Die Rolle von Wärmenetzen im Wärmemarkt der Zukunft – GIS-Analyse technisch-ökonomischer Potenziale

Sebastian Blömer, Christian Götz, Peter Mellwig, Martin Pehnt und Patrick Jochum

Wärmenetzinfrastrukturen setzen langfristige Investitionsentscheidungen voraus – sowohl für den Betreiber und die Wärmeabnehmer als auch für das übergeordnete Energiesystem. Die Bedeutung von Wärmenetzen in einem weitgehend klimaneutralen Gebäudebestand, wie im Energiekonzept der Bundesregierung als Ziel für das Jahr 2050 vorgegeben, wird in der Forschung intensiv diskutiert. Der Debatte um die Bedeutung dieser Netze im zukünftigen Wärmemarkt fehlte es bisher an einem flächendeckenden Modell zum kleinräumigen Abgleich von Wärmenachfrage und Netzkostenstrukturen. Das Heidelberger Institut für Energie- und Umweltforschung (ifeu) hat in einem gemeinsamen Projekt mit der Beuth Hochschule für Technik Berlin die technisch-wirtschaftlichen Potenziale von Wärmenetzinfrastrukturen in einer hochauflösenden GIS-Analyse untersucht.

Wärmenetze bilden ein wichtiges Infrastrukturelement für die zukünftige Wärmeversorgung. Sie bieten den systemischen Vorteil eines räumlichen und zeitlichen Ausgleichs von Wärmequellen und Wärmenachfrage in einem technisch und wirtschaftlich optimierten System.

Flexible, smarte Infrastrukturen

Wärmenetze, insbesondere wenn sie zukünftig in Richtung eines niedrigeren Temperaturniveaus optimiert werden, ermöglichen die verbesserte Einbindung von erneuerbaren Energien und Abwärme, effiziente Quartierskonzepte und perspektivisch auch Kostensenkungen etwa durch Skaleneffekte (Stichwort große Freiflächen-Solarthermie) und Standardisierung. Zugleich kann die Speicherfähigkeit von Wärmenetzen auch für das Stromsystem nutzbar gemacht werden: zukünftige Wärmenetze sind smarte, flexibel zu betreibende Infrastrukturen.

Allerdings können Wärmenetzinfrastrukturen nur dort technisch und ökonomisch effizient betrieben werden, wo eine ausreichende Wärmeabnahmedichte vorliegt. Zur Absicherung von Investitionen in Wärmenetzinfrastrukturen müssen die Auswirkungen der energetischen Sanierungstätigkeiten, die zu einer Verminderung des Wärmeabsatzes führen, entsprechend detailliert abgebildet werden. In der lokalen Fernwärmeplanung wie in der übergeordneten Energiesystemmodellierung ist die räumliche Analyse von Wärmeabnahmedichten im Gebäudebestand ein etablierter Ansatz zur Potenzialbewertung [1, 2, 3]. Dabei sind übergeordnete GIS-Analysen zur Bewertung der Rolle von Wärmenetzen im zukünftigen bundesdeutschen Wärmemarkt auf die Verfügbarkeit aussagekräftiger und möglichst hochauflösender Geodaten zum Gebäudebestand und auf statistische Modellierungsverfahren angewiesen.

Die erforderlichen Investitionen in Wärmenetze müssen forciert werden, um eine optimale Erschließung erneuerbarer Wärme- und KWK-Potenziale zu gewährleisten
Khakimullin Aleksandr | Fotolia.com

Grundlagen der Analyse

Im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte hat das ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gemeinsam mit der Beuth Hochschule für Technik Berlin das Gebäudemodell GEMOD entwickelt, ein Matlab-basiertes Bottom-Up-Modell zur Simulation der Auswirkungen von energetischen Sanierungsmaßnahmen einzelner Bauteile auf den Energieverbrauch für variabel definierbare Wohn- und Nichtwohngebäudebestände [4, 5].

