator implementiert sind.

ANWENDUNGSBEISPIEL

Altbauviertel in Berlin-Pankow

Im Anwendungsfall wird ein vorwiegend durch fünf- bis sechsgeschossige Wohngebäude dominiertes Altbauviertel im Berliner Bezirk Pankow zum Testen der Prozesskette analysiert. Es handelt sich um das Winsviertel mit insgesamt 524 Gebäuden, welches eines der drei zentralen Wohnviertel in Berlin-Prenzlauer Berg darstellt.

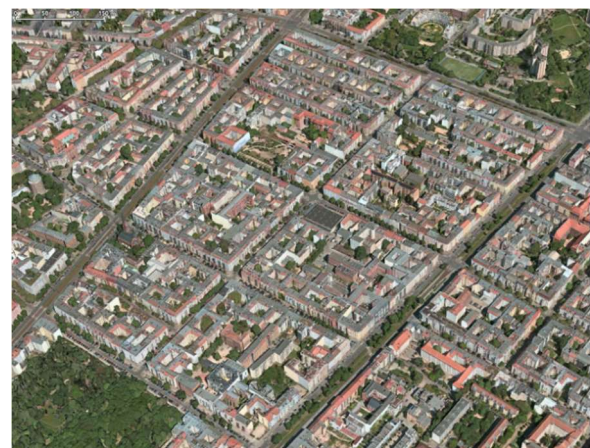


Abbildung 5: Altbau-Stadtquartier „Winsviertel“ im Berliner Bezirk Pankow (Quelle: Apple Maps)

Der Gebäudebestand verteilt sich zu 73 Prozent auf Wohngebäude und zu 27 Prozent auf Nichtwohngebäude (nähere Differenzierungen der Gebäudenutzung siehe in Abb. 6 und Abb. 7).

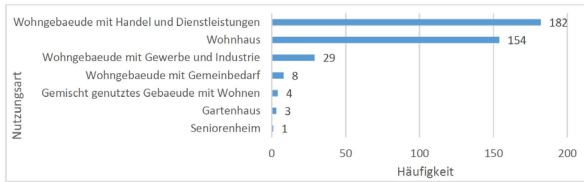


Abbildung 6: Gebäudenutzung der Wohngebäude

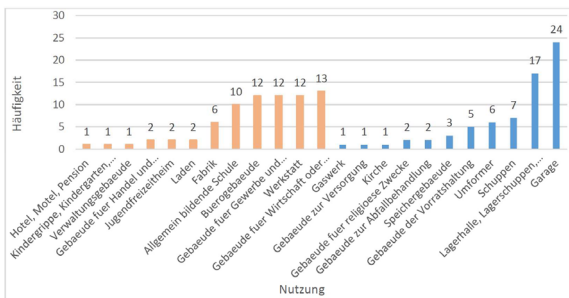


Abbildung 7: Gebäudenutzung der Nichtwohngebäude (orange beheizt, blau unbeheizt)

Der Großteil des Gebäudebestands wurden in den Baualtersklassen 1870-1899 und 1900-1918 errichtet, nur wenige Gebäude wurden in der Nachkriegszeit gebaut bzw. in den letzten 15 Jahren als Neubauten ergänzt (vgl. Abb. 8).

