

Optimale Sektorenkopplung

Projektnews

Juli 2023 | 2. Zwischenbericht

Bild: Fotolia, ag_Visuell

ESM-Regio – Modellprojekt modelliert Energiesystem in bayerischer Beispielregion

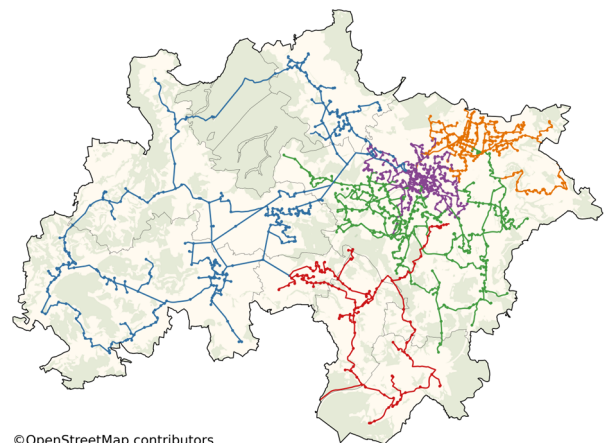
Um Klimaneutralität in Bayern zu erreichen, ist es beabsichtigt, bis 2030 die Erzeugungsleistung sowohl von Photovoltaik als auch von Windkraft zu verdoppeln. Als Folge wird die Stromproduktion in bestimmten Zeiträumen den Bedarf der bisherigen elektrischen Verbraucher übersteigen. Um zusätzliche Möglichkeiten der Nutzung regenerativer Energien in anderen Sektoren, wie beispielsweise im Wärme-, Verkehrs- und Brennstoffsektor zu analysieren, wird in ESM-Regio das Energiesystem sektorübergreifend modelliert und an der Realität gespiegelt. Bayreuth dient dafür als regionale Beispielregion. Diese zweiten Projektnews berichten über die Grundlagen, Methodiken und erste Validierungen.

Stromsektor

Im Forschungsprojekt ESM-Regio umfasst die Modellierung des Stromsektors die gesamte Mittelspannungsebene innerhalb der Region und lässt sich gemäß der Netzstruktur der Stadtwerke Bayreuth in fünf einzelne Teilnetzgebiete untergliedern. Eine gesonderte Betrachtung bzw. Modellierung dieser Teilnetzgebiete ist aufgrund der zugrundeliegenden entkoppelten Betriebsweise (im Normalbetrieb) zulässig und wird durch individuelle Netzmodelle realisiert. Die Gestaltung der Netzmodelle erfolgt in einem graphischen Editor, in dem elektrische Verbindungen und Bauelemente nach Belieben in der „Drag & Drop“ Arbeitstechnik platziert werden. Die spezifischen Netzbetriebsmitteltypen der Modellregion (Kabel, Transformatoren) sind in den beliebig erweiterbaren Betriebsmittelbibliotheken des Netzsimulators aufgehoben, sodass die elektrischen Bauelemente der einzelnen Netzmodelle parametrisiert werden können. In einem neuartigen, zustandsraumbasierten Simulationsansatz werden die im graphischen Editor abgebildeten, parametrisierten Netzmodelle mit einem Algorithmus in den mathematischen Zustands-

raum überführt. Durch eine Betrachtung im Bildbereich vereinfacht sich das Systemmodell, sodass eine ganzheitliche Lösung der Systemzustände (Ströme und Spannungen) über eine einzelne Rechenoperation bestimmt werden kann.

Die Modellgenauigkeit wird insbesondere von der Lastmodellierung der Mittelspannungsabgänge (Knoten) innerhalb der Netzmodelle beeinflusst, weswegen der Modellierungsansatz von zentraler Bedeutung ist. Durch das Einbeziehen unterschiedlicher Datensätze des Netzbetreibers wird für jeden Netzknoten ein repräsentatives, knotenspezifisches Lastprofil erzeugt, in dem unter anderem auch die kumulierten Leistungsbeiträge bzw. -bezüge der Sektorenkopplungstechnologien erfasst werden. Weiterhin liefert der Stromsektor lastabhängige Bewertungsfaktoren, welche im Rahmen der iterativen Optimierung zur Bestimmung der Transferleistungen der Sektorenkopplungstechnologien miteinfließen. Hierzu werden Alterungsmodelle in der Simulationsumgebung implementiert, welche die Lebensdauer spezifischer Betriebsmittel in Abhängigkeit deren Auslastungsgrades appro-



©OpenStreetMap contributors

Teilnetzgebiete der Stadtwerke Bayreuth.
Quelle: Leo Strobel

ximieren. Zur Begutachtung des Netzbetriebs werden kritische Zustandsgrößen wie Spannungshaltung und Netzauslastung überwacht, sodass unzulässige Betriebsweisen direkt identifizierbar sind.

