

Entwicklung eines mikroskopischen Bilanz- und Strategiemodells zur Abschätzung des Energieverbrauchs in Haushalten

Markus Friedrich, Hans Erhorn, Christoph Magg, Benjamin Rabenstein, Matthias Schmaus und Johannes Schrade

Kurzfassung

Um die Wirkungen potenzieller Maßnahmen und externer Entwicklungen unter Berücksichtigung des Trends kumulativ und in ihrer zeitlichen Entwicklung abschätzen zu können, wird im Projekt SEE Stuttgart ein mikroskopisches Bilanz- und Strategiemodell entwickelt. Der private Haushalt als wirtschaftliche Entscheidungseinheit steht im Mittelpunkt des Mikromodells und wird mit seinem Energiekonsum in den Bereichen Gebäude und Heizung, Strom und Mobilität abgebildet.

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes SEE Stuttgart wurde ein makroskopisches Energiebilanzmodell erstellt, das eine Analyse des Energieumsatzes der Landeshauptstadt Stuttgart und der wesentlichen Quellen und Senken energieverbrauchsrelevanter Aktivitäten in Wirtschaft und Stadtgesellschaft ermöglicht [ERH2014] [SCH2012]. Um die Wirkungen potenzieller Maßnahmen, externer Entwicklungen (z. B. Entwicklung des Energiepreises, Einführung neuer Technologien) und des Trends (Sanierungsraten, Fahrzeugflottenerneuerung) in ihrer kumulativen Wirksamkeit genauer abschätzen und in ihrer zeitlichen Entwicklung prognostizieren zu können, wird zusätzlich ein mikroskopisches Bilanz- und Strategiemodell entwickelt. Während beim makroskopischen Modell die Bilanzierung auf Grundlage des Top-Down-Ansatzes realisiert wird, findet für das mikroskopische Modell der Bottom-Up-Ansatz Anwendung (Abbildung 1-1).

Ziel der mikroskopischen Modellentwicklung ist es, vorgeschlagene Maßnahmen zur Energieeinsparung unter realitätsnahen Bedingungen auf ihre Wirksamkeit prüfen zu können. Das Mikromodell soll Hinweise geben, wie die privaten Haushalte auf Informationen, Ge- und Verbote, Preise oder nicht-monetäre Verhaltensanreize reagieren.

Im Mittelpunkt des Mikromodells steht der private Haushalt als wirtschaftliche Entscheidungseinheit mit seinen zugehörigen Individuen. Kennzeichnend für den Modellansatz ist der modulare Aufbau aus eigen-

ständigen Modellen. Ein Gebäudemodell generiert den Energieverbrauch für Heizung sowie Warmwasser und ein Verkehrsmodell bildet das Mobilitätsverhalten ab. Ein Haushaltsmodell verbindet diese Modelle und beschreibt das Konsumverhalten unter Berücksichtigung interner Randbedingungen des Haushalts, die sich aus finanziellen Restriktionen (verfügbares Haushaltseinkommen), zeitlichen Restriktionen (verfügbares Zeitbudget für Ortsveränderungen) und räumlichen Restriktionen (z. B. Entfernung zum Arbeitsplatz) ergeben.

Das mikroskopische Haushaltsmodell ist in ein Gesamtmodell eingebettet, das die externen Randbedingungen abbildet. Dieses Gesamtmodell stellt keine Neuentwicklung dar, sondern eine Anpassung und Kopplung von bereits vorhandenen sektoralen Makromodellen (Gebäudemodelle, Verkehrsmodelle, Bevölkerungsmodelle). Grundlage für die Modellkalibrierung ist eine Haushaltsbefragung, in der die energierelevanten Eigenschaften von 700 Haushalten erhoben werden [SCH2014].

