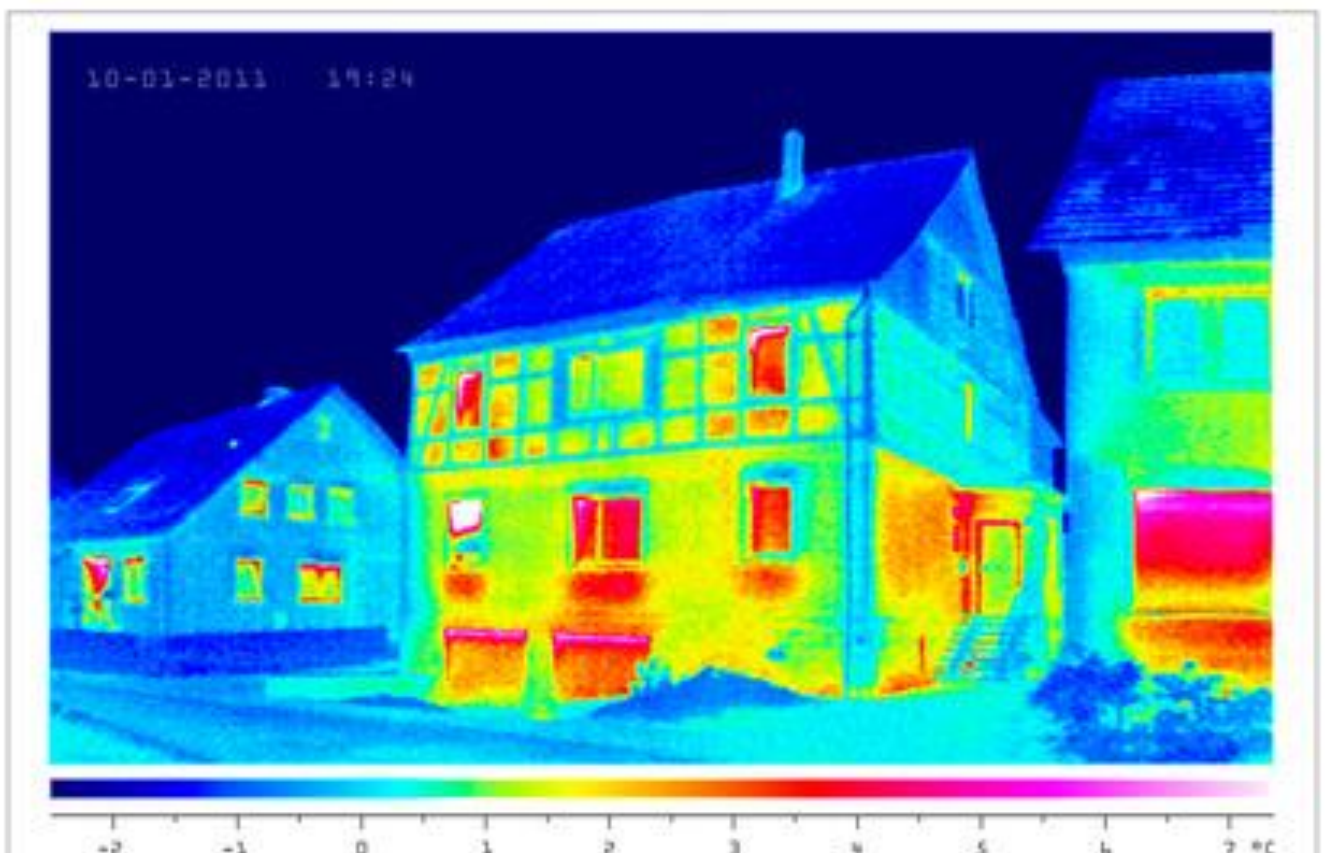


Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt

Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner

No. 9 | September 2015

WORKING PAPER SERIES IN PRODUCTION AND ENERGY



Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt

Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner

Abstract:

Der BMBF Wettbewerb „Energieeffiziente Stadt“ gibt fünf Städten in Deutschland die Gelegenheit, ihre jeweiligen Konzepte zur Steigerung der städtischen Energieeffizienz umzusetzen. Zur Beherrschung der Komplexität werden dabei verschiedene Methoden und Modelle eingesetzt. Dieser Beitrag fasst die Aktivitäten der fünf Städte Delitzsch, Essen, Magdeburg, Stuttgart und Wolfhagen im Bereich der Modellierung zusammen und diskutiert die Übertragbarkeit der jeweils in Entwicklung befindlichen Modelle. Es zeigt sich, dass in den Städten hauptsächlich Modelle zu Zwecken des Monitorings sowie zur Information und Kommunikation entwickelt werden. Die Übertragbarkeit der Modelle auf andere Städte ist meist durch die Verfügbarkeit der verwendeten Daten beschränkt. Als mögliche Lösung hierfür bietet sich die Verwendung frei verfügbarer Daten an.

Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt

Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner

Zusammenfassung

Der BMBF Wettbewerb „Energieeffiziente Stadt“ gibt fünf Städten in Deutschland die Gelegenheit, ihre jeweiligen Konzepte zur Steigerung der städtischen Energieeffizienz umzusetzen. Zur Beherrschung der Komplexität werden dabei verschiedene Methoden und Modelle eingesetzt. Dieser Beitrag fasst die Aktivitäten der fünf Städte Delitzsch, Essen, Magdeburg, Stuttgart und Wolfhagen im Bereich der Modellierung zusammen und diskutiert die Übertragbarkeit der jeweils in Entwicklung befindlichen Modelle. Es zeigt sich, dass in den Städten hauptsächlich Modelle zu Zwecken des Monitorings sowie zur Information und Kommunikation entwickelt werden. Die Übertragbarkeit der Modelle auf andere Städte ist meist durch die Verfügbarkeit der verwendeten Daten beschränkt. Als mögliche Lösung hierfür bietet sich die Verwendung frei verfügbarer Daten an.

1 Einführung

1.1 Kontext

Mit dem Ziel der Vermeidung klimaschädlicher Treibhausgasemissionen um mindestens 80% bis zum Jahr 2050 hat die Bundesregierung ambitionierte Ziele bezüglich des Anteils Erneuerbarer Energien (EE) am Bruttoendenergie- und Bruttostromverbrauch sowie zur Reduktion des Primärenergie- und des Stromverbrauchs gesetzt. Zusätzlich soll die Sanierungsrate von Gebäuden verdoppelt werden (Bundesregierung 2010). Durch den zunehmenden Verstädterungsgrad und den hohen Energieverbrauch in Städten gibt es gerade hier viele Chancen, die Erreichung dieser Ziele zu ermöglichen. Aus diesem Grund streben vermehrt auch einzelne Städte an, ihre Energieversorgung nachhaltiger zu gestalten.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat mit dem Wettbewerb „Energieeffiziente Stadt“ ein Projekt mit dem Ziel, die Energieeffizienz in Städten und Kommunen zu steigern, ins Leben gerufen (IZT 2014). In der Umsetzungsphase des Projektes bekommen die fünf Gewinnerstädte Delitzsch, Essen, Magdeburg, Stuttgart und Wolfhagen die Möglichkeit, ihre jeweiligen Konzepte über einen Zeitraum von fünf Jahren in die Praxis umzusetzen.

1.2 Motivation zur Modellierung städtischer Energiesysteme

Die oben genannten Zielsetzungen haben bereits zu weitreichenden Veränderungen der Struktur des deutschen Energiesystems geführt. In den letzten Jahren erfolgte ein starker Zubau an Erzeugungsleistung aus Erneuerbaren Energien, insbesondere durch Photovoltaik (PV) und Windkraft. Diese Entwicklung führt zu einer vermehrt dezentralen und volatilen Stromeinspeisung in den unteren Netzebenen der lokalen Energiesysteme.