Aufbauend auf der Simulation von Entwicklungspfaden der energetischen Sanierung des deutschen Gebäudebestandes wurde GEMOD als Teil des im Februar 2017 abgeschlossenen BMWi-Projekts „Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich (Kurztitel: Anlagenpotenzial)“ mit dem „Digitalen Wärmeatlas der Bundesrepublik Deutschland“ (WAD) verknüpft [5, 6], einer räumlichen Datenbank von 17,4 Mio. energetisch typisierten Einzelgebäuden.

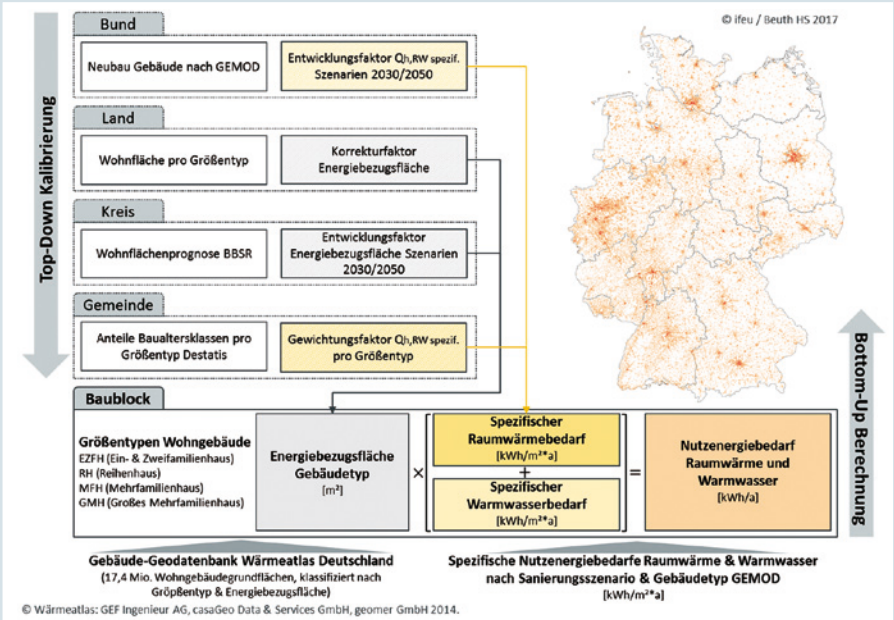

Abb. 1 Schema der GIS-Modellierung von Wärmebedarfsszenarien im Wohngebäudebestand

Ziel war es, durch die Kopplung von WAD und GEMOD die Auswirkungen energetischer Sanierungstätigkeit im Wohngebäudebestand auf Ebene von Baublöcken bundesweit räumlich hochauflösend abzubilden und zur „vor-Ort-Bewertung" der technisch-ökonomischen Potenziale von Wärmenetzen zu verwenden.

Die Datengrundlage für die räumliche Modellierung bildete die Energiebezugsfläche der vier grundlegenden Größentypen von Wohngebäuden EFH, RH, MFH und GMH auf Baublockebene aus dem WAD. Diese Ausgangsdaten wurden auf verschiedenen übergeordneten Ebenen kalibriert, um szenarienabhängige spezifische Nutzenergiebedarfe für Raumwärme- und Warmwasser aus GEMOD räumlich differenziert abzubilden (Abb. 1). Die spezifischen Wärmebedarfe wurden in GEMOD einem Verbrauchsabgleich unterzogen, um eine möglichst hohe Annäherung an die realen Wärmeverbräuche zu ermöglichen.