	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 1-1: Gegenüberstellung des makroskopischen und mikroskopischen Modellansatzes

2 Überblick zur Modellbildung

Die zentralen Anforderungen an das Modell sind im Folgenden zusammengefasst:

- Es soll individuelle Entscheidungsprozesse von Haushalten und Eigentümern nachbilden, die den Energieverbrauch beeinflussen.
- Es soll die demographischen, sozioökonomischen, wirtschaftlichen und raumbezogenen Randbedingungen abbilden, die die Entscheidungsprozesse beeinflussen.
- Es soll prognose- und szenariofähig sein, so dass die Wirkungen veränderter Energiepreise, technischer, monetärer und ordnungspolitischer Maßnahmen abgeschätzt werden können.

Damit ist es möglich, den Endenergieverbrauch (EEV) der privaten Haushalte in Stuttgart für den Zeitraum bis 2050 zu ermitteln. Hierzu wird der EEV einer repräsentativen Menge von Haushalten H modelliert. Jeder Haushalt hat ein Gewicht G_h zur Hochrechnung auf die Grundgesamtheit aller Haushalte. Die Aufsummierung über den gewichteten EEV der Haushalte liefert dann wie in Abbildung 2-1 dargestellt den EEV der privaten Haushalte in Stuttgart. Der EEV ist die Grundlage, um daraus Primärenergie, CO₂-Emissionen und Energiekosten zu berechnen.

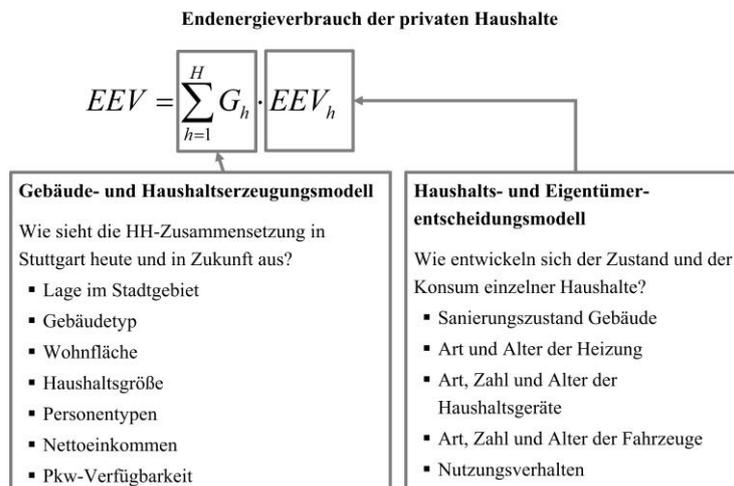


Abbildung 2-1: Überblick über das Modell

3 Gebäude- und Haushaltserzeugungsmodell

Um den kumulierten Energieverbrauch der privaten Haushalte in Stuttgart für verschiedene Szenarien zu ermitteln, wird theoretisch jeder einzelne Haushalt betrachtet. Durch Einsatz eines Gebäude- und Haushaltsgenerators kann der Abstraktionsgrad des Modells angepasst und der sich daraus ergebende Rechenaufwand reduziert werden. Aufbauend auf realen Daten der Haushaltsbefragung erzeugt der Generator eine repräsentative Stichprobe virtueller Haushalte (Stichprobengröße 30.000 Haushalte), die in ihrer Verteilung der tatsächlichen Struktur der Haushalte im Stadtgebiet im Hinblick auf die Haushaltsgröße, die Personenzusammensetzung, die Wohngebäude, die Lage und das Haushaltseinkommen entsprechen. Abhängig von der Betrachtungstiefe ist auch eine Simulation mit allen 300.000 Haushalten im Stuttgarter Stadtgebiet denkbar.

Für Gebäude und Haushalt werden zwei eigenständige Modelle verwendet, die sich aber gegenseitig beeinflussen. Ebenso erfolgt die Erzeugung der Gebäude und Haushalte getrennt, zur Erfüllung der Randsummen wird jedoch ein iterativer Prozess durchlaufen. In diesem Erzeugungsprozess werden folgende Aufgaben bearbeitet:

- Gebäude generieren (geokodiert im Stadtgebiet Stuttgart)
- Eigentumsverhältnisse festlegen
- Haushalte generieren und in Gebäude platzieren

3.1 Gebäudeerzeugungsmodell

Das Gebäudeerzeugungsmodell setzt sich aus einer technischen Ebene, in der die Gebäudeeffizienz beschrieben ist, und einer sozio-ökonomischen Ebene, die den Einfluss von Eigentümer und Bewohner (Haushalte) abbildet, zusammen.