Auch der Wärmesektor ist durch Dezentralität geprägt: da (Heiz-)wärme im Gegensatz zu Elektrizität nur schwer über große Entfernungen transportiert werden kann, erfolgt die Wärmeerzeugung meist direkt innerhalb der Gebäude oder, im Fall von Fernwärmenetzen, im regionalen Umfeld der Stadt. Durch technologische Weiterentwicklungen in den letzten Jahren besteht im Wärmesektor zudem ein besonders großes Potenzial zur Effizienzsteigerung, da Technologien wie die Kraft-Wärme-Kopplung oder Wärmepumpen dem Großteil der Technologien, die sich derzeit noch im Bestand befinden, in vielen Punkten überlegen sind.

Zusätzlich rückt die Nachfrageseite, und hier insbesondere die Effizienz der auf Verbraucherseite eingesetzten Technologien zur Bereitstellung von Energiedienstleistungen, vermehrt in den Fokus. Das Potenzial der möglichen Energieeinsparung durch effizientere Gebäudedämmung wird beispielsweise sehr hoch eingeschätzt (Bundesrepublik Deutschland 2013).

Entscheidungen in diesem Umfeld haben eine große Tragweite, da sie üblicherweise Technologien betreffen, die von hohen Investitionen und langen Lebensdauern geprägt sind. Zudem erfolgen die Entscheidungen in einem komplexen Gesamtsystem, in dem diverse Energieträger, Technologien und Akteure in Zusammenhang miteinander stehen und sich wechselseitig beeinflussen. Des Weiteren ist die zukünftige Entwicklung der wesentlichen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise der Energiepreise und des technologischen Fortschritts, von einer großen Unsicherheit geprägt. Nicht zuletzt sind die drei wesentlichen Ziele der Energiepolitik; Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, vielschichtig und häufig konträr: die Verbesserung der Umweltverträglichkeit durch z.B. effizientere Technologien führt nicht selten zu höheren Kosten. Aufgrund der Komplexität, Tragweite und Unsicherheit der Fragestellungen in städtischen Energiesystemen werden daher Methoden und Modelle verwendet, um Informationsgrundlagen für wichtige Entscheidungen zu liefern.

Zu den Aufgaben der Begleitforschung gehört im Rahmen des Projektes Wettbewerb „Energieeffiziente Stadt“ insbesondere die Sicherstellung der Übertragbarkeit. Die Erfahrungen bei den im Projekt entwickelten Maßnahmen und Methoden sollen nach Abschluss des Projekts auch andere Städte und Gemeinden bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz unterstützen. Eine wichtige Teilaufgabe ist daher die Charakterisierung und Einordnung der verschiedenen Modelle und Methoden, die

von den Wettbewerbsstädten im Rahmen des Projekts entwickelt und angewandt werden. Dieser Beitrag soll diese Charakterisierung zusammenfassen und die Übertragbarkeit der Modelle und Methoden diskutieren.

Im folgenden Kapitel 2 werden dafür zunächst die wesentlichen Kriterien zur Unterscheidung verschiedener Arten von Modellen genannt. In Kapitel 3 werden die verschiedenen Modelle der Gewinnerstädte vorgestellt und in Kapitel 4 erfolgt eine Diskussion und Bewertung der Übertragbarkeit. In Kapitel 5 wird der Beitrag schließlich zusammengefasst und mit einem Ausblick abgeschlossen.

2 Kriterien zur Unterscheidung von Modellen

2.1 Untersuchte Fragestellungen

Grundsätzlich gibt es im Bereich urbaner Energiesysteme eine Vielzahl an möglichen Fragestellungen, die sich in Umfang und Fokus unterscheiden. Keirstead et al. (2012) untersuchen anhand bestimmter Kriterien eine Vielzahl von Modellen und identifizieren anhand eines Clustering-Verfahrens sechs wesentliche Kategorien von Fragestellungen (vgl. Mainzer et al. 2014):

- *Untersuchung einzelner Technologien:* Hierbei wird meist mittels Simulation oder statischer Berechnungen die Performanz einer bestimmten Technologie betrachtet. Hierunter fallen sowohl kurzfristige (z.B. Ertragssimulation von Photovoltaikanlagen), als auch langfristige (z.B. Lebenszyklusanalyse) Untersuchungen.
- *Bilanzierung von Gebäuden:* Diese Modellkategorie leitet meist durch hochaufgelöste Simulationen in einem Bottom-Up Prozess den Energiebedarf von Gebäuden auf Basis von technischen Eigenschaften und/oder Nutzerverhalten ab. Der Fokus liegt dabei auf der Nachfrageseite.
- *Städtisches Klima:* Diese Modelle behandeln im Wesentlichen die klimatischen Verhältnisse in Städten oder einzelnen Gebäuden, bspw. das Phänomen des Hitzestaus in Städten durch die Oberflächenversiegelung.
- *Politikbewertung:* Die betrachteten Studien in dieser Kategorie untersuchen und bewerten den Einfluss politischer Entscheidungen auf die Performanz städtischer Energiesysteme. Darunter gibt es viele empirische Studien sowie Simulations- und Optimierungsmodelle, die unter anderem die multikriterielle Entscheidungsanalyse anwenden.
- *Aktivitäts- und Verkehrsmodelle:* Die Modelle dieser Kategorie versuchen die Dynamik der Aktivitäten innerhalb einer Stadt, insb. bezüglich Landnutzung und Verkehrsmittelwahl, abzubilden. Hieraus können u.a. auch Energiebedarfe abgeleitet werden.
- *Systemgestaltung:* Diese Art von Modellen geht der Frage nach, wie das gesamte Energiesystem gestaltet sein sollte, um bestimmte Bedingungen zu erfüllen. Dabei werden meist die notwendigen Investitionen und Betriebsstrategien ermittelt, um exogen vorgegebene Energienachfragen mit möglichst geringen Kosten zu befriedigen. Für diese Fragestellung werden üblicherweise Methoden der mathematischen Optimierung eingesetzt.

Zusätzlich sind jedoch weitere Kategorien denkbar, die hier nicht erschöpfend aufgeführt werden können.

2.2 Methodische Ansätze

In vielen Fällen bedingt die zu untersuchende Fragestellung auch die Wahl der Methodik. Neben hybriden Ansätzen, die mehrere Ansätze durch Modellkopplung kombinieren, wird im Folgenden zwischen drei verschiedenen Ansätzen unterschieden (vgl. Mainzer et al. 2014):

