Analyse und Optimierung städtischer Energiesysteme

Kai Mainzer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP),
Lehrstuhl für Energiewirtschaft

Hertzstraße 16 – Gebäude 06.33 (Campus West), Raum 005
D-76187 Karlsruhe
kai.mainzer@kit.edu
Tel.: +49 721 608-44589

Analyse und Optimierung städtischer Energiesysteme

Einleitung

Städte und Gemeinden sind von zentraler Bedeutung für das Gelingen der Energiewende und die Dekarbonisierung des Energiesektors. Sie bieten große Potenziale sowohl für die Steigerung der Energieeffizienz auf der Verbrauchsseite, als auch für die klimaneutrale Erzeugung von Strom und Wärme durch die Nutzung erneuerbarer Energien. Viele Städte und Gemeinden sind sich dieser Bedeutung bewusst und verfolgen ambitionierte Nachhaltigkeitsziele. Oft fehlt es jedoch, insbesondere in kleineren Gemeinden, am nötigen Knowhow um die lokalen Potenziale quantifizieren und die verfügbaren Maßnahmen einander gegenüberstellen zu können.

Deshalb wurde im Rahmen dieser Arbeit das RE³ASON (Renewable Energies and Energy Efficiency Analysis and System OptimizatioN) Modell entwickelt. Dieses Modell kann in Städten und Gemeinden eingesetzt werden, um

1. automatisierte Analysen anhand öffentlicher Daten zum gegenwärtigen Zustand des städtischen Energiesystems, insbesondere zur Struktur des Energiebedarfs durchzuführen,
2. die Potenziale für die Nutzung erneuerbarer Energien zu bestimmen, sowie
3. den techno-ökonomisch optimalen Entwicklungspfad und die zur Zielerreichung benötigten Investitionen in diverse angebots- und nachfrageseitigen Technologien zu ermitteln.

Diese Ergebnisse können genutzt werden, um Handlungsempfehlungen für die städtischen Entscheidungsträger abzuleiten oder um diese z.B. bei der Formulierung eines Energiekonzepts zu unterstützen.

In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise bei diesen Analysen kurz beschrieben, anschließend werden einige beispielhafte Ergebnisse vorgestellt.

Bestimmung der Nachfragestruktur

Zur Berücksichtigung der Infrastruktur für die Übertragung und Verteilung von Strom, Gas und Wärme stellt das Modell Methoden zum Datenimport aus OpenStreetMap bereit. Die Daten können anschließend manuell modifiziert werden, um beispielsweise Szenarien zu einem möglichen Ausbau der Fernwärmenetze in einer Stadt zu bewerten.

Durch eine Verknüpfung von Daten der amtlichen Gebäudestatistik und Geodaten zu den Grundrissen der Gebäude in einer Stadt wird automatisiert der Gebäudebestand ermittelt. Dabei wird jedes Gebäude anhand einer Gebäudetypologie nach Baualter und Gebäudetyp kategorisiert.

Zur Modellierung der Nachfrage nach Raumwärme wird ein Einzonen-Gebäudesimulationsmodell verwendet. Dabei wird der Wärmebedarf der unterschiedlichen Gebäudetypen durch Berechnung der jeweiligen Wärmeverluste durch Transmission und Lüftung und unter Berücksichtigung solarer Einstrahlungen und interner Wärmegewinne berechnet. Als Basis dienen Temperaturprofile der betrachteten Region.

Schließlich wird die Stromnachfrage mit Hilfe eines Bottom-Up Simulationsmodells modelliert. Grundlage dafür sind statistische Daten zur Ausstattung von Haushalten mit unterschiedlichen Haushaltsgeräten. Durch eine Simulation der Anwesenheit und Gerätenutzung der Haushaltsbewohner kann somit das Strombedarfsprofil jedes Haushaltes abgeleitet werden (vgl. Abb. 1).