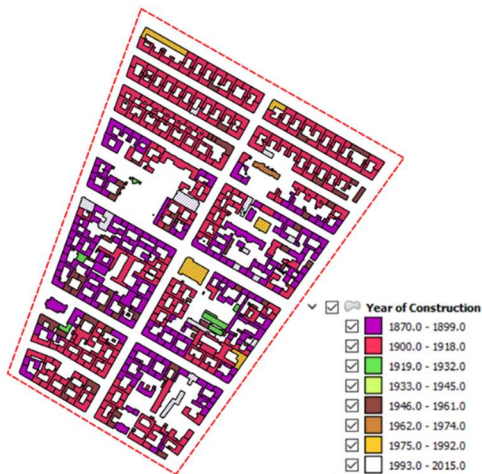


Abbildung 8: Baualtersverteilung des untersuchten Stadtquartiers „Winsviertel“

Von den insgesamt 524 Gebäuden des Stadtquartiers werden bei der Analyse auf Grund der in ALKIS enthaltenen Angaben zum jeweiligen Gebäudetyp insgesamt 69 als thermisch nicht konditioniert (Garagen, Transformatorenhäuschen, Lagerhallen etc.) automatisch in CoTeTo aussortiert und somit nur noch 455 als beheizt angenommen und in der Simulationsanalyse weiter betrachtet. In Abb. 9 ist der Flächenreduktionsfaktor für die

Außenfassade der beheizten Gebäude nach aufsteigender Größe sortiert dargestellt. Das sich ergebende Profil zeigt die typische verdichtete Bebauung des Berliner Altbauviertels: Nur 27 Gebäude (ca. 6 Prozent) sind freistehend, 53 Gebäude (ca. 12 Prozent) grenzen bis zu 20 Prozent, 363 Gebäude (ca.80 Prozent) zu 20 bis 60 Prozent und die restlichen 12 Gebäude (ca. 3 Prozent) mit mehr als 60 Prozent mit den Flächen ihrer Außenwände an benachbarte Gebäude an.

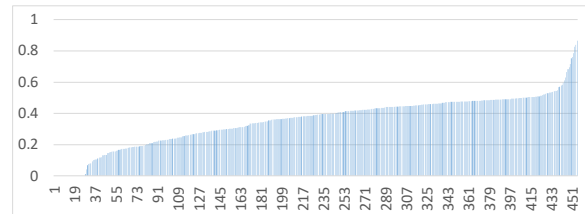


Abbildung 9: Flächenreduktionsfaktor des untersuchten Stadtquartiers „Winsviertel“

Vergleichend hierzu wurde für ein weiteres Wohnviertel in Berlin-Karlshorst mit einer eher lockeren, überwiegend zwei- bis dreigeschossigen Bebauung (vgl. Abb. 10) der Flächenreduktionsfaktor von 428 Gebäuden berechnet.

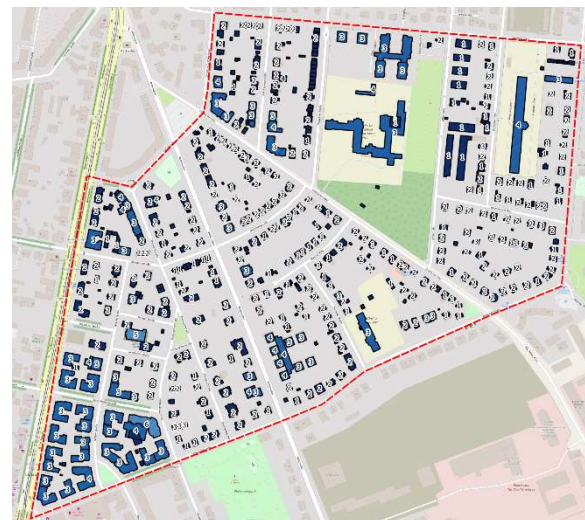


Abbildung 10: Stadtquartier in Berlin-Karlshorst

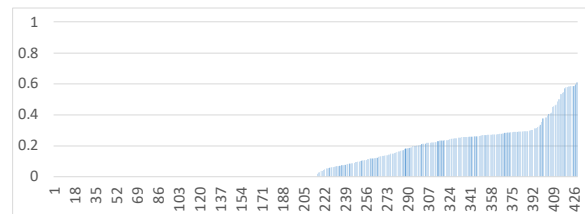


Abbildung 11: Flächenreduktionsfaktor des Stadtquartiers in Berlin-Karlshorst

Das Profil der Flächenreduktionsfaktoren in Abb. 11 verdeutlicht klar die stark reduzierte Dichte der Siedlungsstruktur im Vergleich zum sehr dicht bebauten Winsviertel. 215 Gebäude (ca. 50 Prozent) sind völlig freistehend und die sich

berührenden Gebäude zeigen einen erheblich niedrigeren mittleren Flächenreduktionsfaktor von 0,238 im Vergleich zum Winsviertel mit 0,377 in Berlin-Pankow.