- *Bilanzierungsmodelle* sind meist statische Berechnungsmethoden, die bspw. unter der Verwendung vielfältiger Eingabedaten Kennwerte berechnen, die entweder direkt zur Entscheidungsunterstützung oder als Indikatoren für weitere Berechnungen dienen können. Je nach Detaillierungsgrad, Bilanzierungsgegenstand und Zweck können diese Modelle recht einfach (z.B. Berechnung eines einzelnen Kennwertes) aber auch hochkomplex (z.B. komplette Lebenszyklusanalyse einer Technologie) sein. Es kann weiter unterschieden werden zwischen ex post- (nachträglich, basierend auf empirischen Werten) und ex ante-Berechnungen (basierend auf Annahmen).
- *Simulationsmodelle* verfügen über eine deskriptive, quantitative Beschreibung der Zusammenhänge innerhalb eines Systems. Simulationsmodelle können weiter unterschieden werden in agentenbasierte Modelle und System Dynamics Modelle. Agentenbasierte Simulationsmodelle können als Bottom-Up Modelle auf mikroökonomischer Ebene Entscheidungsprozesse von Akteuren abbilden, die nicht notwendigerweise optimal oder rational sein müssen. Dabei wird versucht, das Verhalten der Akteure eines Systems möglichst detailgetreu abzubilden. Es wird kein Ziel vorgegeben, die Systementwicklung ergibt sich emergent aus der Interaktion der Akteure innerhalb des Systems. Üblicherweise werden dabei verschiedene Szenarien untersucht, die sich insbesondere in der Wahl der exogen vorgegebenen Rahmenbedingungen unterscheiden. Die Entscheidungsregeln für das Akteursverhalten stammen meist aus Beobachtungen oder theoretischen Überlegungen.
Bei System Dynamics Modellen stehen die Veränderung von Flüssen und Beständen sowie die Identifizierung von positiven oder negativen Rückkopplungseffekten und möglichen Gleichgewichtszuständen im Zentrum der Betrachtungen.
- *Optimierungsmodelle* sind präskriptiv: unter Vorgabe einer Zielfunktion und mehrerer Nebenbedingungen werden Kriterien für das System definiert, die es zu erfüllen gilt. Anschließend wird mittels mathematischer Algorithmen unter allen möglichen Kombinationen der Entscheidungsvariablen derjenige Systemzustand, bzw. Entwicklungspfad ermittelt, der den bestmöglichen Zielfunktionswert ergibt und dabei gleichzeitig alle Nebenbedingungen erfüllt.
Es wird dabei kein explizites Akteursverhalten modelliert, d.h. die Optimierung erfolgt je nach Wahl der Zielfunktion z.B. aus einer betriebs- oder volkswirtschaftlichen Gesamtsystemperspektive.
Zu den Nebenbedingungen zählen üblicherweise modelltechnisch bedingte Zusammenhänge wie der Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage zu jedem Zeitpunkt oder die maximal verfügbaren Flächen für Photovoltaikanlagen, sowie nutzerseitig definierbare Vorgaben wie Obergrenzen für CO₂-Emissionen.

In den meisten Fällen besteht die Zielfunktion bei optimierenden Energiesystemmodellen in der Minimierung aller auf das Basisjahr diskontierten, entscheidungsrelevanten Systemausgaben. Die Betrachtung mehrerer konkurrierender Ziele, bspw. Kosten und CO₂-Emissionen, ist bei der multikriteriellen Optimierung beispielsweise durch Gewichtung der einzelnen Faktoren in einer gemeinsamen Zielfunktion erreichbar. Je nach Komplexität der mathematischen Gleichungen (z.B. linear/nichtlinear) und Anforderungen an die Variablen (z.B. stetig, ganzzahlig, binär) werden Optimierungsmodelle weiter in unterschiedliche Komplexitätsklassen unterschieden.

2.3 Weitere Kriterien

Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal mit großen Auswirkungen auf die Verwertbarkeit der Ergebnisse ist die *zeitliche und räumliche Charakterisierung* der Modelle. Die Wahl der Auflösung (räumlich: z.B. Gebäude, Stadtviertel; sowie zeitlich: z.B. minütlich, viertelstündlich, täglich) der Berechnungen hat wesentliche Auswirkungen auf die Komplexität und damit auf die Rechendauer des Modells. Die Systemgrenze (einzelne Technologie, Gebäude, Stadt) und der Zeithorizont (Tage bis Jahrzehnte in die Zukunft) bestimmen, welche Arten von Auswertungen durch das Modell ermöglicht werden.

Große Auswirkungen auf den Anwendungsbereich hat auch die *Wahl der im Modell abgebildeten Sektoren*, wie bspw. Strom, Wärme oder Verkehr. Im Bereich der städtischen Analysen ist insbesondere der Wärmesektor von großer Bedeutung.

Eine weitere wichtige Entscheidung ist die Zielgruppe, bzw. der *Anwendungsbereich* des Modells. Viele Modelle können aufgrund ihrer Komplexität nur von Spezialisten verwendet werden. Wenn das Modell hingegen auch für fachfremde Benutzer zugänglich sein soll, muss schon bei der Entwicklung auf eine einfache Benutzeroberfläche und Hilfestellungen bei der Durchführung von Analysen geachtet werden. Auch die Interpretation der Modellergebnisse stellt hohe Anforderungen an den Anwender. So muss beispielsweise die Formulierung der Zielfunktion eines Optimierungsmodells bei der Ableitung von Aussagen berücksichtigt werden.

3 Modelle der Gewinnerstädte

In diesem Kapitel werden die in den fünf Gewinnerstädten des Wettbewerbs „Energieeffiziente Stadt“ Delitzsch, Essen, Magdeburg, Stuttgart und Wolfhagen in Entwicklung befindlichen Modelle beschrieben. Hierbei muss erwähnt werden, dass sich die Modelle jeweils noch im Entwicklungsstadium befinden, so dass noch keine abschließenden Aussagen oder Bewertungen zur Qualität der Modelle oder gar der Ergebnisse möglich sind.

3.1 Delitzsch

In der Stadt Delitzsch wird unter der Leitung von Prof. Bruckner am Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement an der Universität Leipzig ein „aktorsorientiertes Energiemanagementsystem“ entwickelt (Bruckner et al. 2010), (Wittmann und Bruckner 2007), (Bruckner 2014). Hierbei handelt es sich um ein hybrides Modell, welches aus zwei alternierend ausgeführten Teilmodellen besteht (vgl. Abbildung 1).

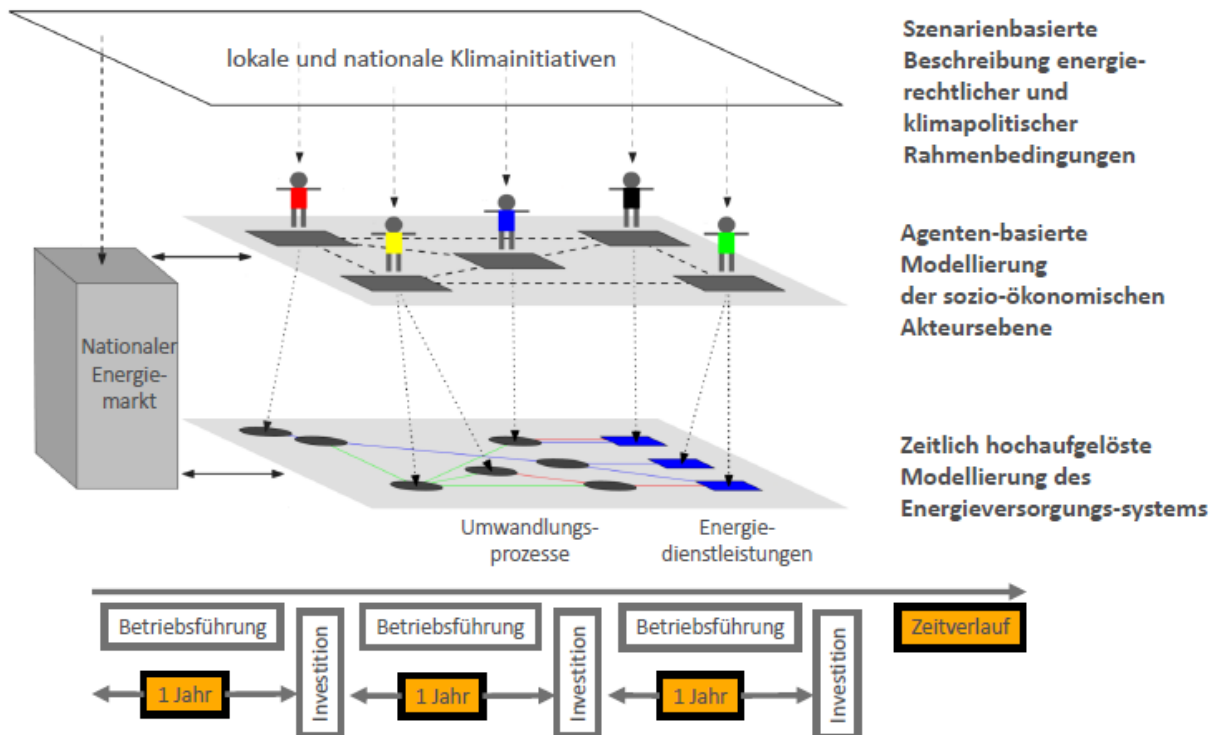


Abbildung 1: Schematische Darstellung des aktorsorientierten Energiemanagementsystems (Quelle: Bruckner 2014).