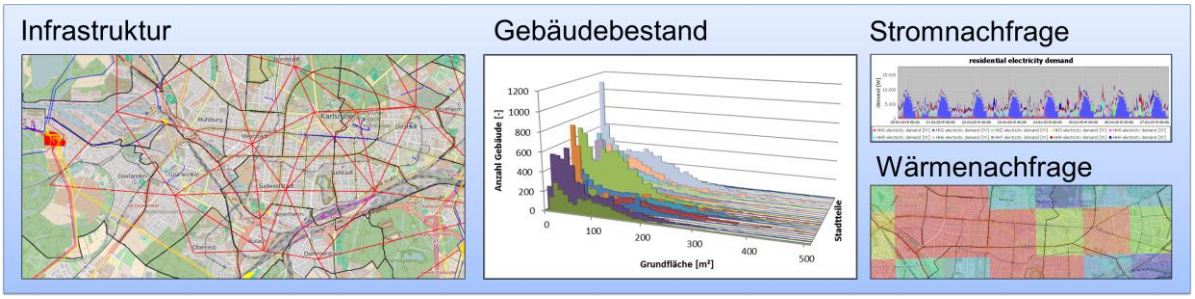


Abb. 1: Beispielhafte Ergebnisse der automatisierten Charakterisierung der Nachfragestruktur einer Gemeinde.

Analyse der Potenziale für Erneuerbare Energien

Von großer Bedeutung für die nachhaltige Gestaltung städtischer Energiesysteme ist die Nutzung lokaler erneuerbarer Energien. Es existieren bereits vielfältige Methoden, um die Potenziale hierfür zu bestimmen, diese sind jedoch meist entweder auf proprietäre Daten angewiesen, oder zu ungenau für die Erstellung von Energiekonzepten. Da das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Modell auf beliebige Städte übertragbar sein soll, wurden daher neuartige Methoden zur Potenzialermittlung entwickelt, die diesen Ansprüchen genügen sollen.

Um die Potenziale für Photovoltaik zu bestimmen, werden im zu untersuchenden Gebiet zunächst die Grundrisse aller Gebäude bezogen und mit den Satellitenbildern, die die jeweiligen Dächer zeigen, kombiniert. Im nächsten Schritt werden diese Bilder mit verschiedenen Methoden der Bilderkennung analysiert, um die genaue Position des Dachgiebels und somit die Lage, Größe und Ausrichtung der Teilflächen jedes Gebäudedachs zu extrahieren. Daraufhin wird bestimmt, wie viele PV-Module auf jeder Teildachfläche platziert werden können.

Anschließend erfolgt auf Basis von Klimadaten und technischen Charakteristika der PV-Module und Wechselrichter eine zeitlich hochaufgelöste Simulation der möglichen Stromerzeugung im Jahresverlauf. Unter Berücksichtigung der Kosten für Installation und Betrieb können schließlich die Stromgestehungskosten jeder Anlage bestimmt werden. Bestandsanlagen werden unter Verwendung eines künstlichen neuronalen Netzes zur Bilderkennung automatisch erkannt und vom Potenzial ausgeschlossen (vgl. Abb. 2).

Abb. 2: Beispielhaftes Ergebnis für die automatisierte Analyse der PV-Potenziale in einer Gemeinde. Hier sind nur Anlagen mit Stromgestehungskosten unter 12 €ct/kWh eingezeichnet. Gebäude, auf denen bereits bestehende PV-Anlagen erkannt wurden, sind rot markiert.

Zur Bestimmung der erschließbaren Flächen für die Windkraft-Nutzung werden zunächst sämtliche Acker-, Wald- und Wiesenflächen im untersuchten Gebiet bezogen. Um Belästigungen durch Schallimmissionen, Schattenwurf, etc. zu minimieren, werden anschließend Regeln angewandt, die einen Mindestabstand der geplanten Anlagen zu Wohngebieten, Naturschutzgebieten, Stromtrassen, usw. garantieren. Zusätzlich wird die Geländetopographie berücksichtigt, um Flächen mit starker Hangneigung auszuschließen.