Technische Ebene

Unter Verwendung von normativen Bewertungsprozeduren zur Berechnung des Energiebedarfs von Wohngebäuden lässt sich mit der technischen Ebene des Gebäudemodells der Nutz-, End- und Primärenergiebedarf ermitteln.

Für die Gebäudemodellierung kann auf die IKARUS Datenbank des Fraunhofer IBP zurückgegriffen werden, die speziell auf die Gegebenheiten des Stuttgarter Wohngebäudebestands angepasst wird. Basierend auf typischen Bauformen und baualtersspezifischen Konstruktionsweisen können so die energetischen Merkmale (Effizienzgrad) eines Gebäudes

abgebildet werden. Die Anlagentechnik (Heizung und Wohnungslüftung) wird mittels einer Anlagentypologie beschrieben, die sich an den Anlagenbeispielen der DIN V 4701-10 orientiert.

Um die Einflüsse von Siedlungsform (Nachbarbebauung, Siedlungsdichte, Infrastruktur, etc.) auf die Gebäudeeffizienz und deren Optimierungspotenzial mit in die Betrachtung zu ziehen, werden die Einzelgebäude zu Siedlungsstrukturen zusammengefasst. Die siedlungsspezifischen und energetischen Kenngrößen verschiedener Erscheinungsformen von Siedlungen werden mittels der in [ERH2011] beschriebenen Siedlungstypen abgebildet.

Sozio-ökonomische Ebene

Die Nutzer/Bewohner eines Hauses beeinflussen mit ihrem Nutzerverhalten (Lüften, Raumtemperatur, Sonnenschutz, Warmwasser, etc.) und ihrem technischen Ausstattungsgrad (Beleuchtung, Unterhaltungselektronik, Haushaltsgeräte, etc.) maßgeblich die thermische Gebäudebilanz. Das unterschiedliche Nutzerverhalten und die internen Lasten werden über eine Nutzertypologie (ggf. Lebensstiltypen) abgebildet.

Für die Entscheidung, ob Investitionen in energetische Sanierung getätigt werden, sind neben Gebäudezustand und Bewohnern (erzielbare Mieten/verfügbares Wohngeld) auch die Eigentumsverhältnisse von großer Bedeutung. Statistiken für Stuttgart zeigen, dass zwischen unterschiedlichen Eigentumsformen (z. B. Wohneigentümergeinschaft und Wohnbaugesellschaften) stark unterschiedliche Sanierungsaktivitäten festzustellen sind, die einerseits auf unterschiedliche Interessenslagen, aber auch auf ungleich kompliziertere Entscheidungsprozesse zurückzuführen sind. Diese unterschiedlichen Aspekte werden mittels einer Eigentümertypologie in das Gebäudemodell eingebracht.

3.2 Haushaltserzeugungsmo- dell

Die Erzeugung der Haushalte ist eng verknüpft mit der Nutzertypologie auf der sozio-ökonomischen Ebene des Gebäudes. Die Zusammensetzung der Haushalte wird aus verschiedenen Datenquellen generiert, so dass zur Einhaltung der verschiedenen Randbedingungen bezüglich Haushaltstypen und Einzelpersonen Algorithmen von [MÜL2011] eingesetzt werden. Außerdem werden dem Haushalt bei der Erzeugung elektrische Geräte (Kühlschrank, Waschmaschine, etc.) und eine Fahrzeugflotte zugewiesen (Pkw, Fahrrad, Zeitkarte für den Öffentlichen Verkehr, etc.).