Dabei wird für jedes Jahr im Betrachtungszeitraum zunächst ein agentenbasiertes Modell zur Abbildung des Investitions- und Umzugsverhaltens eingesetzt, um die begrenzt rationalen Entscheidungen der Haushalte abzubilden. Als Entscheidungsgrundlage für das Verhalten der Agenten werden im Rahmen des Projektes detaillierte soziologische Untersuchungen durchgeführt (vgl. Kirchgeorg et al. 2013, Verhoog und Bruckner 2014, Verhoog et al. 2014). Über so genannte „Policy Exercises“ wird auch das Investitionsverhalten institutioneller Entscheidungsträger auf Basis von Befragungen erhoben und im Modell abgebildet.

Das Modell berücksichtigt dabei die spezifischen Gegebenheiten der schrumpfenden Stadt Delitzsch: vergleichsweise hohe Leerstandsquoten führen einerseits zur großen Bedeutung einer genauen Abbildung des Umzugsverhaltens innerhalb der Stadt, zusätzlich bestehen aus diesem Grund gerade bei Vermietern von Wohneigentum auch große Investitionshemmnisse aufgrund von Unsicherheit. Diesen Umständen wird durch eine Simulation des Umzugsverhaltens Rechnung getragen, womit das Modell speziell auf die Anforderungen schrumpfender Städte zugeschnitten ist.

Die jährlichen Investitionsentscheidungen und die räumliche Verortung der Haushalte dienen anschließend als Input für ein optimierendes Energiesystemmodell. Dieses wird verwendet, um in einer hohen zeitlichen Auflösung die optimale Betriebsführung aller Anlagen zur Bereitstellung von Strom und Wärme während eines Jahres abzubilden.

Das Ziel des Modells ist letztendlich die Entscheidungsunterstützung lokaler Entscheidungsträger, indem die Entwicklung des Gesamtsystems unter der Annahme bestimmter Rahmenbedingungen prognostiziert wird.

Das Modell ermöglicht durch seinen großen Detaillierungsgrad und die hohe Komplexität vielfältige Auswertungen, es ist jedoch hervorzuheben, dass dafür sehr viele spezifische Daten, insbesondere zur Sozialstruktur, benötigt werden.

3.2 Essen

Unter dem Namen Energie-Effizienz-Controller (EEC[®]) wird im Rahmen der Klima-Initiative Essen derzeit ein geodatenbasiertes Instrument zur Bilanzierung des Energiebedarfs und der CO₂-Emissionen in den Bereichen Mobilität und Gebäude entwickelt.

Der EEC[®]-Gebäude wird durch das Institut für Stadtplanung und Städtebau (ISS) der Universität Duisburg-Essen entwickelt (Drobek und Schnabel 2013, Drobek und Schnabel 2014). Das primäre Ziel besteht in der Bereitstellung von Daten für die Stadtverwaltung. Dabei werden sowohl statische Daten (bspw. von städtischen Ämtern, Energieversorgern und Wohnungsunternehmen) zur ex-ante Bewertung des Energiebedarfs, als auch dynamische Daten (aus Smart Metern in 4 Gebäuden bzw. 25 Haushalten) zur Überwachung des tatsächlichen Energiebedarfs während eines Jahres verarbeitet.

Diese Daten werden verwendet, um mit Hilfe verschiedener Berechnungsmodelle den Energiebedarf und die CO₂-Emissionen der Gebäude in Essen zu berechnen. Die Berechnungen sind in der kommerziellen Software ArcGIS implementiert, die Ergebnisse sind somit georeferenziert und können auf einfache Weise in Kartenform dargestellt werden. Bei der Bilanzierung wird stets das Territorialprinzip angewandt, d.h. alle Verbraucher und Emittenten innerhalb des Stadtgebietes werden erfasst.

Weitere, derzeit noch in Entwicklung befindliche Modelle, sollen die Wirkung verschiedener Maßnahmen in Szenarien berechnen. Somit sollen diese Werkzeuge auch die Kontrolle der CO₂-Zielerreichung ermöglichen. Darüber hinaus werden die Daten mit reduziertem Detaillierungsgrad und unter Beachtung des Datenschutzes auch für weitere Nutzergruppen, insbesondere für die Öffentlichkeit, zur Verfügung gestellt. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Funktionen des EEC[®]-Gebäude.

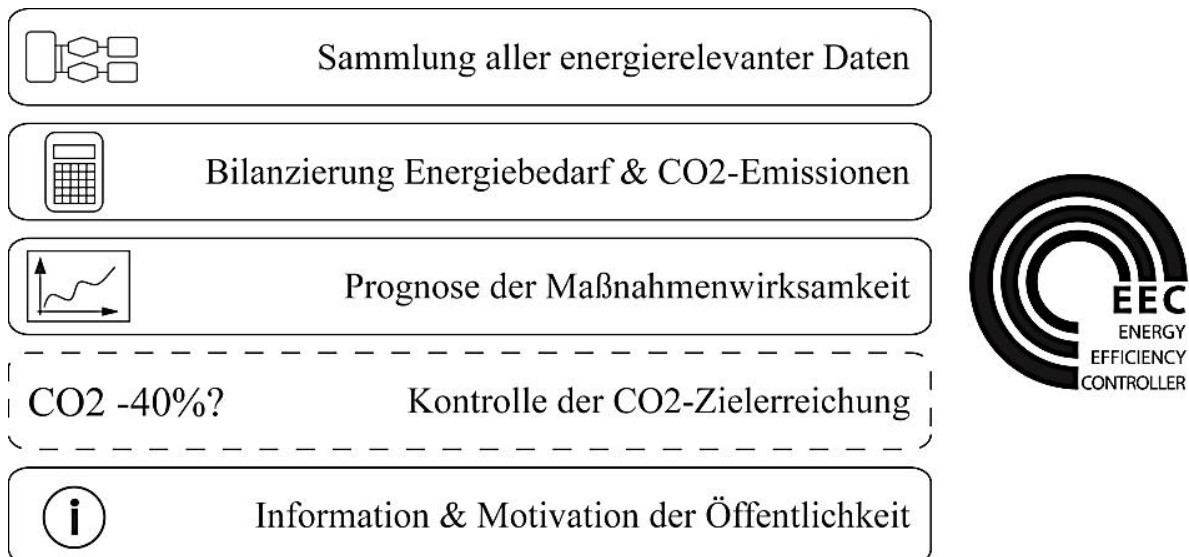


Abbildung 2: Funktionen des EEC® (Quelle: Drobek und Schnabel 2013)

Neben der Stadtverwaltung als Hauptzielgruppe des EEC®-Gebäude können auch andere Nutzergruppen (z.B. Klimaagentur) das Werkzeug als Informationsplattform zur Unterstützung der eigenen Aufgaben oder auch zur Identifizierung und Bewertung neuer Geschäftsfelder (z.B. Energielieferungs-Contracting durch Wohnungsunternehmen oder Energieversorger) nutzen (Drobek und Schnabel 2014).