Zur Bestimmung der möglichen Stromerzeugung wird das Jahresprofil der Windgeschwindigkeiten am untersuchten Standort mit den anlagenspezifischen Leistungskennlinien der am Markt verfügbaren Windkraftanlagen kombiniert. Somit kann für jeden Standort der am besten geeignete Anlagentyp bestimmt werden. Unter Berücksichtigung von Mindestabständen zwischen den Anlagen, die gegenseitige Abschattungen reduzieren sollen, wird diese Vorgehensweise iterativ für alle in Frage kommenden Standorte durchgeführt, bis die verfügbare Fläche erschöpft ist (vgl. Abb. 3).

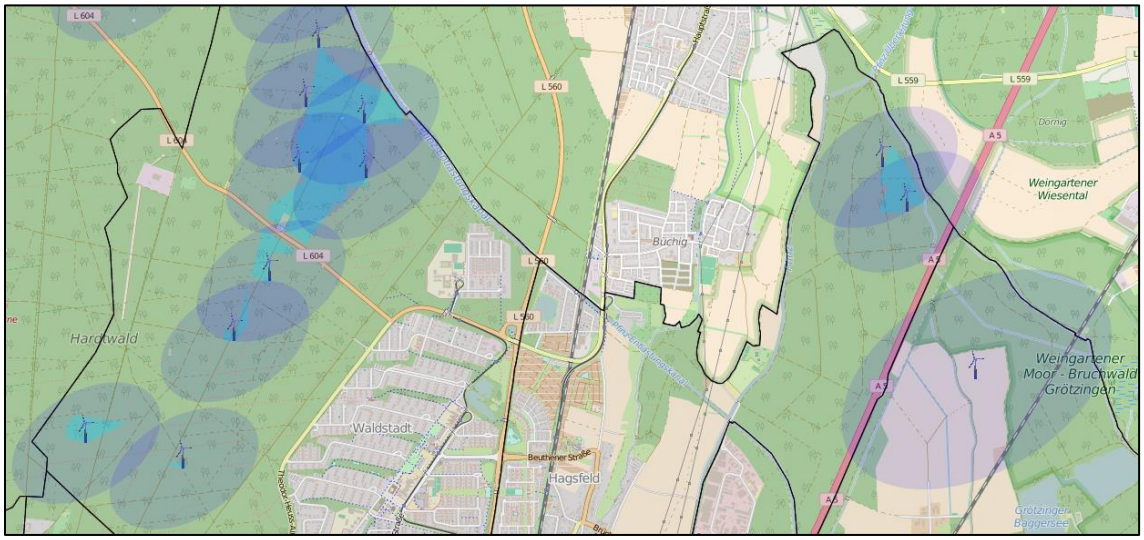


Abb. 3: Platzierung von Windkraftanlagen (dunkelblaue Symbole mit halbtransparenten Abstandsellipsen) innerhalb der nutzbaren Fläche (hellgrün).

In ähnlicher Weise wird das Potenzial zur Erzeugung von Strom und Wärme aus Biomasse bestimmt. Hierfür werden zunächst die nutzbaren Flächen bestimmt, und anschließend in Abhängigkeit von standortspezifischen Hektarerträgen die mögliche Strom-, Wärme- oder Biogaserzeugung ermittelt.

Techno-ökonomische Optimierung des städtischen Energiesystems

Im Anschluss an die Ermittlung der Nachfragestruktur sowie der Potenziale für erneuerbare Energien werden diese Daten als Input für ein Optimierungsmodell, welches als gemischt-ganzzahliges lineares Programm formuliert ist, verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Langfrist-Optimierungsmodell in der Klasse der Energie- und Stoffflussmodelle. Treiber des Modells ist die Deckung der Nachfrage nach Energiedienstleistungen, zusätzlich werden technische sowie nutzerseitig definierbare Restriktionen (z.B. Emissionsminderungsziele) berücksichtigt (Abb. 4).