4 Haushalts- und Eigentümerentscheidungsmodell

Der Gebäude- und Haushaltsgenerator erzeugt Haushalte mit Eigenschaften bezüglich Ausstattung, Verhalten und finanzieller Situation (Einkommen und Ausgabenverteilung) und nimmt eine Zuordnung zu generierten Gebäuden vor. In der Simulation wird, wie in Abbildung 4-1 dargestellt, der Zustand des Haushalts von Jahr zu Jahr fortgeschrieben. Dabei treffen der Haushalt und/oder der Eigentümer eines Gebäudes Entscheidungen zu Investitionen (technische Ausstattung) und zum Konsumverhalten. Der aktuelle Zustand im Jahr a wird auf Grundlage der externen Randbedingungen mit den Wirkungsmodellen für Gebäude, Verkehr und elektrische Geräte ermittelt. Ausgehend vom aktuellen Zustand werden die Entscheidungen des Haushalts simuliert. Die Auswirkungen der Entscheidungen werden für den Zustand im Jahr $a+1$ übernommen. Grundlage für die Aufteilung des Haushaltseinkommens auf Konsumbereiche sind einkommensabhängige Verteilungen, die das Statistische Bundesamt regelmäßig erhebt [STA2014]. Steigen bei gleichbleibenden Einnahmen die Ausgaben in einzelnen Konsumbereichen, beispielsweise aufgrund von Energiepreiserhöhungen, muss in anderen Konsumbereichen (z. B. Urlaubsreisen, Vermögensaufbau) gespart werden. Umgekehrt können Einsparungen durch höhere Effizienz zu einem Mehrkonsum führen.

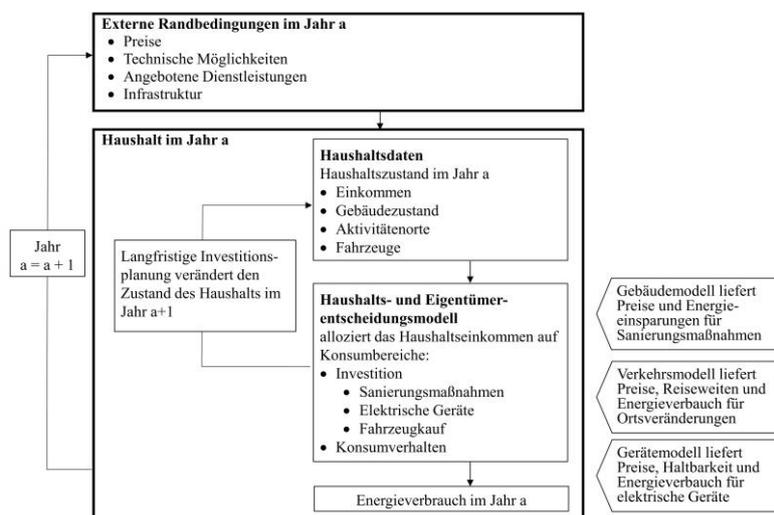


Abbildung 4-1: Schema Simulationsablauf

Investition

Die technische Ausstattung des Haushalts wird maßgeblich von den verfügbaren elektrischen Geräten, von den verfügbaren Fahrzeugen, von der Heizungsanlage und vom Gebäude, in dem der Haushalt lebt, bestimmt. Geräte, Fahrzeuge, Heizung und Gebäude werden im Folgenden als Produkte bezeichnet. Wesentliche Eigenschaften eines Produkts sind die Investitionskosten, die Unterhaltskosten, das Alter, ggf. die Größe und der spezifische Verbrauch. Die Anzahl der Produkte in einem Haushalt und ihre Eigenschaften ergeben sich aus folgenden Entscheidungen eines Haushalts:

(1) Zeitpunkt an dem ein Produkt angeschafft, substituiert oder abgeschafft wird:

- Neuanschaffung: das Produkt war zuvor im Haushalt nicht vorhanden bzw. wird zusätzlich angeschafft
- Substitution: vorhandenes Produkt wird ersetzt
- Verkauf/Abschaffung: vorhandenes Produkt wird verkauft und kein Ersatzprodukt gekauft, die „Investition“ entspricht in diesem Fall einem Erlös

(2) Eigenschaften des anzuschaffenden Produkts: z. B. Größe und Effizienzklasse eines Produkts.