Das Instrument Low-Carbon-Index® (LCI®) wird ebenfalls durch das Institut für Stadtplanung und Städtebau (ISS) der Universität Duisburg-Essen entwickelt (Drobek und Schnabel 2014). Dabei handelt es sich um ein qualitatives Bewertungssystem der energetischen Qualität von Quartieren. Die Ergebnisse des EEC®-Gebäude und des LCI® sollen in einer Siedlungstypologie, welche Informationen zur Qualität des Gebäudebestandes, der Energieversorgung und zu Energieeinsparpotenzialen enthält, zusammengeführt werden.

Ergänzend zum EEC®-Gebäude wird für den Verkehrssektor der EEC®-Mobilität (Wessely und Wolter 2014) durch die TRC Transportation Research and Consulting GmbH entwickelt. Dieses Instrument erlaubt die Erfassung von Energiebedarf und CO₂-Emissionen aus dem Verkehr um Gebiete mit hohen Einsparpotenzialen zu identifizieren und die Wirksamkeit von Maßnahmen zu quantifizieren. Wie der EEC®-Gebäude verfügt auch der EEC®-Mobilität über einen dynamischen Teil, hierbei werden aktuelle Messdaten von Verkehrsstärken und Geschwindigkeiten im Straßenverkehr integriert. Dies ermöglicht das kontinuierliche Monitoring des Energieverbrauchs im Mobilitätsbereich und kann helfen, den Stand der Zielerreichung zu ermitteln. In den statischen Teil gehen vor Allem Struktur-, Netz- und Fahrzeugdaten ein, zwei unterschiedliche Verkehrsmodelle berechnen daraus Wegematrizen. Auf Basis dieser Daten werden schließlich die Energie- und CO₂-Berechnungen durchgeführt. Durch Szenarienrechnungen können die Auswirkungen verschiedener Maßnahmen, wie Fahrtraining oder Carsharing, bilanziert werden.

Der Fokus der in Essen entwickelten Modelle liegt auf der Bilanzierung von Energieverbrauch und CO₂-Emissionen. Die potenziellen Auswirkungen von Maßnahmen zur

Steigerung der Energieeffizienz werden über statische Berechnungen ermittelt. Die größten Herausforderungen bei der Entwicklung des Werkzeugs bestehen in der Überwachung der Datenqualität und –quantität, sowie im Umgang mit dem Datenschutz.

3.3 Magdeburg

Unter der Bezeichnung Energie-Geoinformationssystem (EnerGIS) entsteht in Magdeburg ein geographisches Informationssystem zur raumbezogenen Darstellung energetischer Daten im Stadtgebiet (Voigt 2013, Gebhardt et al. 2013). Dieses soll unter anderem die räumliche Verknüpfung zwischen Energiebedarf, -infrastruktur und -potenzialen aufzeigen. Für die Berechnung der dafür benötigten Daten werden verschiedene Top-Down und Bottom-Up Methoden sowie diverse Datenquellen verwendet (vgl. Abbildung 3). Durch Kooperationen mit Akteuren der Wohnungswirtschaft werden Energieverbrauchsdaten zur Validierung gewonnen (derzeit für ca. 7% der Wohngebäude). Dabei sollen insbesondere der Energiebedarf und der Sanierungsstand von Wohngebäuden ermittelt und die räumliche Verknüpfung zwischen Energiebedarf, -infrastruktur und -potenzialen aufgezeigt werden.

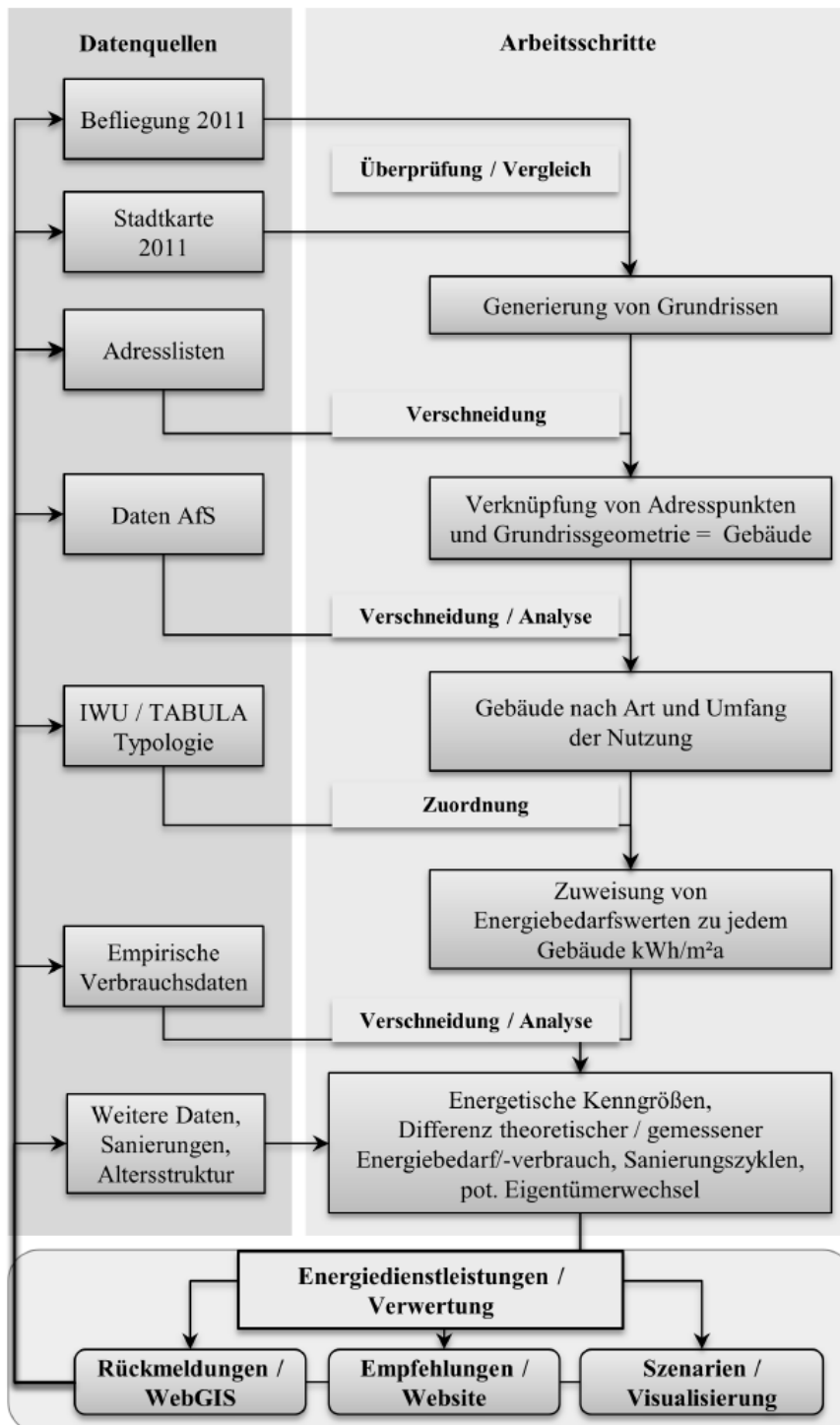


Abbildung 3: Vorgehen bei der Generierung des Wohngebäudebestands als Datengrundlage für das EnerGIS (Gebhardt et al. 2013)

In ähnlicher Weise soll das System StoffSYS als Plattform zum Informationsaustausch dienen. Hier sollen anfallende (Rest-)Stoffe zeitlich und räumlich bilanziert werden und somit Synergieeffekte bei der Ressourcennutzung erhoben werden.