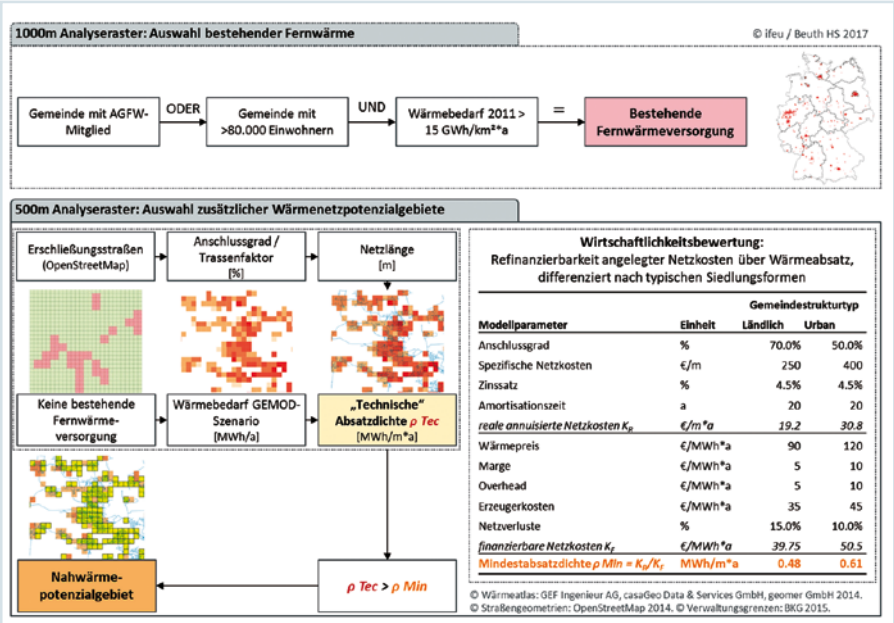

Abb. 2 Schema der GIS-basierten Wärmenetzpotenzialerhebung in Abhängigkeit der Wärmebedarfsentwicklung

Als Grundlage der GIS-Analyse langfristiger Wärmenetzpotenziale wurden die spezifischen Nutzenergieverbräuche für Raumwärme und Warmwasser aus den GEMOD-Entwicklungspfaden „moderate Sanierung" (fortlaufende Sanierungstätigkeit nach aktuellem Ambitionsgrad) und „engagierter Klimaschutz" (stark gesteigerte Sanierungstätigkeit) in den Stichjahren 2030 und 2050 in die räumliche Datenbasis gespiegelt. Die Anteile des Raumwärmeverbrauchs in Nichtwohngebäuden (ca. ein Drittel des gesamten Wärmeverbrauchs), für die keine kleinräumigen Daten vorlagen, wurden in der finalen Potenzialberechnung über entsprechende Aufschläge berücksichtigt.

Die räumliche Modellierung von Wärmenetzgebieten basierte auf der konzeptuellen Unterscheidung zwischen bestehenden Fernwärmeversorgungsgebieten und potenziellen neuen Wärmenetzen in strukturell kleineren Einheiten (Abb. 2).

Bestehende Fernwärmegebiete wurden auf der Ebene von Analyse-Rasterzellen mit einer Kantenlänge von 1.000 m auf 1.000 m mittels eines Grenzwert-Verfahrens identifiziert. Auf die Fernwärmegebiete von 4.300 km² entfällt im Basisjahr 2011 ein Wärmeverbrauch von 131 TWh im GIS. Aktuell liegt der durchschnittliche Anschlussgrad in den Fernwärmegebieten bei rund 30 %. Im Mittel wurden in den Jahren 2008 bis 2014 10 % (47,5 TWh) des Endenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser im Wohngebäudebestand durch Fernwärme abgedeckt [7]. Diese Summe entspricht mit einer hohen Übereinstimmung der im GIS ausgewiesenen Nutzenergiemenge von rund 40 TWh bei einem Anschlussgrad von 30 % bezogen auf den Wärmeabsatz und zusätzlichen realistischen Abschlägen für Leitungsverluste von 13,5 % im Gebäude.