Konsumverhalten

Die technische Ausstattung und das verfügbare Einkommen bestimmen das Konsumverhalten. Es wird wie folgt beschrieben:

- Jährliche Nutzungsdauer elektrischer Geräte (Einsatzstunden) und Nutzungsverhalten (z. B. Kühlschranktemperatur), resultierender Geldbetrag Stromkonsum
- Jährliche Nutzungsdauer Heizung (Volllaststunden) und Nutzungsverhalten (Raumtemperatur), resultierender Geldbetrag Wärmekonsum
- Zurückgelegte Kilometer differenziert nach Verkehrsmittel (Pkw, Öffentlicher Verkehr, Flug und weitere) und nach Alltags- bzw. Fernmobilität, resultierender Geldbetrag Mobilitätskonsum
- Geldbetrag Wohnen (z. B. Miete)
- Geldbetrag Konsumprodukt k

5 Datenversorgung und Modellkalibration

Eine wesentliche Aufgabe beim Modellaufbau ist die Datenversorgung und die Kalibration der Modellparameter. Die Daten für das mikroskopische Modell werden aus den in [BEC2013] beschriebenen Datenmodellen gewonnen. Dazu zählen unter anderem:

- Siedlungsstruktur (Einwohner nach Alter, Arbeitsplätze, Verkaufsflächen, Einkommen, Migrationshintergrund, Mietspiegel)
- Gebäude (Geometrische Eigenschaften, Gebäudeart, Gebäudealter, Gebäudenutzung, energetische Eigenschaften)
- Heizungsstruktur (Nennleistung der Feuerungsanlagen, Baualter, Energienutzung und Energieträger)
- Verkehrsangebot (Kapazität, Geschwindigkeit, ÖV-Linienwege, Fahrpläne)
- Verkehrsnachfrage (Ortsveränderungen von Personen je Modus zwischen Verkehrszellen, Verkehrsstärke auf Wegen und ÖV-Linien)

Außerdem wird im Rahmen der Energieberatung privater Haushalte eine Befragung durchgeführt, die drei Teilbefragungen umfasst [SCH2014]:

- Erfassung der Haushaltsdaten (u.a. Personendaten, Haushaltseinkommen, Gebäudedaten, Fahrzeugdaten, Haushaltsausstattung)
- Erfassung des heutigen energierelevanten Verhaltens (Revealed Preference: Was haben Sie tatsächlich gemacht?)
- Erfassung des energierelevanten Verhaltens in hypothetischer Situationen (Stated Preference: Was würden Sie machen, wenn...?)

Mit diesen Daten werden die folgenden Schritte durchgeführt:

- Erzeugung einer repräsentativen Stichprobe virtueller Haushalte
- Kalibrierung der Entscheidungsmodelle des Konsumverhaltens anhand der Daten des heutigen Verhaltens und des Verhaltens in hypothetischen Situationen
- Versorgung dieser Stichprobe mit den Daten aus den Teilmodellen Gebäude und Verkehr
- Anwendung des Modells für den Ist-Zustand und Hochrechnung auf die Grundgesamtheit aller Haushalte
- Validierung des Modells mit den Daten aus dem Makromodell

6 Modellanwendung

Das Modell ermöglicht die Quantifizierung der Wirkungen potenzieller Maßnahmen unter Berücksichtigung des allgemeinen Entwicklungstrends. Es dient der genaueren Bewertung der Maßnahmen, die auf städtischer Ebene durchgeführt werden können und die einen Haushaltsbezug haben [GÖR2010]. Außerdem werden die Wirkungen der folgenden Maßnahmen oder externen Entwicklungen auf den Energieverbrauch der privaten Haushalte abgeschätzt:

- Entwicklung der Energiepreise
- Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen und energieeffizienten Produkten (Gebäude, Elektrogeräte, Fahrzeuge)
- Wirkungen von veränderten Angeboten im Verkehrssektor
- Bereitstellung neuer Technologien

Anders als beim makroskopischen Bilanzierungsmodell werden die Reaktionen der Haushalte auf die externen Entwicklungen und auf die Maßnahmen modelliert. Die Wirkungen werden dynamisch in Jahresschritten ermittelt, so dass auch die zeitabhängigen Durchdringungsraten neuer Technologien und der Einfluss der Energiepreisentwicklung auf die Sanierungsrate berücksichtigt werden können. Das mikroskopische Bilanz- und Strategiemodell ist damit eine wesentliche Voraussetzung für die Abschätzung von Optimierungspotenzialen und die Erstellung einer Energie Road Map.