Ein Kennzahlen- und Controllingsystem dient dem Monitoring und soll die vielfältigen Maßnahmen in den Bereichen Infrastruktur, Verkehr, Wirtschaft und Gebäude während der Umsetzungsphase mittels Kennwerten zur Energie- und CO₂-Emissionseinsparung bewerten (Kraft et al. 2014).

Der Fokus der Modelle liegt auf der Information der interessierten Öffentlichkeit sowie der Maßnahmenbewertung und dem Monitoring der Umsetzungserfolge.

3.4 Stuttgart

In Stuttgart werden zwei verschiedene Modelle entwickelt: ein makroskopisches Bilanzierungsmodell, welches den Energieverbrauch und die Emissionen im Stuttgarter Stadtgebiet berechnet (Erhorn et al. 2014), und ein mikroskopisches Simulationsmodell, welches die (Konsum-) Entscheidungen der Stuttgarter Haushalte abbildet und so auch die Wirksamkeit von Maßnahmen prognostizieren soll (Friedrich et al. 2014) (vgl. Abbildung 4).



	Makroskopischer Ansatz (Top down)	Mikroskopischer Ansatz (Bottom up)
Modell- ansatz	Territorialer Ansatz „Was passiert im Stadtgebiet Stuttgart?“	Akteursbezogener Ansatz „Was machen die Stuttgarter Haushalte?“
		
Modell- grenze	Stadtgebiet	Haushalte im Stadtgebiet
Industrie	Industrie wird als eigener Sektor berücksichtigt	Industrie wird makroskopisch über den Konsum berücksichtigt
Fernverkehr	Fernverkehr wird nicht betrachtet	Fernverkehr wird betrachtet

Abbildung 4: Vergleich der beiden in Stuttgart entwickelten Modelle (Quelle: Friedrich et al. 2014)

Das makroskopische Modell verfolgt bei der Bilanzierung einen Top-Down-Ansatz, was bedeutet, dass Daten aus einer höher aggregierten Ebene (bspw. des Landes) mit Hilfe von Schlüsseln (z.B. Einwohnerzahl) auf die Stadtebene skaliert werden. Dabei wird ein territorialer Ansatz verwendet, d.h. es werden alle Verbraucher und Emittenten innerhalb des Stadtgebietes erfasst.

Im mikroskopischen Modell wird hingegen ein akteursbezogener Ansatz verfolgt, d.h. die Aktivitäten aller Stuttgarter Haushalte werden betrachtet. Der Unterschied äußert sich z.B. darin, dass nur im zweiten Ansatz auch der Fernverkehr, d.h. getätigte Fahrten von Haushalten aus Stuttgart in andere Regionen bilanziert wird. In diesem Modell werden zunächst virtuelle Haushalte erzeugt, die jeweils als Agenten in der Lage sind, Konsumententscheidungen zu treffen. Die Entscheidungen hängen von ihren jeweiligen

Eigenschaften, Präferenzen, Ausstattungen etc. ab. Das Modell soll durch seinen simulativen Ansatz in der Lage sein, die Auswirkung von Maßnahmen auf die Konsumententscheidungen der Haushalte und damit auch die Auswirkungen auf Energiebedarf und Emissionen abschätzen zu können.

3.5 Wolfhagen

In Wolfhagen wird ein Web-basiertes geografisches Informationssystem (Web-GIS) für die Verwaltung raumbezogener energetischer Daten entwickelt (Sager und Schmidt 2014). Das System soll einerseits als fachlich-technisches Expertensystem zu Zwecken der Planung und des Monitorings durch städtische Planungsbehörden genutzt werden und andererseits allgemeinverständliche, datenschutztechnisch unkritische Inhalte für die Öffentlichkeit bereitstellen (vgl. Abbildung 5).

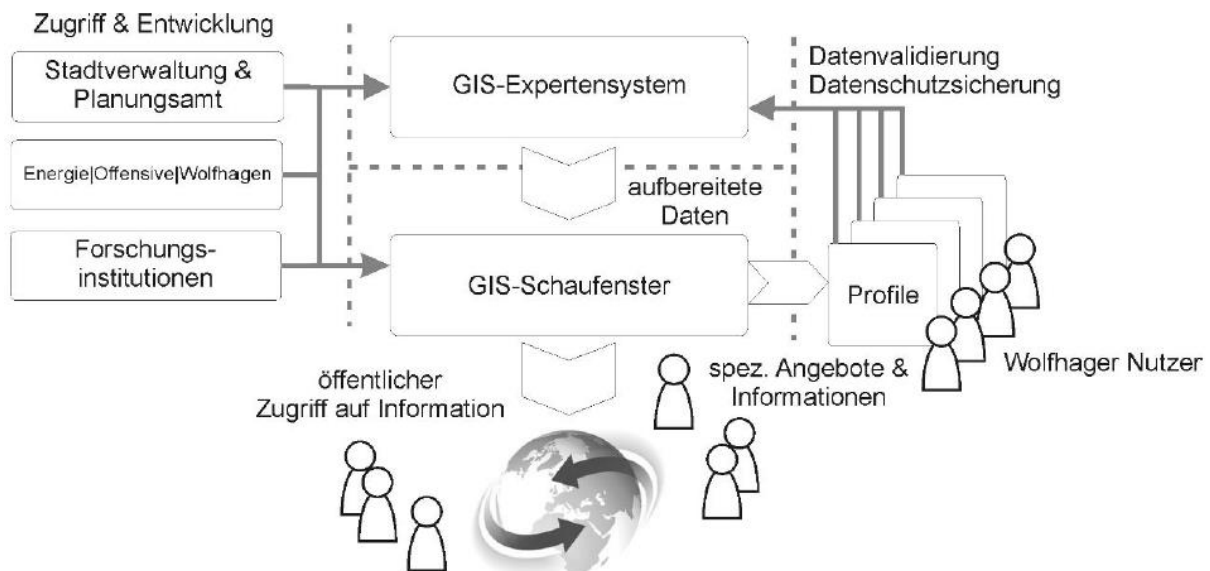


Abbildung 5: Datenfluss und Ebenen des GIS (Quelle: Sager und Schmidt 2014)

Die größte Herausforderung liegt dabei in der Erstellung der nötigen Datenbasis. Mit Hilfe von automatisierten Liegenschaftskarten (ALK) und Luftbildern sowie Literaturwerten für Gebäudekennwerte und spezifische Energiebedarfe wird zunächst der Energiebedarf der Gebäude für Strom, Heizung und Warmwasser berechnet. Diese Berechnungen werden ergänzt durch empirische Werte, die über Begehungen vor Ort und Energieverbrauchsdaten des Energieversorgers erhoben werden. Zur Qualitätssicherung können die Daten über mobile Geräte genutzt und ggfs. auch korrigiert werden. Auch Eigentümer können die Plattform nutzen um Realdaten einzupflegen.

4 Bewertung der Übertragbarkeit

Tabelle 1 gibt einen vergleichenden Überblick der zuvor beschriebenen Modelle. Hier zeigt sich, dass ein Großteil der entwickelten Modelle zu Zwecken des Monitorings sowie zur Information und Kommunikation entwickelt werden. Zielgruppen hierfür sind meist

verschiedene Institutionen im Bereich der Stadtplanung sowie die Öffentlichkeit. Für die Berechnung der Daten werden zum Großteil diverse Bilanzierungsmethoden verwendet.