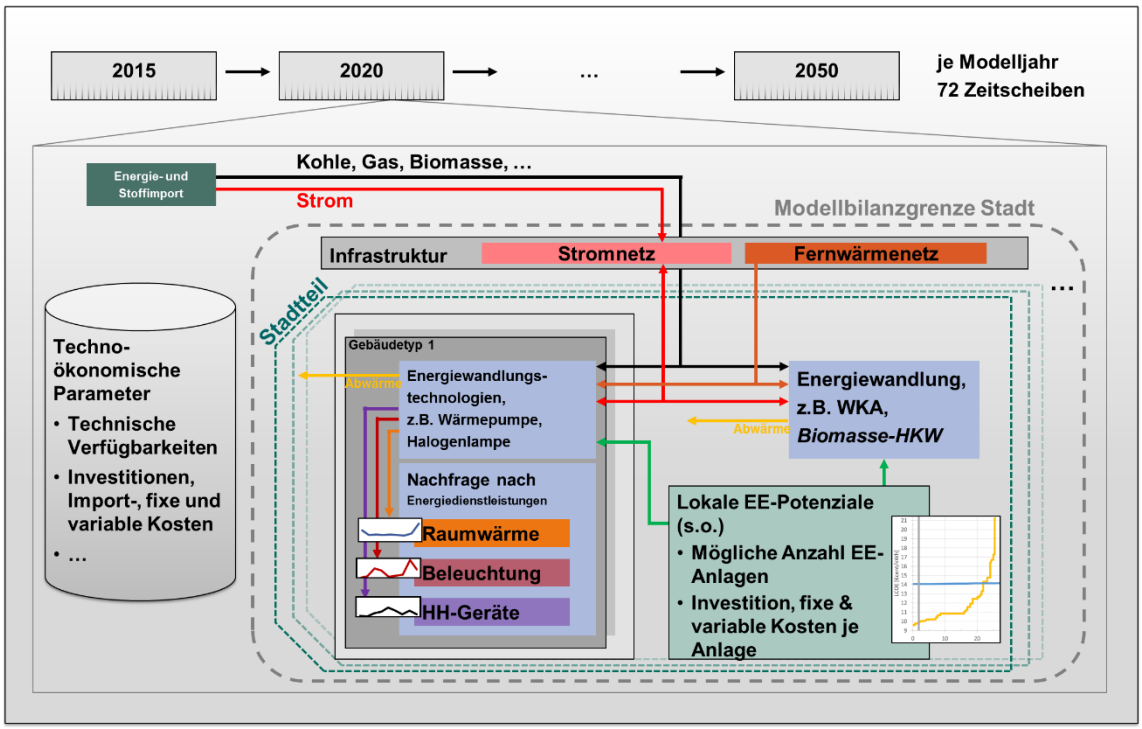


Abb. 4: Schematische Darstellung des Optimierungsmodells.

Das Modell wird verwendet, um den optimalen Einsatz, sowie die benötigten Investitionen in angebots- und nachfrageseitige Technologien zur Energiewandlung zu bestimmen. Als Zielfunktion können hierbei verschiedene Indikatoren, wie die Minimierung der Gesamtsystemkosten, der Emissionen, oder der benötigten Energieimporte, gewählt werden.

Ergebnisse

Dieser Prozess der Energiesystemanalyse und -optimierung wurde in einer Fallstudie mit der Gemeinde Ebhausen (Baden-Württemberg) durchgeführt. Dabei wurden zunächst im Rahmen zweier Workshops in der Gemeinde die Präferenzen für verschiedene Technologien, sowie die

relevanten Zielgrößen aus Sicht der städtischen Akteure ermittelt. Anschließend wurde das Modell eingesetzt, um unter diesen Voraussetzungen die benötigten Maßnahmen zur Erreichung einer kostenminimalen Systementwicklung zu bestimmen (vgl. Abb. 5 a). Die Empfehlungen aus diesem Szenario umfassen u.a. die verstärkte Nutzung effizienter Gas-Brennwertkessel und Wärmepumpen, sowie moderate Verbesserungen bei der Wärmedämmung und der Effizienz von Haushaltsgeräten.