Analyse eines Einzelgebäudes

An Hand eines für das Winsviertel typischen Berliner Altbaugeschäftes, einem 1905 erbauten fünfgeschossigen Wohngebäude, wurde die Berechnungsmethode auf ihre Plausibilität überprüft. Das Gebäude wurde 2002 saniert, zu einem Zeitpunkt als die EnEV 2002 gerade noch nicht zur Anwendung kam. Im Rahmen der Gebäudesanierung wurde mit dem Dachgeschoßausbau ein sechstes beheiztes Geschoß ergänzt. Für das sanierte Gebäude liegen den Autoren die genaue Angabe der beheizten Wohnfläche, für den Zeitraum 2004 bis 2017 jährliche Heizenergieverbräuche sowie weitere Informationen zur energetischen Qualität der Gebäudehülle vor.

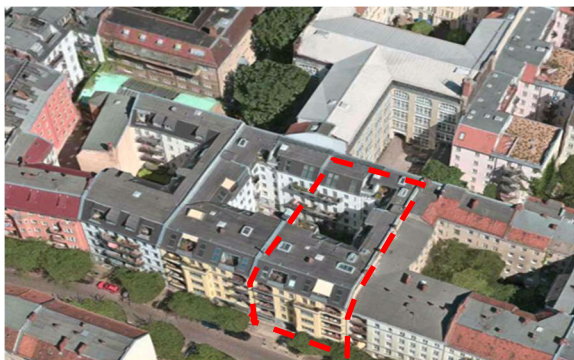


Abbildung 12: Untersuchtes Altbaugeschäftes im Stadtquartier „Winsviertel“

Das Gebäude grenzt zu mehreren Seiten an Nachbargebäude an (vgl. Abb. 12) und besitzt eine beheizte Wohnfläche von 1.854,5 m². Nach Gleichung (1) ergibt sich für das Gebäude ein Flächenreduktionsfaktor von 0,444, welcher für eine dichte Bebauung steht und etwas höher als der Mittelwert des Wohnviertels (vgl. Abb. 9) liegt. Auf Grundlage des Gebäudealters bestimmt Open eQuarter einen Fensterflächenanteil der Fassaden von 29,4 Prozent.

Für die Simulationsanalyse des Wohngebäudes wurde für das Modelica-Modell des Wohngebäudes über Open eQuarter und CoTeTo der Eingangsparametersatz zunächst ohne weitere Kenntnis des realen Gebäudes bestimmt, wobei eine mittlere Geschoßhöhe von 3,3 m, eine mittlere Fassadendicke von 0,4 m und eine Zwischengeschoßdicke von 0,4 m angenommen wurde (Tabelle 1, linke Spalte). Das 2002 ausgebauten Dachgeschoss ist in den

aktuellen ALKIS-Werten nicht enthalten und führt so zu einer Unterschätzung der beheizten Wohnfläche.

Zusätzlich wurde für das gleiche Modelica-Gebäudemodell noch ein zweiter Eingangsparametersatz nach dem „Kurzverfahren Energieprofil“ des IWU (Loga et al., 2005) bestimmt (Tabelle 1, rechte Spalte). Hierfür sind allerdings weitere Angaben des realen Gebäudes notwendig, welche für das analysierte Gebäude zur Verfügung standen:

- Anzahl der beheizten Vollgeschosse: 5 plus 0,75 für voll beheiztes Dachgeschoss
- direkt angrenzende Nachbargebäude: auf zwei Seiten
- Wohnungsanzahl: 18
- beheizte Wohnfläche: 1854,5 m²
- Baujahr: 1905
- lichte Raumhöhe: hoch
- Grundriss: gewinkelt
- Keller: Kellergeschoss unbeheizt
- Konstruktionsart: massiv
- nachträgliche Dämmung: Dachfläche 15 cm zu 100 Prozent; Außenwände u. Kellerdecke: keine Dämmung
- Fenster: 2-Scheibenverglasung, eingebaut im Jahr 2002

