

# ÜBERTRAGBARE METHODEN ZUR BESTIMMUNG UND RÄUMLICHEN VERORTUNG DES WÄRMEBEDARFS VON WOHNGBÄUDEN IN STÄDTEN

K. Mainzer<sup>1</sup>, R. McKenna<sup>1</sup> und W. Fichtner<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Energiewirtschaft, IIP, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, Germany  
 Kontakt: kai.mainzer@kit.edu

## KURZFASSUNG

Modellierer von städtischen Energiesystemen stehen häufig vor der Herausforderung fehlender Daten. Dieser Beitrag stellt daher zwei Ansätze vor, die zur Wärmebedarfsberechnung des Wohngebäudebestands einer Stadt genutzt werden können: Eine Top-Down Methode zur Abschätzung des gesamten städtischen Endenergiebedarfs und eine Bottom-Up Methode zur detaillierten Simulation des Wärmebedarfs der Wohngebäude. Eine Anwendung beider Methoden auf mehrere Städte demonstriert deren Übertragbarkeit und ermöglicht sowohl den Vergleich beider Ansätze, als auch eine Einschätzung der Genauigkeit. Eine detailliertere Analyse der Ergebnisse der Bottom-Up Methode demonstriert die zeitliche und räumliche Auflösung und die Eignung der Methode für die Energiesystemmodellierung.

## ABSTRACT

Modellers of urban energy systems are often faced with the challenge of missing data. This article therefore presents two approaches that can be used to calculate the heat demand of a city's residential building stock: A top-down method for estimating the overall final urban energy demand and a bottom-up method for detailed simulation of the heat demand of residential buildings. The application of both methods to several cities demonstrates their transferability and allows a comparison of both approaches as well as an assessment of their accuracy. A more detailed analysis of the results of the bottom-up method demonstrates the temporal and spatial resolution and the suitability of the method for energy system modelling.

## EINLEITUNG

Für die Analyse und Optimierung von städtischen Energiesystemen stehen Modellierer häufig vor der Herausforderung, dass die dafür benötigten Energieverbrauchsdaten nicht bekannt sind. Dies gilt insbesondere für den Wärmebedarf, da Wärme als Energieträger dezentral erzeugt und verbraucht wird und auch den Energieversorgern häufig keine genauen Informationen zur Struktur des Wärmebedarfs vorliegen.

Ziel dieses Beitrags ist daher die Vorstellung von übertragbaren Methoden zur Abschätzung des Wärmebedarfs von Wohngebäuden, z. B. für die Verwendung in optimierenden Energiesystemmodellen. Der Umfang der Analysen (Städte oder Quartiere) ist dabei so groß, dass eine detaillierte Abbildung des thermodynamischen Verhaltens der Einzelgebäude, insbesondere aufgrund der fehlenden Verfügbarkeit von detaillierten Informationen zur Geometrie und den Baumaterialien jedes einzelnen Gebäudes, nicht möglich ist. Daher sollen in diesem Beitrag zwei Ansätze zur Wärmebedarfsermittlung mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorgestellt und miteinander verglichen werden.

## METHODIK

### Top-Down-Endenergiebedarfsschätzung

Die hier vorgestellte Methode soll eine vereinfachte Abschätzung des Endenergiebedarfs einer Stadt oder Gemeinde in allen Sektoren ermöglichen, ohne einzelne Prozesse explizit abzubilden. Die hierbei gewählte Vorgehensweise baut auf Mainzer et al. (2014, Abschnitt 3.4) auf und basiert auf der

Annahme, dass der Energiebedarf einer Region mit ausgewählten sozio-ökonomischen Indikatoren korreliert. Da sowohl der Energiebedarf, als auch die entsprechenden Indikatoren auf nationaler Ebene bekannt sind (BMW 2017; Destatis 2017), kann der regionale Energiebedarf anhand der relativen Größe dieser Indikatorwerte von der nationalen auf die regionale Ebene heruntergebrochen werden („Top-Down Skalierung“).