7 Fazit

Das beschriebene mikroskopische Haushaltsmodell befindet sich derzeit in der Spezifikationsphase. Die Umsetzung und Anwendung erfolgt in den kommenden 2 Jahren im Rahmen der Projektbearbeitung. Die Entwicklung eines neuen Modells ist immer mit Chancen und Risiken verbunden. Erst die Anwendung wird zeigen, wie gut das Modell den Energieverbrauch im Status Quo abbilden kann und wie es auf Maßnahmen reagiert. Das Risiko bei der Modellentwicklung wird jedoch dadurch reduziert, dass es auf bereits vorhandenen Teilmodellen für das Gebäude und den Verkehr aufbaut. Außerdem sind mehrere Ausbaustufen geplant, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden. In einer ersten Ausbaustufe kommt beispielsweise anstelle der Simulation der Haushaltsentscheidungen ein einfaches Austauschmodell zum Einsatz, das alte Produkte nach

einer vorgegeben Nutzungsdauerverteilung einfach durch ein neues, effizienteres Produkt ersetzt.

Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben wird mit den Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem Förderkennzeichen 03SF0405 gefördert.

Literatur

- [BEC2013] BECK, R., ERHORN, H., FRIEDRICH, M., GÖRRES, J., RABENSTEIN, B., SCHRADER, J.: *Geodaten für die Erstellung von Energiebilanzen und die Bewertung energiebezogener Maßnahmen*. In: KOCH, M., WAGNER, H.-J., (Hrsg.): *Wettbewerb Energieeffiziente Stadt, Band 1: Gebäude und Haushalt*. Berlin, 2013 – 978-3-643-12328-2.
- [ERH2011] ERHORN-KLUTTIG, H., JANK, R., SCHREMPF, L., DÜTZ, A., RUMPEL, F., SCHRADER, J., ERHORN, H., BEIER, C., SAGER, C., SCHMIDT, D.: *Energetische Quartiersplanung: Methoden – Technologien – Praxisbeispiele*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2011.
- [ERH2014] ERHORN, H., FRIEDRICH, M., RABENSTEIN, B., RITZ, C., SCHRADER, J.: *Makroskopische Energiebilanz für Städte und Kommunen*. In: WAGNER, H.-J., GÖRRES, J. (Hrsg.): *Wettbewerb Energieeffiziente Stadt, Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring*. Berlin, 2014.
- [GÖR2010] GÖRRES, J. ET AL.: *Stadt mit Energieeffizienz SEE Stuttgart – Abschlussbericht Phase 2*, Stuttgart, 2010.
- [MÜL2011] MÜLLER, K., AXHAUSEN, K. W.: *Hierarchical IPF: Generating a synthetic population for Switzerland*. 51st Congress of the European Regional Science Association, Barcelona, September 2011.
- [SCH2012] SCHRADER, J., ERHORN, H.: *Energiebilanz Stadt Stuttgart 2010 – Makroskopische Bilanzierung und Visualisierung von Energieströmen*. Nicht veröffentlichte Entwurfsfassung, 2012.
- [SCH2014] SCHMAUS, M., SCHRADER, J., ERHORN, H., FRIEDRICH, M., MAGG, C., RABENSTEIN, B., WÖSSNER, S.: *Erfassung energierelevanter Kenngrößen privater Haushalte*. In: WAGNER, H.-J., GÖRRES, J. (Hrsg.): *Wettbewerb Energieeffiziente Stadt, Band 2: Energieversorgung, Energiebilanzierung und Monitoring*. Berlin, 2014.
- [STA2014] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Wirtschaftsrechnungen – Einnahmen und Ausgaben privater Haushalte 2012*. Fachserie 15 Reihe 1, Wiesbaden, 2014.