Auswirkungen der energetischen Sanierungen

Aufbauend auf der räumlichen Erfassung des Status Quo wurden die Auswirkungen von energetischen Sanierungen auf die bestehende Fernwärme bewertet. Der Annahme einer

Netzerhaltungsstrategie folgend, wurde eine weitgehende Kompensation des sanierungsbedingten Wärmeverbrauchsrückgangs durch Nachverdichtung angenommen. Bei einem angenommenen konstanten Wärmeabsatz lässt sich im Modell die notwendige sukzessive Steigerung der Anschlussraten in den verschiedenen Sanierungsszenarien darstellen. Allein durch den Effekt der Verbrauchsreduktion und der Nachverdichtung steigt die mittlere Anschlussrate in den Versorgungsgebieten bei moderater Sanierung von aktuell 30 % auf 36 % 2030 und auf knapp 50 % 2050. Bei ambitionierter energetischer Sanierung müssten mittlere absatzbezogene Anschlussgrade von 44 % 2030 und von 80 % 2050 erreicht werden, um einen konstanten Wärmeabsatz zu gewährleisten.

Auf Bundesebene steigt der Anteil der Fernwärme am Nutzwärmeverbrauch bei moderater Sanierung von 10 % 2030 auf rund 14 % 2050 an. Bei ambitionierter Sanierung läge der Anteil der Fernwärme bei konstantem Absatz bei 12 % 2030 und 22 % 2050. Hier ist anzunehmen, dass bei einer ambitionierten Sanierung bis 2050 eine vollständige Kompensation des Absatzrückgangs durch Nachverdichtung nicht praktikabel ist und auf Bundesebene langfristig eher Fernwärmeanteile von 14 %, wie bei moderater Sanierung, erreichbar sind.

Für die Erhebung zusätzlicher Potenziale neuer Wärmenetze wurde aufbauend auf einem Ansatz der GEF Ingenieur AG ein neues räumliches Potenzialmodell entwickelt, das die Refinanzierbarkeit der Trassenkosten aus der Wärmeabnahmedichte abbildet. Die relevanten Posten für einen wirtschaftlichen Wärmenetzbetrieb sind in der Regel die Investitionskosten für die Errichtung des Netzes sowie die laufenden Brennstoffkosten. Neue Wärmenetze müssen sich im Abschreibungszeitraum über die Erlöse aus dem Verkauf der Wärme an die angeschlossenen Endkunden zu einem anlegbaren Wärmepreis refinanzieren [8].

Davon ausgehend werden in einem Wirtschaftlichkeitsmodell die maximalen annuisierten Investitionskosten für die Verlegung der Wärmenetztrassen ausgegeben als Differenz zwischen dem anlegbaren Wärmepreis und den annuisierten Kosten für Erzeugung und Betrieb in [€/MWh] bezogen auf den Wärmeabsatz. Diese werden als finanzierbare Trassenkosten K_F bezeichnet. Als weiterer Input wurden reale spezifische Netzkosten in [€/m] über einen Annuitätsfaktor herangezogen, der in Abhängigkeit des zu erwartenden Abschreibungszeitraums und des anlegbaren Realzinssatzes für die Investition gebildet wird. Der Quotient aus diesen realen annuisierten Netzkosten K_R [€/m*a] und den aus dem Verkauf der Wärme finanzierbaren Trassenkosten K_F [€/MWh] stellt die Mindestabsatzdichte ρ_{min} [MWh/m*a] dar, ab der ein wirtschaftlicher Betrieb eines Nahwärmenetzes möglich ist (Abb. 2).

Identifikation potenzieller neuer Nahwärmegebiete

Zur Identifikation potenzieller neuer Nahwärmegebiete wurde ein kleineres Analyseraster mit einer Kantenlänge von 500 m auf 500 m gewählt, um auch kleinere Versorgungsgebiete abstrahieren zu können. Auf dieser Ebene wurden Wärmenetzverteillängen aus den Geometrien von Erschließungsstraßen aus der OpenStreetMap-Datenbank und angenommener Anschlussgrade abgeleitet und mit den szenarienabhängigen Wärmebedarfen der Gebäude aus dem GIS-Modell verschnitten. Auf diese Weise konnte im Modell eine „technische" Absatzdichte [MWh/m*a] zum Abgleich wirtschaftlicher Mindestabsatzdichten kleinräumig abgebildet werden.