Hierfür werden insgesamt 10 sozio-ökonomische Indikatoren als Maß für die relative Größe für jeden der vier Sektoren Haushalte (HH), Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), Industrie (IND) und Verkehr (VK) herangezogen. Die Gewichtungsmatrix  $w_{s,i}$  (Tabelle 1) gibt an, wie stark jeder Indikator  $i$  für die Berechnung der Größe eines Sektors  $s$  gewichtet wird. Diese Gewichte wurden bestimmt, indem der mittlere quadratische Fehler bei Anwendung der hier beschriebenen Methode im Vergleich zu gemessenen Verbrauchswerten minimiert wurde. Hierfür wurden 17 deutsche Gemeinden betrachtet, für die nach Sektoren aufgetrennte Verbrauchswerte veröffentlicht wurden (Energieagentur RLP 2017, Stadt Karlsruhe 2012, Neumann et al. 2012).

Tabelle 1: Gewichtungsmatrix  $w_{s,i}$ , die jedem Indikator  $i$  ein Gewicht zur Berechnung der Größe des Sektors  $s$  zuordnet.

Indikatoren	Sektoren			
	HH	GHD	IND	VK
Fläche	0,074	0,000	0,786	0,279
Einwohner	0,925	0,958	0,168	0,209
Anzahl zugelassener PKW	0,000	0,000	0,000	0,269
Anzahl zugelassener KfZ	0,000	0,000	0,000	0,236
Wohngebäude	0,000	0,000	0,000	0,008
Industriebetriebe	0,000	0,000	0,015	0,000
Industriebeschäftigte	0,000	0,000	0,010	0,000
Bruttoentgelte in der Industrie	0,000	0,000	0,012	0,000
Sozialversicherungspflichtig Beschäftigte	0,000	0,042	0,007	0,000
Beschäftigte im Bereich GHD	0,000	0,000	0,002	0,000

Der Endenergiebedarf  $EED_{m,s,ec}$  nach Energieträger  $ec$  in Sektor  $s$  der Gemeinde  $m$  berechnet sich somit durch Anwendung der Gewichtungsmatrix  $w_{s,i}$  auf das Verhältnis der regionalen ( $IV_{m,i}$ ) zu den nationalen ( $IV_{N_i}$ ) Werten aller Indikatoren  $I$ . Der so berechnete Wert (der als „Sektorgroße“ für diese Gemeinde

interpretiert werden kann) wird dann als Skalierungsfaktor für den entsprechenden nationalen Endenergiebedarf  $EED_{N,s,ec}$  verwendet:

$$EED_{m,s,ec} = EED_{N,s,ec} * \sum_{i \in I} w_{s,i} * \frac{IV_{m,i}}{IV_{N_i}}$$

Diese Methode kann somit verwendet werden, um einen schnellen Überblick über die Struktur des Energiebedarfs einer Region zu gewinnen und um die Methoden zur Wärmebedarfsberechnung des Wohngebäudesektors einer Gemeinde (s. u.) zu validieren. Für diesen Vergleich wird aus dem Ergebnis  $EED_{m,s,ec}$  einer Gemeinde  $m$  der gesamte Endenergiebedarf des Haushaltssektors ( $s = HH$ ) und die Summe der Energieträger, die der Wärmeversorgung zugerechnet werden ( $ec = \{Gas, Kohle, Öl, Fernwärme, Erneuerbare\}$ ), verwendet.

### Bottom-Up Modellierung des Wärmebedarfs der Wohngebäude

Zur Modellierung des Wohngebäudebestands einer Gemeinde wird ein Ansatz verwendet, der Geodaten mit statistischen Gebäudebestandsdaten und einer Gebäudetypologie kombiniert. Hierfür wird zunächst aus der Zensusdatenbank der Statistischen Ämter des Bundes und der Länder (Destatis 2014) die Anzahl der Wohngebäude sowie deren Häufigkeitsverteilung über 10 Alters- und 10 Gebäudegrößenklassen für jede 1 km<sup>2</sup>-Rasterzelle innerhalb des Untersuchungsgebietes bezogen und daraus eine Häufigkeitsverteilung nach TABULA-Gebäudetypen (IWU 2016) erstellt. Anschließend werden alle Gebäude aus OpenStreetMap (OSM 2018) innerhalb einer Rasterzelle zu einer der dort vorhandenen TABULA-Gebäudetypen klassifiziert. Für diese Klassifizierung werden zwei Merkmale berücksichtigt: Tags, die auf Wohn- (z. B. „residential“, „house“, „apartments“, o.ä.) bzw. Nichtwohngebäude (z. B. „garage“, „industrial“, „commercial“) schließen lassen, sowie die Grundfläche des Gebäudes. Das Gebäude wird dann demjenigen TABULA-Gebäudetyp zugeordnet, dessen mittlere Grundfläche (die aus den Parametern der TABULA Typologie bekannt ist) am geringsten von der tatsächlichen Grundfläche des Gebäudes abweicht. Abbildung 1 visualisiert die

Zuordnung von Gebäudegrundrissen zu den statistischen Daten der Rasterzellen.