Der zustandsraumbasierte Simulationsansatz konnte anhand eines Vergleichs mit einer in der Industrie üblichen, bewährten Netzberechnungssoftware über ein entsprechendes Parallelmodell validiert werden. Weiterhin konnte die Genauigkeit des Lastmodellierungsansatzes durch den Abgleich mit realen zeitlich aufgelösten Referenzmessungen und den Abgleich von Jahresenergiemengen der einzelnen Teilnetzgebiete bestätigt werden.

Wärmesektor

Der Wärmesektor in ESM-Regio wurde in zwei Teilsektoren unterteilt. Der Wohngebäudesektor wurde anhand von Gebäudezensusdaten, statistischen Daten zu Wohnungsflächen und flächenspezifischen jährlichen Wärmeverbräuchen sowie Referenzprofilen zur Wärmenachfrage modelliert. Es wurde eine Gebäudetypologie definiert, die den Gebäudebestand in 24 Gebäudetypen beschreibt. Für jedes dieser Gebäude kann ein jährlicher Wärmeverbrauch bestimmt werden, der in einem weiteren Schritt durch die Referenzprofile in Zeitreihen umgerechnet wird. Anschließend werden diese Wärmenachfragen durch die Anlagenmodelle (Gaskessel und Wärmepumpen) in Strom- bzw. Gasnachfragen umgerechnet.

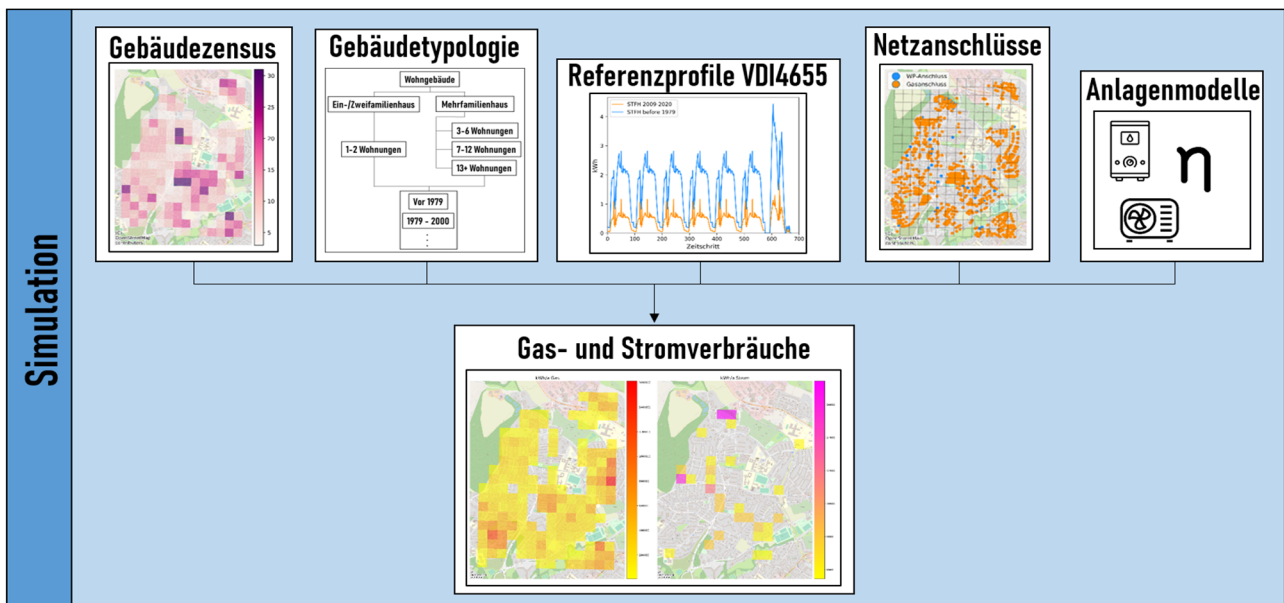
Den zweiten Teilsektor stellen die Verbräuche aus Gewerbe und Industrie dar. In diesem Fall wurden die Wärmenachfragen anhand regionalbezogener, generischer Profile aus dem EU-Projekt Hotmaps erstellt. Diese normierten Profile werden in Abhängigkeit vom Monat, Typtag, Stunde des Tages sowie Umgebungstemperatur für unterschiedliche Industrie-

branchen (bspw. Lebensmittelindustrie) sowie Gewerbe gebildet. Danach werden diese Profile mit gemessenen Jahresverbräuchen kombiniert, um die Wärmenachfrage in Abhängigkeit des Verbrauchertyps zu bilden. Diese werden ebenfalls über geeignete Annahmen in Gasnachfragen umgerechnet.