In der Praxis zeigen sich bei neuen Wärmenetzen hohe Varianzen bei Netzkosten, Anschlussgraden, Erzeugerkosten und Wärmepreisen. Dabei korrelieren die Differenzen im Allgemeinen mit der Besiedlungsstruktur in den Netzgebieten.

In ländlichen Regionen mit niedriger Bebauungsdichte und einer entsprechend einfacheren Trassenverlegung über Freiflächen sowie einem höheren Anteil eigener Arbeitsleistung fallen die Kosten tendenziell niedriger aus als in dichter bebauten Gebieten. Darüber hinaus lassen sich in weniger dicht besiedelten Regionen andere Betriebs- und Erzeugerkonstellationen realisieren (Genossenschaften, Biogas-BHKW), die in einem eher formalisierten Marktumfeld in urbanen Versorgungsgebieten nicht zu erwarten sind [5, 8].

Im Modell wurden die Parameter deshalb durch eine Einteilung in ländliche Wärmenetze, die innerhalb der Gemeindestrukturtypen „Landgemeinde" oder „Kleine Kleinstadt" nach der Einteilung des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) liegen, und in urbane Wärmenetze, die in allen verbleibenden Gemeindestrukturtypen liegen, differenziert. Die Netzkosten als zentrale Eingangsgröße der Wirtschaftlichkeitsbewertung wurden nach empirischen Erhebungen für ländliche Netze [8] und nach Sekundärquellen für urbane Netze [9] als mittlere reale Kosten für den Betreiber innerhalb des aktuellen Förderrahmens (Marktanreizprogramm/KWKG) auf 250 €/m bzw. 400 €/m festgelegt.

In der Gesamtauswertung der langfristigen Potenziale neuer Nahwärmenetze wurden zunächst die Wärmebedarfe im Stichjahr

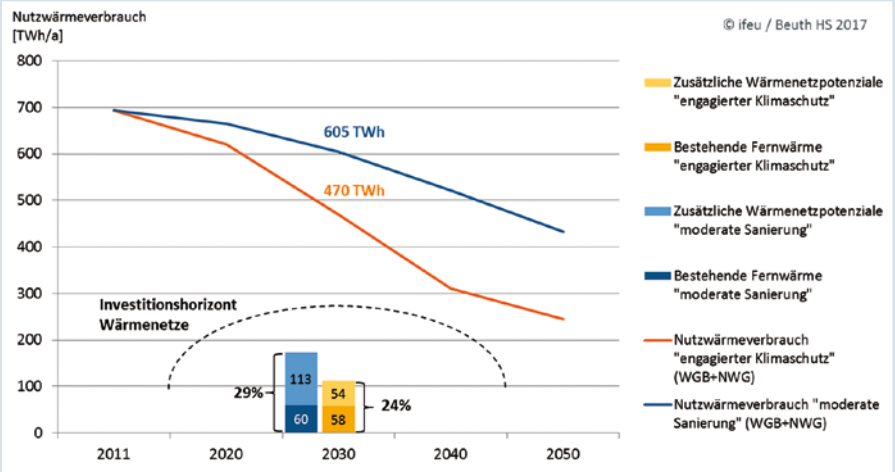

Abb. 3 Ermittelte langfristige Potenziale bestehender Fernwärme- und neuer Nahwärmenetze in Abhängigkeit der energetischen Sanierungstätigkeit