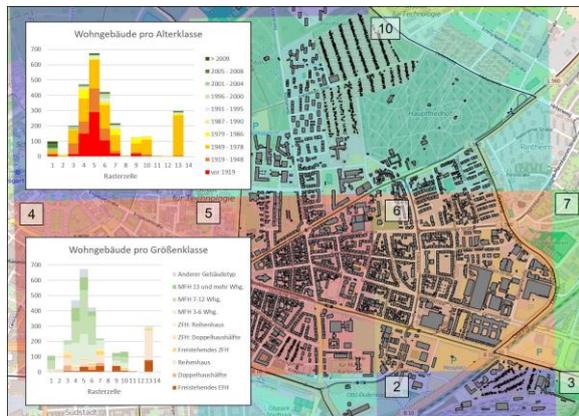


Abbildung 1: Zuordnung von Gebäuden aus OpenStreetMap (grau) zu statistischen Gebäudebestandsdaten (farbige Quadrate). Quelle: Eigene Darstellung mit Daten von OSM und Zensus2011.

Gebäude, die aufgrund ihrer Tags oder aufgrund der für Wohngebäude ungewöhnlichen Größen als Nichtwohngebäude klassifiziert wurden, werden keinem der TABULA-Gebäudetypen zugeordnet und im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Falls in OSM zu wenige Gebäudetypen vorhanden sind (unvollständige Datenlage), werden die fehlenden Gebäude mit Standardwerten aus der Gebäudetypologie und ohne geografische Koordinaten erzeugt.

Als Ergebnis dieser Vorgehensweise ist jedes Gebäude innerhalb der betrachteten Region einem Gebäudetyp zugeordnet und somit der gesamte statistische Wohngebäudebestand geografisch verortet.

Anschließend wird für jeden Gebäudetyp der Wärmebedarf im Jahresverlauf bestimmt. Dabei kann zunächst eine optionale Anpassung der spezifischen Gebäudeparameter der verwendeten Gebäudetypologie vorgenommen werden, falls genauere Informationen über den lokalen Gebäudebestand vorliegen. Diese Informationen können durch Begehungen vor Ort gewonnen werden. Wird bspw. beobachtet, dass die Gebäude einer bestimmten Baualterklasse in der betrachteten Gemeinde meist einen beheizten Dachstock haben, während in der nationalen Gebäudetypologie jedoch von einem unbeheizten Dachstock ausgegangen wird, kann dieser Parameter in der Typologie angepasst werden. In diesem Fall würde diese Anpassung bspw. zu einem höheren Wärmebedarf dieses Gebäudetyps führen.

Anschließend wird diese (ggfs. angepasste) Gebäudetypologie verwendet, um den Heizwärmebedarf jedes Gebäudetyps zu berechnen. Hierfür werden zunächst auf Basis der lokalen Klimadaten (MERRA-2, Gelaro et al. 2017) die Heiztage und durchschnittlichen Außentemperaturen für jeden Tag innerhalb des betrachteten Jahres berechnet. Unter Verwendung der lokalen Globalstrahlung (CAMS, European Commission 2017) und einer Simulation des Sonnenstandes für jede Viertelstunde wird zudem der solare Wärmeeintrag für die unterschiedlich ausgerichteten Fensterflächen jedes Gebäudetyps berechnet.