Tabelle 1: Übersicht über die in den Gewinnerstädten entwickelten Modelle

Stadt & Modell		Zweck	Methodik
Delitzsch	akteursorientiertes Energiemanagementsystem	Systemgestaltung	Simulation Optimierung
Essen	Energie-Effizienz-Controller (EEC [®])	Information & Kommunikation	Bilanzierung
	Low Carbon Index (LCI [®])	Monitoring	Bilanzierung
	EEC [®] -Mobilität	Monitoring	Bilanzierung
Magdeburg	Energie-Geoinformationssystem (EnerGIS)	Information & Kommunikation	Bilanzierung
	Stoffstrommanagementsystem (StoffSYS)	Information & Kommunikation	Bilanzierung
	Kennzahlen- und Controllingsystem	Monitoring	Bilanzierung
Stuttgart	mikroskopisches Bilanz- und Strategiemodell	Systemgestaltung	Simulation
	makroskopisches Bilanzmodell	Monitoring	Bilanzierung
Wolfhagen	Web-GIS	Information & Kommunikation	Bilanzierung

Die meisten Berechnungsmethoden sind auf die Bewertung einzelner Maßnahmen ausgerichtet. Nur wenige Modelle sind zum Zweck der Systemgestaltung, d.h. zur Entwicklung von Empfehlungen für die Gestaltung des gesamten Energiesystems unter Berücksichtigung der Interaktion verschiedener Technologien und Energieträger, entwickelt. Diese verwenden den Ansatz der agentenbasierten Simulation, der im Fall des akteursorientierten Energiemanagementsystems der Stadt Delitzsch mit einem Optimierungsmodell verknüpft wird.

In der Umsetzungsphase des Wettbewerbes „Energieeffiziente Stadt“ werden fünf Städte gefördert, um neue Wege zur Verbesserung der Energieeffizienz zu finden. Das eigentliche Ziel ist jedoch nicht die Verbesserung in diesen konkreten Städten, sondern der Gewinn von Erfahrungen und Erkenntnissen, wie die Energieeffizienz in Städten generell verbessert werden kann. Nur wenn die gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Städte übertragen werden können, hat das Projekt langfristig positive Auswirkungen. Aus diesem Grund sollen die Modelle und Methoden, die in den fünf Städten entwickelt werden, nun unter besonderer Berücksichtigung der Übertragbarkeit auf andere Städte und Kommunen betrachtet werden.

Übertragbare Modelle und Methoden zeichnen sich vor Allem dadurch aus, dass sie ohne aufwendige Anpassungen in einem anderen Kontext, d.h. insbesondere auf eine andere Stadt angewandt werden können. Dafür müssen sowohl das Modell selbst (d.h. die Implementierung), als auch die benötigten Daten zugänglich sein. Im besten Fall wird für die Implementierung nicht-proprietäre Software eingesetzt, damit keine unnötigen Kosten mit dem Modelleinsatz durch andere potenzielle Nutzer verbunden sind. Zudem sollte die Logik des Modells nicht mit spezifischen Voraussetzungen (z.B. an die Infrastruktur) verbunden sein. Spezifische Anpassungen in einzelnen Modellen an die Gegebenheiten der jeweiligen Stadt (wie bspw. der Fokus auf die exakte Abbildung des Umzugsverhaltens in Delitzsch) haben bei der Anwendung auf andere Städte (bspw. bei sehr geringen Leerstandsquoten) möglicherweise nur einen geringen Mehrwert, stehen der Übertragbarkeit deshalb jedoch nicht grundsätzlich im Wege. In Bezug auf die verwendete Methodik gibt es momentan keine absehbaren Hemmnisse für die Übertragbarkeit der in Entwicklung befindlichen Modelle.

In Laufe des Projekts hat sich bei der Modellentwicklung jedoch immer wieder die Quantität und Qualität der verfügbaren Daten als wesentliche Herausforderung herausgestellt. Wesentliche Eingangsgrößen für viele Analysen, wie z.B. der Gebäudebestand und dessen Energiebedarf sowie das Potenzial für die Nutzung Erneuerbarer Energien sind üblicherweise nicht verfügbar. Teilweise ist die Erhebung dieser Daten mit erheblichem Aufwand verbunden, in anderen Fällen sind die Daten zwar z.B. beim örtlichen Energieversorger vorhanden, können aber aus datenschutzrechtlichen oder wettbewerblichen Gründen nicht weitergegeben werden.

Viele der im Projekt entwickelten Modelle begegnen diesem Problem durch den Einkauf von Daten von Dienstleistern, durch eigene Erhebungen, wie z.B. Befragungen vor Ort, oder durch Kooperationen mit Stadtwerken, Wohnungsbauunternehmen, etc. Diese Lösungen sind im Einzelfall praktikabel, können aber aufgrund von Kosten, Verfügbarkeit und Aufwand nicht überall angewendet werden und stehen somit der Übertragbarkeit im Wege.

Als mögliche Lösung bietet sich die Verwendung frei verfügbarer Daten an (vgl. auch Mainzer et al. 2014). Hilfreich sind in diesem Zusammenhang Entwicklungen wie Open Data, Open Source und Open Government, die die freie Verfügbarkeit öffentlicher Daten im Internet propagieren. So sind beispielsweise durch das OpenStreetMap (OSM) – Projekt (OpenStreetMap-Mitwirkende 2015) vielerorts detaillierte Informationen zum Gebäudebestand frei verfügbar, die wiederum durch öffentliche Quellen (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2014, Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2015) validiert und ergänzt werden können.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag hat die Aktivitäten im Bereich der Modellierung in den fünf Gewinnerstädten des Wettbewerbs „Energieeffiziente Stadt“ zusammengefasst. Nach einer Charakterisierung der in Entwicklung befindlichen Modelle wurde insbesondere die Übertragbarkeit der Modelle bewertet.

Es zeigte sich dabei, dass ein Großteil der Modelle zur Information und Kommunikation entwickelt werden. Die Bewertung von Maßnahmen erfolgt hauptsächlich im Nachhinein in kontinuierlichen Monitoring-Prozessen. Komplexere Modelle zur a-priori Bewertung von Maßnahmen im Rahmen einer Gesamtsystemmodellierung finden sich in den Projekten von Delitzsch und Stuttgart. Die Methodik der Modelle ließe sich meist problemlos auf andere Städte und Gemeinden übertragen, die Verfügbarkeit der für die Berechnungen benötigten Daten und teilweise auch die Verwendung kommerzieller Software könnten jedoch Hürden darstellen.

Um die Übertragbarkeit der Modellierung zu gewährleisten, müsste ein Modell, das zur Energiesystemanalyse für beliebige Städte genutzt werden kann, demnach geeignete Methoden einsetzen, um wichtige Eingangsdaten (z.B. Strom- und Wärmebedarf von Gebäuden, Potenziale für Erneuerbare Energien) lediglich auf Basis frei und flächendeckend verfügbarer Datenquellen zu berechnen. Dies kann unter Verwendung öffentlicher Statistiken, z.B. des statistischen Bundesamts, aber auch mit Hilfe anderer offener, insbesondere im Internet verfügbarer Datenquellen geschehen. Durch diese Kombination von Bottom-Up und Top-Down Methoden kann einerseits eine hohe Granularität und andererseits eine vollständige Abdeckung erreicht werden.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wird mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SF0415B gefördert.

6 Literaturverzeichnis

Bruckner, Thomas (2014): Agenten und Akteure: Innovative Konzepte für den urbanen Klimaschutz. Jahrestreffen 2014 des Wettbewerbs Energieeffiziente Stadt. Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement - IIRM Universität Leipzig, 2014. Online verfügbar unter https://www.wettbewerb-energieeffiziente-stadt.de/index.php?eID=tx_nawsecured1&u=0&g=0&t=1435921071&hash=3ae986cdfff1f5be6667f0849e5f9c8e4c8c16a3&file=fileadmin/Agenten_und_Akteure__Bruckner.pdf, zuletzt geprüft am 20.02.2015.