Die erste Validierung erfolgte mit Jahresverbräuchen des Jahres 2019. Insgesamt wurde der Gesamtverbrauch an Gas um 6.94 % unterschätzt. Beim Stromverbrauch der Wärmepumpen zeigten die simulierten Ergebnisse eine Unterschätzung von 14.42 %. Das Modell wird auf Basis der Validierung kontinuierlich weiterentwickelt.

Verkehrssektor

Im Modell des Verkehrssektors wird der Endenergieverbrauch jedes Verkehrsteilnehmers sowie dessen Flexibilität ortsscharf bestimmt. Dadurch ist in der anschließenden Optimierung bekannt, wann, wo, und in welcher Form Energie (z. B. Strom oder Wasserstoff) benötigt wird, und wie stark sich dieser Bedarf sowohl zeitlich als auch räumlich verschieben lässt. Zur Bestimmung dieser Zielgrößen, wird ein Bottom-Up Ansatz verwendet, der das Mobilitätsverhalten aller Personen im Betrachtungsgebiet mithilfe des im Projekt entwickeltem open-source Modells OMOD (<https://github.com/L-Strobel/omod>) simuliert. OMOD bestimmt, basierend auf einem aktivitätsbasierten Ansatz, wo und wann eine Person plant eine Aktivität zu unternehmen. Aktivitäten können zum Beispiel arbeiten oder einkaufen sein. Hierbei wird nicht versucht das Verhalten einzelner realer Personen in Bayreuth vorherzusagen, sondern es wird eine Bevölkerung simuliert, die im Durchschnitt dasselbe Mobilitätsverhalten aufweist.



Schematische Darstellung des Wohngebäudewärmemodells. Quelle: Natalia Luna-Jaspe, Icons von flaticon.com

Mit den Informationen aus OMOD können wir in ESM-Regio beispielsweise bestimmen, wie viele Personen zu welcher Uhrzeit mit dem Elektroauto in die Stadtmitte fahren, wie lange sie sich dort aufhalten werden und welchen Ladezustand deren Elektroautos bei Ankunft haben werden oder wie viele Personen zu einem gegebenen Zeitpunkt den ÖPNV nutzen. Somit ist es möglich sowohl die gesamte Last des Verkehrssektors als auch deren Flexibilität, zeitlich und räumlich beliebig hoch aufgelöst zu bestimmen.

Vorläufige Ergebnisse zeigen, dass das Modell die in der Umfrage „Mobilität in Deutschland 2017“ angegebenen täglichen Personenkilometer von Befragten in der Region mit einem Fehler von unter 5 % wiedergibt. Die gemessene jährliche Ladeenergiemenge an öffentlichen Ladestationen der Stadtwerke wird mit einem Fehler von unter 2 % reproduziert. Weitere Validierungsmetriken folgen im nächsten Projektupdate.

Gassektor

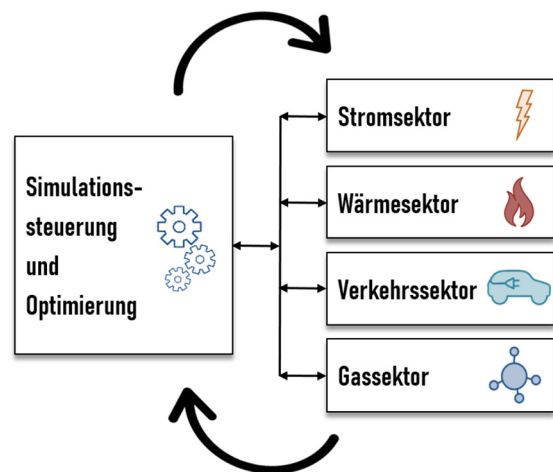
Der Gassektor wird durch ein zeitlich und räumlich hochaufgelöstes Gasnetzsimulationsmodell abgebildet, welches sich aus dem Lösen einer Vereinfachung der isometrischen Euler-Gleichungen ergibt. Hierbei wird der Gasfluss des gesamten Gasversorgungsgebiets der Stadtwerke Bayreuth berechnet. Der Praxispartner besitzt eine detaillierte Abbildung des Gasnetzwerkes, die leicht exportiert werden konnte und für das Projekt nutzbar gemacht wurde. Mithilfe der Daten über Topologie und Netzparameter und dem Pythontool „PandaPipes“ war es möglich ein detailliertes Simulationsmodell für den Sektor Gas aufzubauen. Dabei werden die Netzelemente aller Druckebenen (Hochdruck, Mitteldruck, erhöhter Niederdruck und Niederdruck) abgebildet und insbesondere eine korrekte Modellierung der Gasdruckregelanlagen beachtet. Da Bedarfsmessungen nur für einen Teil der Gaskunden verfügbar sind, werden für die anderen Zählpunkte Standardlastprofile hinterlegt, wobei genaue Informationen über die Art der Gaskunden vom Anwendungspartner verfügbar gemacht wurden. Eine Validierung der benötigten Gasmenge erfolgt über genaue Messwerte an der Gasübernahmestation.