Zur Modellierung der Nachfrage nach Raumwärme wird ein Einzonen-Gebäudesimulationsmodell (nach DIN EN ISO 13790) verwendet. Dabei wird der Wärmebedarf eines Gebäudes auf Basis der Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung und unter Berücksichtigung der Wärmeeinträge durch solare Einstrahlungen und interne Wärmegewinne berechnet. Der Gesamtwärmetransfer durch Transmission wird unter Verwendung des Gesamt-Transmissionswärmetransferkoeffizienten des Gebäudes bestimmt. Dieser berücksichtigt sowohl den effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten, als auch die Bauteilfläche auf der Gebäudehülle aller Elemente in den Bauteilgruppen Wand, Dach, Boden, Tür und Fenster. Der Wärmetransfer durch Lüftung basiert vor allem auf der Luftwechselrate und dem Gebäudevolumen. Die Berechnung der solaren Wärmeeinträge basiert auf den Ausrichtungen und Größen der Fensterflächen, sowie der zuvor berechneten solaren Einstrahlung je Ausrichtung und berücksichtigt zusätzlich u. a. Faktoren für die Verschattung, solare Durchlässigkeit und Einstrahlungswinkel. Für interne Wärmegewinne wird ein vereinfachter Standardwert in Höhe von  $3 \text{ W/m}^2$  angenommen.

Die Bauteilflächen und U-Werte werden dabei der ggfs. spezifisch angepassten Gebäudetypologie entnommen. Weitere Parameter, wie z. B. Annahmen zur Solltemperatur ( $20^\circ\text{C}$ ), der Luftwechselrate ( $0,4 \text{ 1/h}$ ), der Raumhöhe ( $2,5 \text{ m}$ ) und der Wärmespeicherfähigkeit der thermischen Gebäudemasse ( $45 \text{ Wh/m}^2\text{K}$ ) folgen den

Annahmen der „TABULA Calculation Method“ (TABULA 2013). Die Annahmen zur Berechnung des Energiebedarfs für Warmwasser (10 kWh/m<sup>2</sup>a in Ein- und 15 kWh/m<sup>2</sup>a in Mehrfamilienhäusern) folgen ebenfalls dieser Methode.

Auf dieser Basis kann für jeden Tag anhand der mittleren Außentemperatur und der solaren Einstrahlungen der spezifische Wärmebedarf [kWh/m<sup>2</sup>] jedes Gebäudetyps bestimmt werden.

Im nächsten Schritt werden die Wärmebedarfsprofile je Gebäudetyp wieder mit der Klassifizierung des gesamten Gebäudebestands vereint. Dabei kann nun für jedes konkrete (d. h. aus den OSM-Daten generierte) Gebäude anhand des zuvor bestimmten Gebäudetyps ein spezifisches Wärmebedarfsprofil aus dem vorherigen Schritt zugeordnet werden. Zusätzlich wird hierbei die Grundfläche des Gebäudes berücksichtigt. Wenn diese von der Standard-Grundfläche für diesen Gebäudetyp abweicht, wird aus der Differenz ein Skalierungsfaktor berechnet und der resultierende Wärmebedarf des Einzelgebäudes entsprechend skaliert.

## ERGEBNISSE

### Anwendung auf vier Gemeinden und Vergleich der Ansätze

Zunächst sollen beide beschriebenen Ansätze für verschiedene deutsche Städte angewandt werden. Abbildung 2 zeigt die dabei berechneten Endenergiebedarfswerte für Wärme im Haushaltssektor für beide Methoden, sowie im Vergleich dazu Angaben aus Energieberichten<sup>1</sup> der jeweiligen Gemeinden.

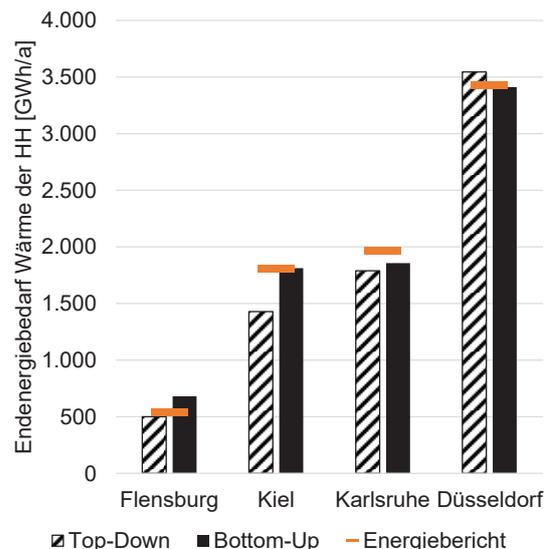


Abbildung 2: Endenergiebedarf für Wärme im Haushaltssektor, jeweils ermittelt durch die Top-Down und Bottom-Up Methoden, sowie Vergleichsangaben aus Energieberichten.