Bruckner, Thomas; Gröger, Maria; Schmid, V. (2010): Wege in die energieeffiziente urbane Moderne. Entwicklung eines akteursorientierten kommunalen Energiemanagementsystems in Delitzsch. Abschlussbericht BMBF-Förderinitiative "Wettbewerb Energieeffiziente Stadt". Hg. v. Institut für Infrastruktur und Ressourcenmanagement Universität Leipzig, Forschungsstelle für Kommunale

Energiewirtschaft, Große Kreisstadt Delitzsch und Technische Werke Delitzsch und Leipziger Institut für Energie GmbH. Online verfügbar unter <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb11/656073098.pdf>, zuletzt geprüft am 14.02.2013.

Bundesregierung (2010): Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung. Hg. v. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Content/DE/_Anlagen/2012/02/energiekonzept-final.pdf;jsessionid=3A37062E78760F6225555E2CC21D559F.s4t2?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 15.03.2013.

Bundesrepublik Deutschland (Hg.) (2013): CO2-Gebäudesanierung – energieeffizient Bauen und Sanieren. Online verfügbar unter http://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/Energiesparen/CO2-Gebaeudesanierung/_node.html.

Drobek, Sabine; Schnabel, Fabian (2013): Geodatenbasiertes Monitoring für die Stadt Essen – Energie-Effizienz-Controller. In: Marco K. Koch (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 1: Gebäude und Haushalte. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 14).

Drobek, Sabine; Schnabel, Fabian (2014): Energiebilanz in der Praxis - Ausrichtung des Energiebilanzierungssystems an verschiedene Nutzergruppen innerhalb des Systems Stadt (Essen). In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).

Erhorn, Hans; Friedrich, Markus; Rabenstein, Benjamin; Ritz, Charlotte; Schrade, Johannes (2014): Makroskopische Energiebilanz für Städte und Kommunen. In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).

Friedrich, Markus; Erhorn, Hans; Magg, Christoph; Rabenstein, Benjamin; Schmaus, Matthias; Schrade, Johannes (2014): Entwicklung eines mikroskopischen Bilanz- und Strategiemodells zur Abschätzung des Energieverbrauchs in Haushalten. In: Marco K. Koch und Russell McKenna (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 3: Methoden und Modelle. Berlin, Münster: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, Bd. 16).

Gebhardt, Katharina; Nestmann, Ulrike; Schulte, Sven (2013): Magdeburg | Wohngebäude im Bestand - Datenerfassung. In: Marco K. Koch (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 1: Gebäude und Haushalte. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 14).

IZT (2014): Internetseite des Wettbewerbs Energieeffiziente Stadt. Hg. v. BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung. Online verfügbar unter <https://www.wettbewerb-energieeffiziente-stadt.de/>.

Keirstead, James; Jennings, Mark; Sivakumar, Aruna (2012): A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (6), S. 3847–3866. DOI: 10.1016/j.rser.2012.02.047.

Kirchgeorg, Manfred; Verhoog, Mart; Bruckner, Thomas (2013): Zielgruppenspezifische Ansprache von Akteuren im Modernisierungsmarkt. In: Marco K. Koch (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 1: Gebäude und Haushalte. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 14).

Kraft, Martin; Jovanovic, Zoran; Zadek, Hartmut (2014): Methoden zur Evaluierung von Energie- und CO2-Einsparungen am Beispiel des Magdeburger Verkehrssektors. In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).

- Mainzer, Kai; McKenna, Russell; Fichtner, Wolf (2014): Modelle und Methoden zur Entscheidungsunterstützung bei der Planung urbaner Energiesysteme. In: Marco K. Koch und Russell McKenna (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 3: Methoden und Modelle. Berlin, Münster: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, Bd. 16), S. 11–20.
- OpenStreetMap-Mitwirkende (Hg.) (2015): OpenStreetMap. Online verfügbar unter <http://www.openstreetmap.org/>, zuletzt geprüft am 20.04.2015.
- Sager, Christina; Schmidt, Dietrich (2014): Monitoring von Energiesystemen in kleinen und mittelgroßen Kommunen - Beispiel Energiebedarfe Haushalte. In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2014): Zensusdatenbank Zensus 2011. Online verfügbar unter <https://ergebnisse.zensus2011.de/>, zuletzt aktualisiert am 14.05.2014, zuletzt geprüft am 20.04.2015.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2015): Regionaldatenbank Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/logon>, zuletzt aktualisiert am 20.04.2015, zuletzt geprüft am 20.04.2015.
- Verhoog, Mart; Bruckner, Thomas (2014): Erfolgskontrolle von kommunalen Energieeinspar- und Klimaschutzprogrammen. In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).
- Verhoog, Mart; Geyler, Stefan; Bruckner, Thomas (2014): Akzeptanzkorridor für die energetische Gebäudesanierung am vermieteten Objekt. In: Marco K. Koch und Russell McKenna (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 3: Methoden und Modelle. Berlin, Münster: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, Bd. 16).
- Voigt, Manfred (2013): Die Rolle des Hauses in der Energieversorgung - Zur Konzeption räumlicher Versorgungssysteme. In: Marco K. Koch (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 1: Gebäude und Haushalte. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 14).
- Wessely, Artur; Wolter, Stefan (2014): Bilanzierung, Potenzialanalyse und Monitoring der verkehrsbedingten Energieverbräuche in Essen sowie Handlungsansätze zur Reduzierung der CO₂-Emissionen. In: Marco K. Koch und Jürgen Görres (Hg.): Wettbewerb "Energieeffiziente Stadt". Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring. Berlin: LIT (Energie und Nachhaltigkeit, 15).
- Wittmann, Tobias; Bruckner, Thomas (2007): Agentenbasierte Modellierung urbaner Energiesysteme. In: *Wirtsch. Inform.* 49 (5), S. 352–360. DOI: 10.1007/s11576-007-0079-5.

Working Paper Series in Production and Energy

recent issues

- No. 1** Alexandra-Gwyn Paetz, Lisa Landzettel, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:
Eine netnografische Analyse der Nutzererfahrungen mit E-Rollern
- No. 2** Felix Teufel, Michael Miller, Massimo Genoese, Wolf Fichtner:
Review of System Dynamics models for electricity market simulations
- No. 3** Patrick Jochem, Thomas Kaschub, Wolf Fichtner:
How to integrate electric vehicles in the future energy system?
- No. 4** Sven Killinger, Kai Mainzer, Russell McKenna, Niklas Kreifels, Wolf Fichtner
A regional simulation and optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives
- No. 5** Kathrin Dudenhöffer, Rahul Arora, Alizée Diverrez, Axel Ensslen, Patrick Jochem, Jasmin Tücking
Potentials for Electric Vehicles in France, Germany, and India
- No. 6** Russell McKenna, Carsten Herbes, Wolf Fichtner:
Energieautarkie: Definitionen, Für- bzw. Gegenargumente, und entstehende Forschungsbedarfe
- No. 7** Tobias Jäger, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Onshore wind energy in Baden-Württemberg: a bottom-up economic assessment of the socio-technical potential
- No. 8** Axel Ensslen, Alexandra-Gwyn Paetz, Sonja Babrowski, Patrick Jochem, Wolf Fichtner:
On the road to an electric mobility mass market - How can early adopters be characterized?
- No. 9** Kai Mainzer, Russell McKenna, Wolf Fichtner:
Charakterisierung der verwendeten Modellansätze im Wettbewerb Energieeffiziente Stadt

The responsibility for the contents of the working papers rests with the author, not the institute. Since working papers are of preliminary nature, it may be useful to contact the author of a particular working paper about results or caveats before referring to, or quoting, a paper. Any comments on working papers should be sent directly to the author.

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Hertzstr. 16
D-76187 Karlsruhe

KIT – Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Working Paper Series in Production and Energy
No. 9, September 2015

ISSN 2196-7296

www.iip.kit.edu

www.kit.edu