In einem weiteren Schritt wurden anschließend die Emissions-, sowie Energieimport-minimierenden Systementwicklungspfade berechnet. Aus den hieraus abgeleiteten Grenzwerten wurden vier weitere Szenarien definiert, um bspw. festzustellen, welche Emissionsminderungen erzielbar wären, wenn eine geringe Zunahme bei den Kosten (10%, bzw. 20% im Vergleich zum Kostenminimum) in Kauf genommen würde. Das Ergebnis hieraus (vgl. Abb. 5 b) zeigt, dass sich in diesen Fällen deutliche Verbesserungen bei der Emissionsminderung (51%, bzw. 64% der maximal erzielbaren Verbesserung), sowie leichte Verbesserungen bei den Importen (27%, bzw. 36%) erzielen ließen.

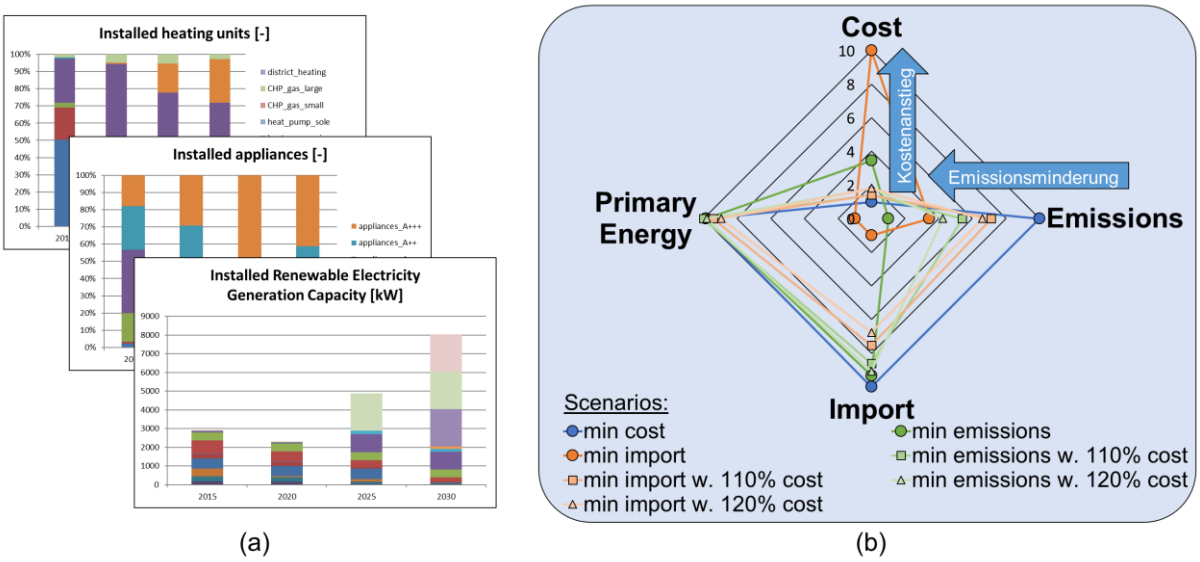


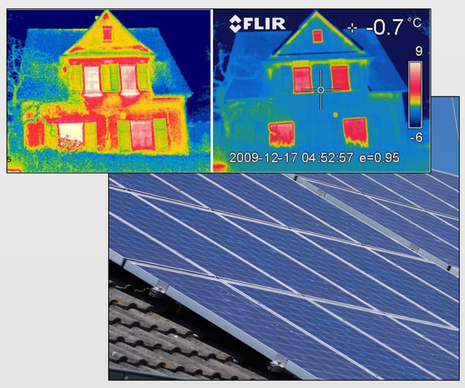
Abb. 5: a) Beispielhafte Ergebnisse für Investitionsentscheidungen im Referenzszenario, b) Vergleich der vier unterschiedlichen Zielindikatoren für sieben verschiedene Szenarien (normierte Skala: 1 = bester, 10 = schlechtester Wert).