Es zeigt sich, dass beide beschriebenen Methoden jeweils Werte in einer ähnlichen Größenordnung liefern und insbesondere, dass die Ergebnisse vergleichbar mit den Angaben aus den Energieberichten sind. Die Top-Down Methode scheint den Energiebedarf eher zu unterschätzen (im Mittel um 8%), während die Bottom-Up Methode zu einer Überschätzung (im Mittel um 5%) im Vergleich zu den Energieberichten tendiert. Hierbei muss natürlich berücksichtigt werden, dass die betrachtete Stichprobe aufgrund der schlechten Datenlage (Berichte zum städtischen Wärmebedarf sind nur selten verfügbar) zu klein ist, um genauere Aussagen zu treffen. Für eine abschließende Bewertung sollten daher nach Möglichkeit Vergleichswerte für weitere Städte herangezogen werden.

<sup>1</sup> Quellen der Energieberichte:  
Flensburg:

[http://www.flensburg.de/media/custom/2306\\_1847\\_1.PDF](http://www.flensburg.de/media/custom/2306_1847_1.PDF),

Kiel:

[https://www.kiel.de/de/umwelt\\_verkehr/klimaschutz/masterplan100prozentklimaschutz/dokumente\\_workshops/Dokumentation\\_Workshop\\_Wohnungs- und Immobilienwirtschaft\\_100.pdf](https://www.kiel.de/de/umwelt_verkehr/klimaschutz/masterplan100prozentklimaschutz/dokumente_workshops/Dokumentation_Workshop_Wohnungs- und Immobilienwirtschaft_100.pdf),

Karlsruhe:

[https://www.karlsruhe.de/b3/natur\\_und\\_umwelt/klimaschutz/klimakonzept/pdf\\_dateien/HF\\_sections/content/1487574892164/Machbarkeitsstudie\\_Klimaneutrales\\_Karlsruhe\\_2011.pdf](https://www.karlsruhe.de/b3/natur_und_umwelt/klimaschutz/klimakonzept/pdf_dateien/HF_sections/content/1487574892164/Machbarkeitsstudie_Klimaneutrales_Karlsruhe_2011.pdf),

Düsseldorf:

[https://www.duesseldorf.de/fileadmin/Amt19/umweltamt/klimaschutz/pdf/klimaschutz/szenario\\_duesseldorf\\_2050.pdf](https://www.duesseldorf.de/fileadmin/Amt19/umweltamt/klimaschutz/pdf/klimaschutz/szenario_duesseldorf_2050.pdf)

### Untersuchung des spezifischen Wärmebedarfs der Wohngebäude in der Karlsruher Oststadt

Abbildung 3 zeigt das Ergebnis einer Anwendung der oben beschriebenen Bottom-Up Methode für den Karlsruher Stadtteil Oststadt. Dabei wurde jeweils

- einmal die nationale Gebäudetypologie und das deutsche Referenzklima (vgl. IWU 2015),
- einmal die nationale Gebäudetypologie und das lokale Klima für Karlsruhe,
- und einmal eine im Rahmen eines Forschungsprojekts spezifisch für die Karlsruher Oststadt angepasste Gebäudetypologie mit dem lokalen Karlsruher Klima

verwendet. Aufgrund der Platzbeschränkungen wird hier nur das Ergebnis für die Mehrfamilienhäuser (MFH) gezeigt, für eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse und der Vorgehensweise sei an dieser Stelle auf Murshed et al. (2017) verwiesen.

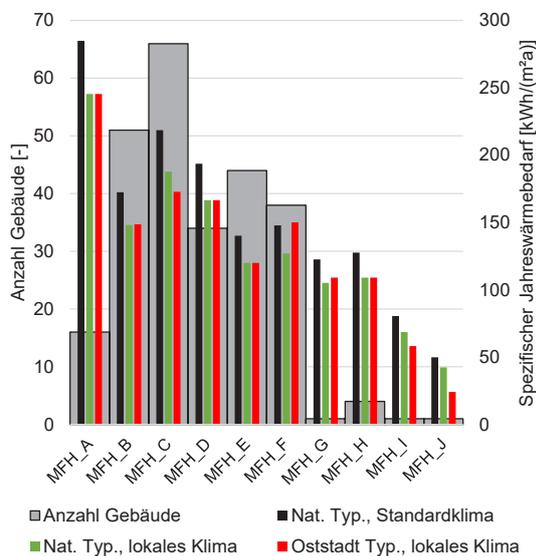


Abbildung 3: Ergebnisse der Bottom-Up Berechnung des Wärmebedarfs der Gebäude in der Karlsruher Oststadt.