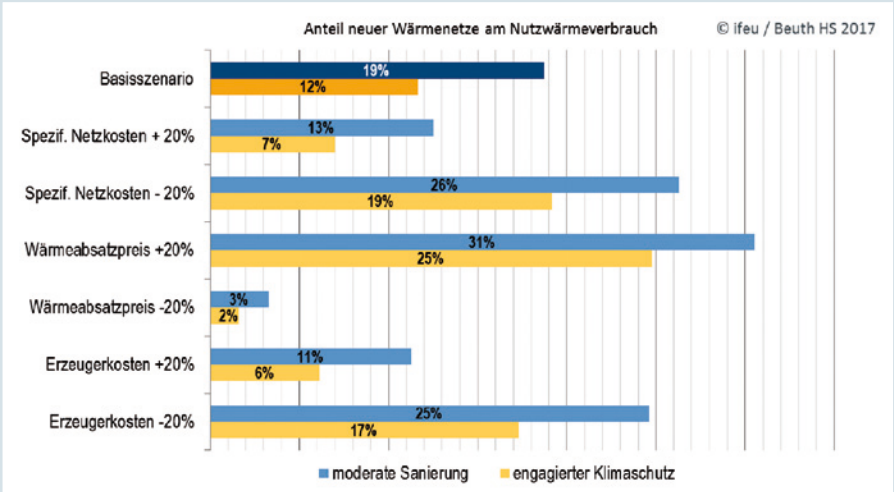

Abb. 4 **Auswirkungen von Kostenentwicklungspfaden bei Erzeugung, Verteilung und Abnahme auf das wirtschaftliche Potenzial zusätzlicher Wärmenetze**

2030 als Abstraktion eines Investitionszeitraums von 2015 bis 2045 verwendet, in dem die Investitionen über den Wärmeabsatz abgeschrieben werden müssen. Es zeigt sich, dass bei moderater Sanierung unter den gegebenen Wirtschaftlichkeitsbedingungen rund 19 % (113 TWh) des gesamten Nutzenergieverbrauchs für Raumwärme und Warmwasser durch neue Nahwärmenetze abgedeckt werden könnten. Bei ambitionierter energetischer Sanierung sinkt das Potenzial zusätzlicher Wärmenetze auf knapp 12 % (54 TWh).

Nahwärmepotenziale bis 2030

Hinzu kommt im Stichjahr 2030 in beiden Sanierungspfaden ein „Sockel" bestehender Fernwärme von rund 60 TWh, sodass bei moderater Sanierungstätigkeit insgesamt 29 % (173 TWh) und bei ambitionierter Sanierung 24 % (112 TWh) des Nutzenergiebedarfs technisch-wirtschaftlich über Wärmenetzinfrastrukturen versorgt werden könnten (Abb. 3). Dabei hängen die durch die Wärmenetzbetreiber wirtschaftlich erschließbaren zusätzlichen Potenziale stark vom Zusammenspiel zwischen spezifischen Netzinvestitionskosten, Wärmeabsatzpreis und Erzeugerkosten ab (Abb. 4). Zentrale marktwirtschaftliche Hebel für eine Förderung der Erschließung CO_2-armer Wärmequellen durch Wärmenetze liegen hier in der Minimierung der Netzinvestitionskosten durch effizientere Herstellungs- und Verlegeverfahren sowie in der Abfederung sinkender Konkurrenzkosten von fossilen Einzelheizsystemen.

Wird bis 2030 nicht in Wärmenetze investiert und der Wärmebedarf des Gebäudebestandes durch energetische Sanierung weiter reduziert, sinken die Potenziale neuer Nahwärme deutlich. So können durch neue Netze, die etwa im Zeitraum von 2040 bis 2060 abgeschrieben werden, bei moderater energetischer Sanierungstätigkeit noch rund 10 % (42 TWh) des Nutzwärmeverbrauchs abgedeckt werden, bei ambitionierter Sanierung sinkt das Potenzial sogar auf nur noch 3 % (7 TWh).