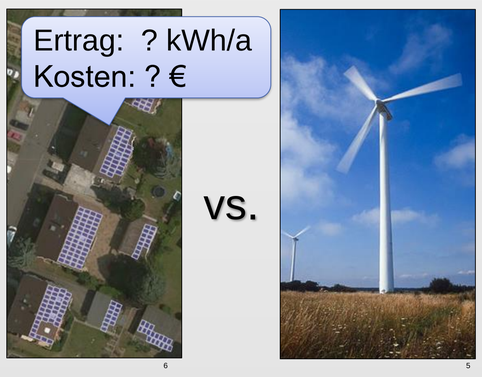
Lehrstuhl für Energiewirtschaft,
Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)

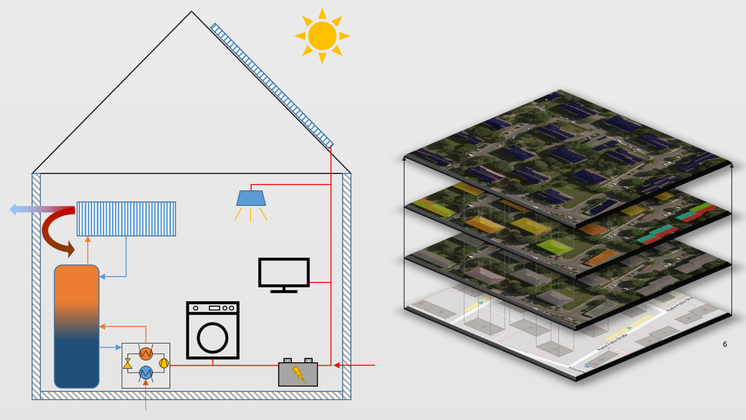
RE³ASON: Ein Werkzeug zur Analyse und Optimierung städtischer Energiesysteme

Kai Mainzer

Motivation







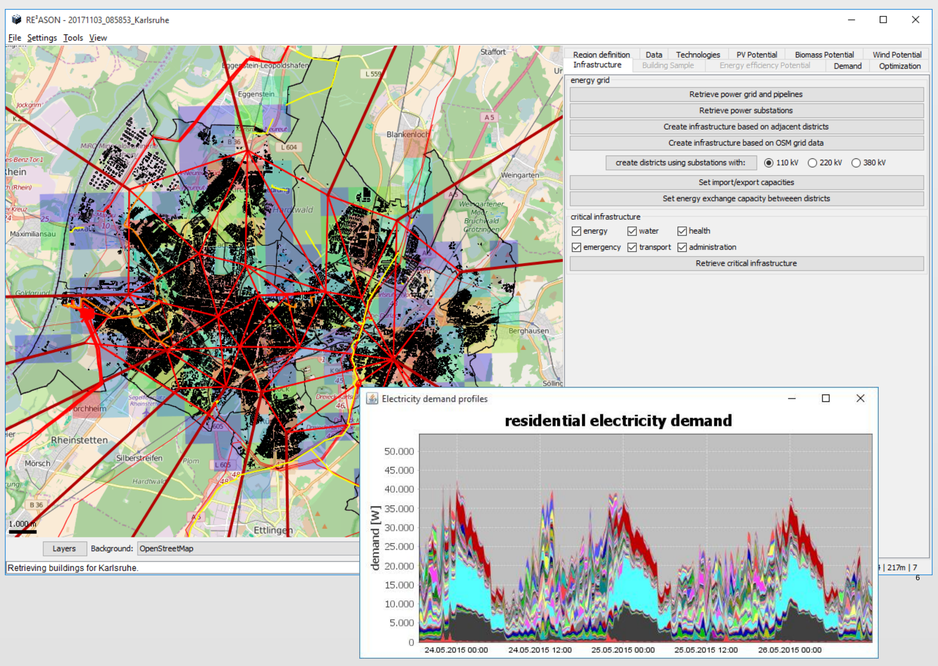
- Städte verfolgen Nachhaltigkeitsziele
- Energiekonzepte werden benötigt

- Potenziale für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz sind vorhanden

- Das genaue Potenzial, die Kosten, und welche Alternativen am Besten geeignet sind, ist aber nicht bekannt

- Hohe Systemkomplexität durch Interaktionen zwischen verschiedenen Technologien, Gebäuden und Sektoren
- Techno-ökonomische Bewertung der Maßnahmen nötig