Die Betrachtung des spezifischen Jahreswärmebedarfs der unterschiedlichen MFH-Altersklassen zeigt einerseits, dass die Berücksichtigung des lokalen Karlsruher Klimas (grüne Säulen) einen im Vergleich zum nationalen Referenzklima (schwarze Säulen) reduzierten Wärmebedarf bewirkt. Die Berücksichtigung der angepassten

Gebäudetypologie (rote Säulen) wirkt sich hingegen auf jeden Gebäudetyp unterschiedlich aus: Während z. B. der Gebäudetyp MFH\_F einen höheren Wärmebedarf gegenüber der nationalen Gebäudetypologie aufweist (u. a. aufgrund der großen Fensterflächen der Gebäude dieses Typs in der Oststadt), hat z. B. der Gebäudetyp MFH\_J einen geringeren Wärmebedarf. Je nachdem, wie häufig die entsprechenden Gebäudetypen vorkommen (graue Säulen), können sich diese spezifischen Anpassungen letztendlich mehr oder weniger stark in der Gesamtnachfrage widerspiegeln.

### Zeitliche Entwicklung des Wärmebedarfs

Durch die Verwendung zeitlich hoch aufgelöster Temperatur- und Globalstrahlungsdaten ermöglicht die hier beschriebene Methodik im Vergleich zu anderen Bilanzierungsansätzen zusätzlich eine Betrachtung der unterjährigen Entwicklung des Wärmebedarfes der Wohngebäude (vgl. Abbildung 4).

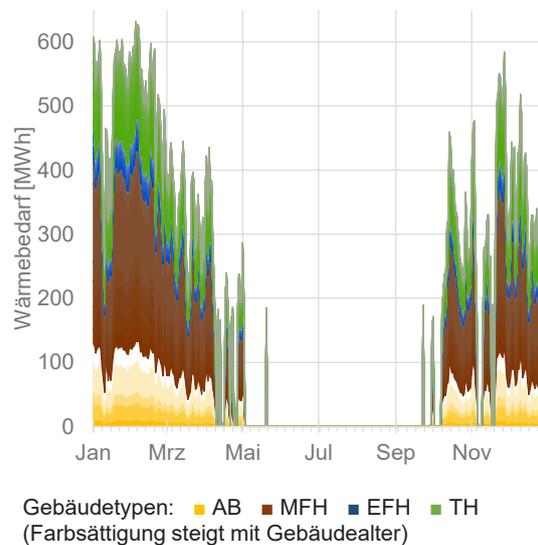


Abbildung 4: Wärmebedarfsprofil im Jahresverlauf für alle Gebäudetypen in der Karlsruher Oststadt.

Erwartungsgemäß zeigt sich dabei, dass der Wärmebedarf stark mit den durchschnittlichen Tagestemperaturen korreliert und somit vor Allem auf die Monate Oktober bis Mai fällt, während in den Sommermonaten keine Nachfrage nach Raumwärme besteht. Durch die zeitliche Auflösung der Wärmebedarfssimulation könnte die hier beschriebene Methode bspw. auch genutzt werden, um auf Basis von Wetterprognosen eine Wärmebedarfsprognose der nächsten Tage zu erzeugen.

### Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs

Durch die Verknüpfung von Geodaten mit statistischen Gebäudebestandsdaten erreicht die zuvor beschriebene Bottom-Up Methode neben der zeitlichen auch eine hohe räumliche Auflösung. Abbildung 5 zeigt eine mit dieser Methode erstellte Wärmebedarfskarte der Wohngebäude in Karlsruhe.

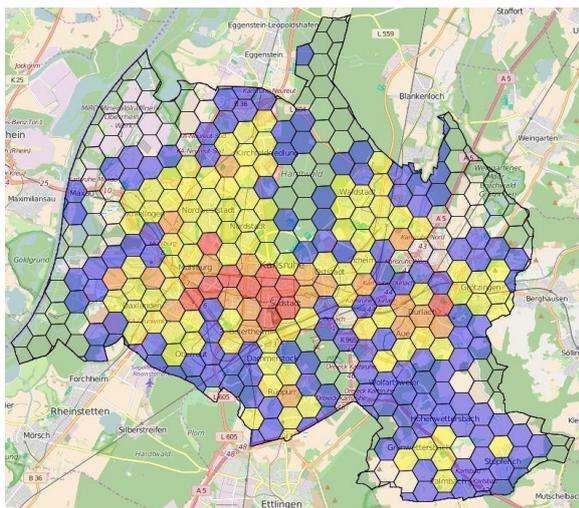


Abbildung 5: Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs der Wohngebäude in Karlsruhe.