Tabelle 1: Parametrisierung des Einzelgebäudes

	Open eQuarter	Energieprofil IWU
Geschoßanzahl	5 (ALKIS)	5,75
beheizte Wohnfläche A _{WO} [m ²]	1668,7	1854,5
Dachfläche A _{DA} [m ²]	418,8	483,7
Außenwandfläche A _{AW} [m ²]	681,1	1169,9
Fensterfläche A _{FE} [m ²]	355,3	370,8
Bodenfläche A _{BO} [m ²]	418,8	428,8
U-Wert Außenwand [W/m ² K]	1,83	1,70
U-Wert Dach in [W/m ² K]	1,23	0,24
U-Wert Bodenplatte [W/m ² K]	1,20	1,20
U-Wert Fenster [W/m ² K]	3,10	1,90

Als Randbedingung für die Simulation wurde von CoTeTo für die vorliegende Nutzungsart eines Wohngebäudes eine mittlere Soll-Heiztemperatur von 19 °C, eine mittlere Luftwechselrate von 0,5 1/h und mittlere interne Wärmequellen von 4,16 W pro m² beheizte Nutzfläche festgelegt. Die Temperatur unter der Bodenplatte wird ganzjährig mit 10 °C angenommen und als Wetterdaten ein Meteororm-Datensatz für den Standort Berlin-Tempelhof gewählt. Abbildung 13 zeigt den simulierten jährlichen Heizwärme-

bedarf für insgesamt 6 Varianten im Vergleich zum realen Heizwärmeverbrauch.

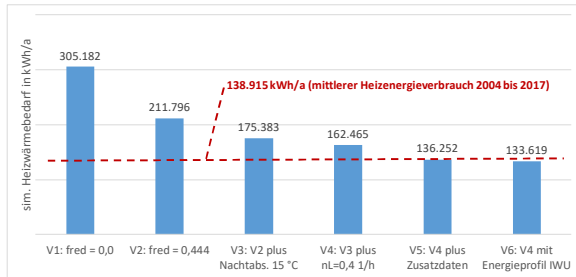


Abbildung 13: Varianten des simulierten Heizwärmebedarfs im Vergleich zum mittleren Heizenergieverbrauch 2004-2017

Variante V1 nutzt den Parametersatz aus Open eQuarter/CoTeTo ohne Berücksichtigung und Variante V2 mit Berücksichtigung des Flächenreduktionsfaktors. In zwei weiteren Varianten wurde das Nutzerverhalten schrittweise näher an reale Verhältnisse angepasst, indem zunächst eine Nachtabsenkung der Sollheiztemperatur von 19 °C auf 15 °C zwischen 8-22 Uhr (Variante V3) und danach zusätzlich eine Reduzierung des mittleren Luftwechsels $0,4 \text{ h}^{-1}$ (Variante V4) eingeführt wurde. In Variante V6 wird das in V4 definierte Nutzerverhalten mit den Gebäudeparameterwerten des Kurzverfahrens Energieprofil IWU (Tabelle 1, rechte Spalte) kombiniert. In der Variante V5 wurden für einige Gebäudeparameter, die in Open eQuarter automatisch ermittelt werden, mit Hilfe bekannter Gebäudeinformationen folgende genauere Annahmen getroffen:

- voll ausgebautes und beheiztes Dachgeschoss (Annahme: 5,75 Geschosse)
- U-Wert sanierte Fenster = $1,4 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U-Wert ungedämmte Fassade = $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
- U-Wert gedämmtes Dach = $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$