Übertragbare Methoden zur Analyse städtischer Energiesysteme

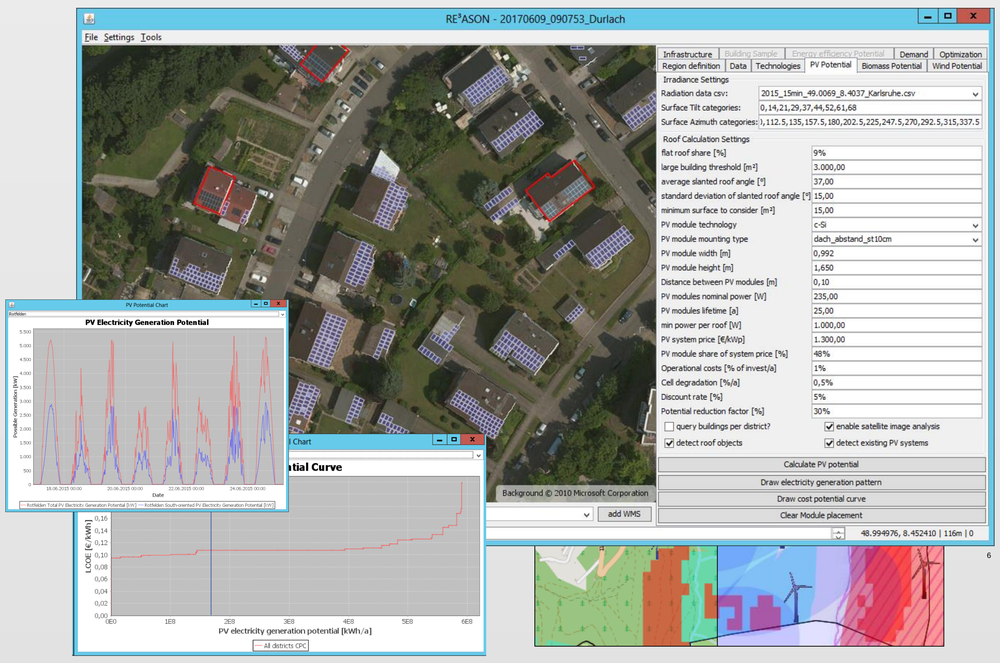


Das RE³ASON*-Modell ermöglicht die automatisierte Analyse von:

- Infrastruktur,
- Gebäudebestand,
- Strom-
- und Wärmebedarf.

Zusätzlich können die Kosten und Potenziale für Erneuerbare Energien bestimmt werden:

- Windkraft
- Photovoltaik
- Biomasse



Techno-ökonomische Optimierung des städtischen Energiesystems

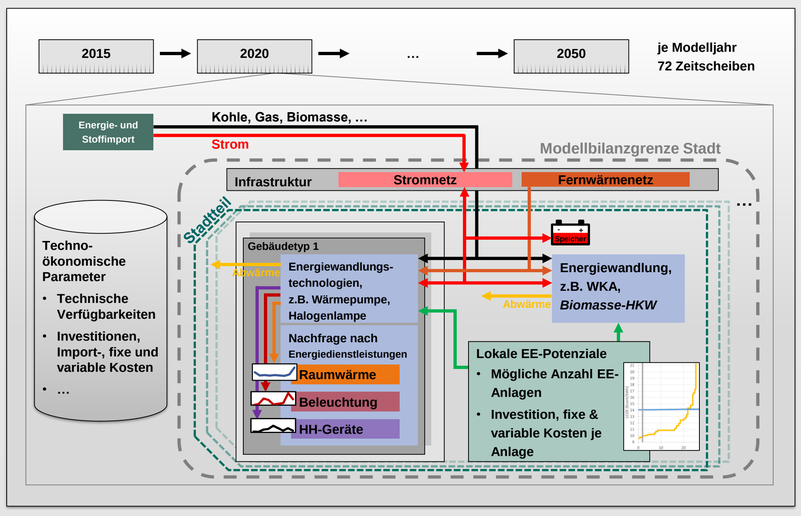
Für die Erstellung eines Energiekonzeptes müssen nun die unterschiedlichen Technologiekombinationen im Kontext der betrachteten Stadt bewertet werden.