Die abnehmende Wirtschaftlichkeit neuer Wärmenetze bei einer verzögerten Neu-Investition in der Mitte des Jahrhunderts ist insofern relevant, als Nahwärme-Infrastrukturen eine zentrale Rolle für die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung spielen. Die Auswertung verschiedener Szenarien zur Minimierung des Primärenergieaufwandes in der durchgeführten Studie zeigt, dass die Erschließung zusätzlicher Reststoff- und Abwärmepotenziale, die Einbindung großer Solarthermieanlagen, KWK und Großwärmepumpen in Wärmenetze wesentlich für eine Dekarbonisierung des Wärmemarktes ist [5]. Ohne Wärmenetze können diese Quellen nicht genutzt werden.

Investitionen in Wärmenetze forcieren

Die erforderlichen Investitionen in Wärmenetze müssen folglich in den kommenden Jahren forciert werden, um eine optimale Erschließung erneuerbarer Wärme- und KWK-Potenziale zu gewährleisten. Hierzu könnten die seit längerem diskutierte Erstellung integrierter Wärmenutzungspläne auf kommunaler Ebene, aber auch die in der „Effizienzstrategie Gebäude" (ESG) verankerte Förderung von innovativen Wärmenetzsystemen mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien und die im Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz vorgesehenen Ausschreibungen für innovative KWK einen wichtigen Beitrag leisten.

Anmerkungen

[1] Blesl, M.; Kempe, S.; Ohl, M.; Fahl, U.; König, A.; Jenssen, T. und Eltrop, L.: Wärmeatlas Baden-Württemberg Erstellung eines Leitfadens und Umsetzung für Modellregionen, Stuttgart 2008, S. 122 ff.

[2] Blesl, M.; Kempe, S. und Huther, H.: Verfahren zur Entwicklung einer digitalen Wärmebedarfskarte. Berlin 2010.

[3] Esch, T.; Taubenböck, H.; Geiß, C.; Schillings, C.; Nacht, M.; Metz, A.; Heldens, W.; and Keil, M.: Potenzialanalyse zum Aufbau von Wärmenetzen unter Auswertung siedlungsstruktureller Merkmale. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundeamt für Bauwesen und Raumordnung, Berlin 2011.

[4] Jochum, P.; Mellwig, P.; Oehsen, A. v.; Pehnt, M.; Fehr, J.; Fortuniak, A.; Lempik, J.; Kulka, M.; Blachut, T. und Wallstab, T.: Dämmbarkeit des deutschen Gebäudebestands. Berlin/Heidelberg 2015.

[5] Jochum, P.; Mellwig, P.; Lempik, J.; Pehnt, M.; Böttcher, S.; Oehsen, A. v.; Stelter, D.; Blömer, S.; Fehr, J.; Krenz, T. und Hertle, H.: Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich – Anlagenpotenzial. Berlin/Heidelberg 2017.

[6] Richter, S.; Hespeler, S.; Gündra, H. und Kiehn, W.: Digitaler Wärmeatlas für 17,4 Mio. Wohngebäude in Deutschland. EUROHEAT&POWER Int., Vol. 43, Nr. 1–2/2014, S. 18–22.

[7] BMWi: Zahlen und Fakten – Energiedaten. Berlin 2016.

[8] Götz, C.; Blömer, S.; and Pehnt, M.: Nahwärmegenossenschaften in Deutschland – ein Wärmeversorgungsmodell der Zukunft? In: Energiewirtschaftliche Tagesfragen 66. Jg. 2016, Nr. 12, S. 46–48.

[9] Konstantin, P.: Praxisbuch Energiewirtschaft. Berlin/Heidelberg 2013.

S. Blömer, C. Götz, P. Mellwig und M. Pehnt, ifeu gGmbH (Institut für Energie- und Umweltforschung), Heidelberg, P. Jochum, Fachbereich Architektur, Labor für Bausanierung und Energieeffizienz, Beuth Hochschule für Technik, Berlin
sebastian.bloemer@ifeu.de