Gesamtanalyse Stadtquartier

Bei der Gesamtanalyse wurde das Stadtquartier in vier Teilgebiete aufgeteilt, um die Simulation durch parallele Berechnung zu beschleunigen. Für alle Gebäude wurde der Flächenreduktionsfaktor berechnet und angewandt. Da für die anderen Gebäude des Stadtquartiers keine Detailangaben vorliegen, wurden alle Parameter über Open eQuarter und CoTeTo automatisch erzeugt, was der Variante V2 in Abb. 13 entspricht. Abbildung 14 zeigt das aggregierte Wärmelastprofil für die gesamte Population des Wmsviertels von insgesamt 455 beheizten Wohn- und Nichtwohngebäuden. Die maximale Heizlast liegt bei 35,4 MW und der jährliche Heizwärmebedarf beträgt insgesamt 82 GWh.

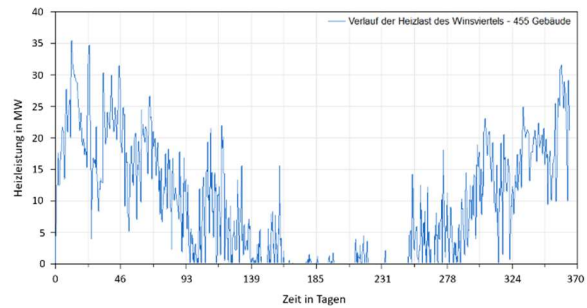


Abbildung 14: Simuliertes Wärmelastprofil des Wmsviertels

ERGEBNISANALYSE UND DISKUSSION

Analyse des Einzelgebäudes: Wie der Vergleich des berechneten jährlichen Heizwärmebedarfs der Varianten V1 und V2 mit dem mittleren witterungsbereinigten jährlichen Heizenergieverbrauch der Jahre 2004 bis 2017 zeigt, kann die größte Verbesserung der Rechengenauigkeit eindeutig durch die Einführung des Flächenreduktionsfaktors erreicht werden (V1: 119 Prozent, V2: 52 Prozent oberhalb des gemessenen Verbrauchs). Die zusätzliche Nachtabsenkung auf 15 °C (V3) reduziert den jährlichen Heizwärmebedarf auf einen Wert von 26 Prozent und die weitere Reduzierung des Luftwechsels (V4) um $0,1 \text{ h}^{-1}$ auf einen Wert von 16 Prozent oberhalb des gemessenen Wertes. Bei Nutzung zusätzlicher Gebäudeinformationen (V5) wird die Verbrauchswert in der Simulation nahe identisch (minus 2 Prozent) wiedergeben. Der Parameterdatensatz des Energieprofils IWU in Kombination mit den gleichen Annahmen zum Nutzerverhalten (V6) der Variante V4 führt zu einem sehr ähnlichen berechneten Bedarf wie Variante V5.

Gesamtanalyse Stadtquartier: Die Güte des Wärmelastprofils für das Gesamtquartier lässt sich ohne flächendeckende Verbrauchswerte derzeit nicht validieren. Es ist aber zumindest für den Anteil der Wohngebäude im Stadtquartier, die eine ähnliche Gebäudesubstanz und ein ähnliches Nutzerverhalten aufweisen, davon auszugehen, dass die simulierten Heizenergiebedarfe in einer ähnlich guten Genauigkeit berechnet werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Mit der Kombination aus Open eQuarter, CoTeTo und dem vereinfachten Modelica-Gebäudemodell zu einer gemeinsamen Prozesskette lassen sich Stadtquartiersmodelle innerhalb des Berliner Stadtraums definieren, vollständig automatisch parametrieren und Wärmelastprofile

berechnen, welche gemessenen Verbräuchen einzelner Gebäude nahekommen.

Zukünftige Arbeiten an der Prozesskette werden sich auf eine weitere Verbesserung des Geometriemodells (z.B. Nutzung von Informationen aus CityGML-Modellen), der weiteren Differenzierung des Nutzerverhaltens bei den Nichtwohngebäuden sowie auf weitere Vergleiche mit Energieverbrauchswerten aus ausgewählten Stadtquartieren konzentrieren.