Die lokalen Entscheidungsträger können dabei festlegen, welche Ziele verfolgt werden sollen, z.B.:

„Reduzierung der CO_2-Emissionen um 30% bis 2025“

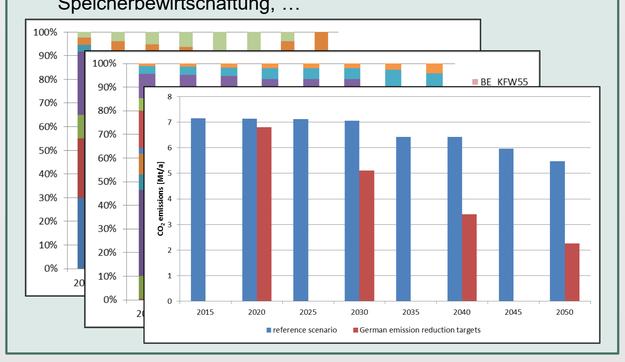
„Deckung unserer Stromnachfrage zu 100% aus Erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2030“

Ein integriertes Optimierungsmodell ermittelt nun die benötigten Investitionen und den optimalen Technologiemix, um diese Ziele möglichst kostengünstig zu erreichen.



- MILP: $\min_{x_i \in \mathbb{R}, x_j \in \{0;1\}} \{c^T x \mid Ax \leq b, l \leq x \leq u\}$
- Lösung des gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsproblems mittels Branch-and-Cut Verfahren

Detaillierte Ergebnisse:
Investitionsentscheidungen, Anlageneinsatz, Speicherbewirtschaftung, …



- Benötigte Investitionen zur Umsetzung des empfohlenen Systementwicklungspfads
- Optimaler Ausbau der erneuerbaren Energien
- Sinnvolle Technologiekombinationen
- Entwicklung von Kosten, Emissionen, Energieimporten und Primärenergiebedarf unter Berücksichtigung der jeweiligen Ziele

*RE³ASON: Renewable Energies and Energy Efficiency Analysis and System OptimizatioN

Veröffentlichungen

- Mainzer, K.; Fath, K. et al. (2014): A high-resolution determination of the technical potential for residential-roof-mounted photovoltaic systems in Germany. In *Solar Energy* 105, pp. 715–731. DOI: 10.1016/j.solener.2014.04.015.
- Killinger, S.; Mainzer, K. et al. (2015): A regional optimisation of renewable energy supply from wind and photovoltaics with respect to three key energy-political objectives. In *Energy. DOI:* 10.1016/j.energy.2015.03.050.
- Mainzer, K.; McKenna, R. et al. (2015): Integrating residential energy efficiency measures into optimizing urban energy system models. *eceee 2015 Summer Study on energy efficiency*. Presqu'île de Giens, 05.06.2015.
- Mainzer, K.; McKenna, R. et al. (2015): Rolling Horizon Planning Methods in Long-Term Energy System Analysis MILP Models. *CORS/INFORMS International Meeting 2015*. Montréal, 17.06.2015
- Mainzer, K.; Schlund, D. et al. (2016): Rooftop PV Potential Estimations: Automated Orthographic Satellite Image Recognition Based on Publicly Available Data. Proceedings of *EU PVSEC 2016*. Munich, 20 - 24 June 2016.
- Mainzer, K. (2016): A model for the identification and optimal planning of emission reduction measures in urban energy systems. *Urban Transitions Global Summit 2016*. Elsevier. Shanghai, 08.09.2016.
- Mainzer, K., Killinger, S. et al. (2017): Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. In *Solar Energy* 155, 561–573.

Abbildungen:
[1]http://www.covenantofmayors.eu, [2]http://www.100-ee.de/, [3]http://www.european-energy-award.de/, [4]https://bioenergiedorf.fnr.de/, [5]http://commons.wikimedia.org, [6]Eigene Darstellung mit Kartendaten von OpenStreetMap und Bing Maps

Kontakt: kai.mainzer@kit.edu