Die resultierende Wärmedichte ist dabei farblich markiert (blau:  $< 10 \text{ GWh/km}^2$ , gelb:  $< 30 \text{ GWh/km}^2$ , orange:  $< 50 \text{ GWh/km}^2$ , rot:  $\geq 50 \text{ GWh/km}^2$ ). Es zeigt sich, dass die Wärmebedarfsdichte der Wohngebäude insbesondere in der Kernstadt von Karlsruhe, sowie in Durlach erhöht ist. In dünn besiedelten Gebieten besteht hingegen nur eine geringe oder keine Wärmenachfrage.

Durch eine Kombination der Bottom-Up und Top-Down Methoden kann auch der Wärmebedarf der Nichtwohngebäude räumlich lokalisiert werden. Abbildung 6 zeigt die Wärmebedarfskarte aller Gebäude in Karlsruhe bei der kombinierten Anwendung dieser beiden Methoden.

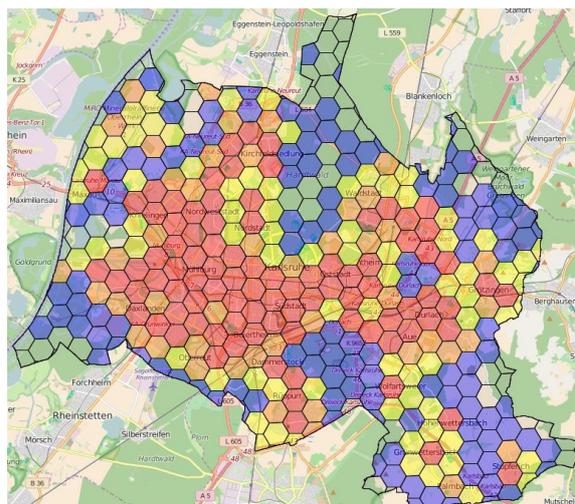


Abbildung 6: Räumliche Verteilung des Wärmebedarfs sämtlicher Gebäude in Karlsruhe.

Dabei zeigt sich erwartungsgemäß, dass das mittlere Niveau des Wärmebedarfs durch die Berücksichtigung der Nichtwohngebäude insgesamt deutlich zunimmt. Weiterhin kann nun auch Gebieten, in denen sich keine oder nur wenige Wohngebäude befinden, eine Wärmebedarfsdichte zugeordnet werden. So werden bspw. auch die Industriegebiete entlang des Rheins sichtbar.

Die so erzeugten Karten könnten somit bspw. zur Neu- oder Ausbauplanung von Fernwärmenetzen genutzt werden: bei einer Wärmebedarfsdichte von über  $50 \text{ GWh/km}^2$  (rote Felder in Abbildung 6) gilt bspw., dass ein Fernwärmenetz mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wirtschaftlich realisierbar ist (KEEA 2014). Die Karten könnten daher als Inputdaten für Netzplanungswerkzeuge oder optimierende Energiesystemmodelle genutzt werden.

### ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Beitrag wurden zwei unterschiedliche Methoden vorgestellt, die eine Abschätzung des Wärmebedarfs einer Stadt oder Gemeinde ermöglichen: Eine Top-Down Methode, die für eine schnelle Einschätzung der Verteilung der gesamten Endenergienachfrage genutzt werden kann, sowie eine Bottom-Up Methode, die verschiedene Geo-, Klima- und statistische Daten kombiniert, um eine wesentlich detailliertere, zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Abschätzung des Wärmebedarfs der Wohngebäude zu ermöglichen. Die Anwendung auf vier verschiedene Städte hat gezeigt, dass

beide Methoden vergleichbare Ergebnisse liefern, die in ihrer Größenordnung auch mit Angaben aus Energieberichten der jeweiligen Städte übereinstimmen. Aufgrund des hohen Detaillierungsgrades der Ergebnisse der Bottom-Up Methode ist diese dazu geeignet, Inputdaten für die Analyse und Optimierung von städtischen Energiesystemen bereitzustellen.