LITERATUR

ALKIS, Homepage Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (Adv): <http://www.adv-online.de>

DGfK 2017. Workshop 3D-Stadtmodelle 2017: siehe unter <http://www.3d-stadtmodelle.org>, Bonn, Deutschland.

Eicker, U.; Schumacher, J.; Zirak, M.; Bartke, N.; Nouvel, R.; Coors, V. 2015. An Automated Method for Urban Energy Simulation based on 3D City Models. Conference proceedings Building Simulation 2015, Hyderabad, Indien.

FIS-Broker. Datenserver der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen: <https://fbinter.stadt-berlin.de/fb/index.jsp>

Heidarinejad, M.; Mattise, N. W.; Dahlhausen, M.; Nikkho, S. K.; Liu, J.; Gracik, S.; Liu, K.; Sharma, K.; Zhang, H.; Wentz, J. R.; Roudsari, M. S.; Pitchurov, G.; Srebric, J. 2015. Urban ScaleModeling of Campus Building using Virtual PULSE. Conference proceedings Building Simulation 2015, Hyderabad, Indien.

Jochum, P., Mellwig, P.; Bübül, F.; Jarling, M.; Kelavic, M. 2012. Technische Restriktionen bei der energetischen Modernisierung von Bestandsgebäuden. Endbericht: Beuth Hochschule für Technik Berlin, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg, Deutschland.

Kreulitsch, D. 2018. GIS-basierte energetische Modellierung und Simulation von aus Wohn- und Nichtwohngebäuden bestehenden Stadtquartieren auf Basis von Modelica. Masterarbeit, Beuth-Hochschule Berlin, Berlin, Deutschland.

Loga, T.; Nikolaus Diefenbach, N.; Knissel, J.; Born, R. 2005. Entwicklung eines vereinfachten, statistisch abgesicherten Verfahrens zur Erhebung von Gebäudedaten für die Erstellung des Energieprofils von Gebäuden.

Forschungsbericht Institut für Wohnen und Umwelt. Darmstadt, Deutschland.

Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R. 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Zweiter erweiterte Auflage. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Deutschland.

Nytsch-Geusen, C.; Kaul, W.; Wehage, P.; Färber, M. 2016. Nachhaltige und energieeffiziente Bestandsentwicklung von Stadtquartieren – Entwicklung eines Analyse- und Planungstools zur energetischen Bewertung und Sanierung von Stadtquartieren (Open eQuarter), Forschungsbericht. Universität der Künste Berlin, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland.

Nytsch-Geusen, C.; Inderfurth, A.; Kaul, W.; Rädler, J.; Thorade, M.; Tugores, C. R. 2017. Template based code generation of Modelica building energy simulation models, Proceedings Modelica Conference 2017, Prag, Tschechien.

Nytsch-Geusen, C.; Kaul, W. 2015. Generation of dynamic energetic district models from statistical relationships. Proceedings Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien.

Nytsch-Geusen, C.; Banhardt, C.; Inderfurth, A.; Mucha, K.; Möckel, J.; Rädler, J.; Thorade, M.; Tugores, C. 2016. BuildingSystems – Eine modular hierarchische Modell-Bibliothek zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation. BAUSIM 2016. Conference Proceedings. Dresden, Deutschland.

Perez, D.; Kämpf, J.; Wilke, U.; Papadopoulo, M.; Robinson, D. 2011. CitySim simulation: The case study of Alt-Wiedikon, a neighbourhood of Zürich city. Proceedings CISBAT 2011, Lausanne, Schweiz.

Reinhart, C.; Dogan, T.; Jakubiec, J. A.; Rakha, T.; Sang, A. 2013. UMI – An Urban Simulation Environment for Building Energy Use, Daylighting and Walkability. Conference proceedings Building Simulation 2013, Chambery, Frankreich.

Remmen, P., Lauster, M.; Mans, M.; Fuchs, M.; Osterhage, T. 2017. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. Journal of building performance simulation, Band: 10, Ausgabe: 4, Seiten: 1-15.