## LITERATUR

- Mainzer, Kai; Fath, Karoline; McKenna, Russell; Stengel, Julian; Fichtner, Wolf; Schultmann, Frank (2014): A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. In: *Solar Energy* 105, S. 715–731. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.015.
- BMWi (2017): *Energiedaten: Gesamtausgabe*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), zuletzt geprüft am 17.05.2017.
- Destatis (2017): *Regionaldatenbank. Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data>, zuletzt aktualisiert am 16.07.2012, zuletzt geprüft am 16.07.2012.
- Energieagentur RLP (2017): *Energieatlas Rheinland-Pfalz: Stromverbrauch*. Energieagentur Rheinland-Pfalz. Online verfügbar unter <https://www.energieatlas.rlp.de/earp/daten/strom/stromverbrauch/>.
- Stadt Karlsruhe (2012): *Klimaschutz in Karlsruhe. Zweiter Fortschrittsbericht 2011*. Hg. v. Stadt Karlsruhe I Umwelt- und Arbeitsschutz, zuletzt geprüft am 24.03.2018.
- Neumann, Christian; Blumberg, Arne; Schwieder, Harald; Sondermann, Nils (2012): *Energiebilanz für die Region Freiburg. Verbrauch und Potenziale. Endbericht*. Energieagentur Regio Freiburg, zuletzt geprüft am 24.03.2018.
- Destatis (2014): *Zensusdatenbank Zensus 2011. Statistische Ämter des Bundes und der Länder*. Online verfügbar unter <https://ergebnisse.zensus2011.de/>.
- IWU (Hg.) (2015): *Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden*. 2. Aufl. Unter Mitarbeit von Tobias Loga, Britta Stein, Nikolaus Diefenbach und Rolf Born. Darmstadt, zuletzt geprüft am 21.01.2016.
- IWU (Hg.) (2016): *Monitor progress towards climate targets in European housing stocks. Main results of the EPISCOPE Projekt: final project report*. Unter Mitarbeit von Britta Stein, Tobias Loga, Nikolaus Diefenbach und Britta. EPISCOPE. Darmstadt/Germany: Institut Wohnen und Umwelt GmbH, zuletzt geprüft am 01.12.2017.
- OSM (2018): *OpenStreetMap*. Unter Mitarbeit von OpenStreetMap-Contributors. Online verfügbar unter <http://www.openstreetmap.org/>, zuletzt geprüft am 01.06.2017.
- Gelaro, Ronald; McCarty, Will; Suárez, Max J.; Todling, Ricardo; Molod, Andrea; Takacs, Lawrence et al. (2017): *The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)*. In: *Journal of Climate* 30 (14), S. 5419–5454. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0758.1.
- European Commission (2017): *Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) radiation service*. Online verfügbar unter <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/cams-radiation-service>.
- DIN EN ISO 13790, 21.07.2008: *Energieeffizienz von Gebäuden – Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung*, zuletzt geprüft am 05.02.2015.
- TABULA (2013): *TABULA Calculation Method. Energy Use for Heating and Domestic Hot Water. Reference Calculation and Adaptation to the Typical Level of Measured Consumption*. Hg. v. IWU. Online verfügbar unter [www.building-typology.eu](http://www.building-typology.eu), zuletzt geprüft am 18.02.2018.
- Murshed, Syed Monjur; Abdul-Zahra, Amar; Koch, Andreas; Mainzer, Kai; Sliz-Szkliniarz, Beata; Wendel, Jochen (2017): *Investigating the Energy Performance of Buildings with a 3D City Model and Thermal Simulation: Results from the Urban Transition Lab*. In: *Official Conference Proceedings. The European Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2017*. Brighton, UK, July 07, 2017 to July 09, 2017. The International Academic Forum. Online verfügbar unter <https://papers.iafor.org/submission37905/>, zuletzt geprüft am 20.09.2017.
- KEEA; Fraunhofer IWES (2014): *Praxisleitfaden: „Aufbau von Wärmenetzen“*. Hg. v. Energiereferat Stadt Frankfurt am Main und Regionalverband FrankfurtRheinMain. KEEA Klima- und Energieeffizienz Agentur; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, zuletzt geprüft am 29.11.2017.