Das Modell wurde mit den historischen Daten aus 2019 validiert. Im Zusammenspiel mit dem Simulationsmodell des Wärmesektors und der zentralen Optimierung wurden Aggregations- und Disaggregationsmethoden der niederen Druckebenen des Gasnetzes entwickelt, um eine Dimensionsreduktion in der Schnittstelle zu ermöglichen. Für das Technologie-Szenario „Wasserstoff“ gehen wir bis 2045 von einer Umwidmung des Hochdrucknetzes im Sektor Gas aus. Dadurch können insbesondere große Industrieverbraucher mit Wasserstoff versorgt werden. Als Sektorkopplungstechnologie wird für dieses Szenario eine lokale Power2Gas-Anlage integriert.

Optimierung

Eine zentrale Fragestellung des Projekts ist, wie sich die Betriebsführung durch eine optimale Steuerung der Sektorkopplungsmechanismen in Abhängigkeit verschiedener Ausbauszenarien optimieren lässt. Die dafür benötigten Zielgrößen lassen sich über die Betriebskosten des Energieversorgers definieren. Hierbei muss auch auf eine schonende Nutzung der Betriebsmittel geachtet und mithilfe eines Life-Cycle Assessments bewertet werden.

Mithilfe von diskret-kontinuierlichen Modellierungstechniken wurde ein simulationsgestütztes mathematisches Optimierungsproblem zur gesamtheitlichen Betrachtung aller Sektoren aufgestellt. Hierbei wurden graphenbasierte, zeitexpandierte Lastflussoptimierungsmodelle der Stromnetzoptimierung aus der Literatur um die im Projekt betrachteten Flexibilitäten der Sektorkopplungstechnologien erweitert.



Zusammenspiel Optimierung und Simulation der Sektoren. Quelle: Natalia Luna-Jaspe, Pfeile von flaticon.com

Um den zeitlichen Aufwand für die Berechnung optimaler Steuerungen zu reduzieren, werden räumliche und zeitliche Aggregations- und Approximationsverfahren verwendet, um die Rechenkomplexität durch eine Dimensionsreduktion und einer Relaxierung der Nichtlinearitäten (insbesondere in der Abbildung der Strom- und Gasphysik) zu begrenzen. Das im Projekt entwickelte lernende Optimierungsverfahren adaptiert die Vereinfachungen in einem konvergenten iterativen Austausch mit den detaillierten Simulationsmodellen der einzelnen Sektoren automatisch. Hierdurch lässt sich in absehbarer Rechenzeit eine optimale Steuerung für das betrachtete Versorgungsgebiet berechnen.

Die Modelle sind entwickelt und konnten mit historischen Daten validiert werden. Weitere interessante Fragestellungen, wie Effizienzsteigerung, signifikante Einsparpotenziale, Optimierung der Energiesysteme und der Nachweis der Übertragbarkeit auf andere Regionen werden folgen.

Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Erstellung eines umfassenden Simulationsmodells, das die Sektoren Strom, Wärme, Gas und Mobilität integriert, ein wichtiger Meilenstein für die Analyse von Szenarien zur Sektorkopplung ist. Die einzelnen Simulationsmodelle für jeden Sektor wurden validiert, um ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Im nächsten Schritt werden die Einzelmodelle miteinander kombiniert, wodurch ein leistungsfähiges Instrument zur Bewertung von Interdependenzen und potenziellen Synergien entsteht. Dadurch lassen sich Kopplungsstrategien wie z.B. die Integration erneuerbarer Energien in Kombination mit unterschiedlichen Sektorkopplungstechnologien sowie die Bewertung ihrer Auswirkungen auf die Energiesysteme untersuchen. In Kombination mit einer Betriebskostenoptimierung entsteht somit ein Modell, wodurch Entscheidungsträgern die Möglichkeit erhalten Kopplungsstrategien zu untersuchen und zu bewerten und so den Weg für eine effizientere und nachhaltigere Energiezukunft zu ebnen.

Ziele und Projektbeschreibung ESM Regio

Ziel des Forschungsprojekts ESM-Regio – kurz für „Mehrsektorale gekoppelte Energiesystemmodellierung auf regionaler Ebene“ – ist es, ein zeitlich hochaufgelöstes Energiesystemmodell in der Größenordnung von Landkreisen zu erstellen, das die vier Sektoren Elektrizität, Gas, Wärme und Verkehr sowie die benötigten Schnittstellentechnologien berücksichtigt. In Szenarienanalysen werden neben Strom- und Gasnachfragen auch Flexibilitäten (wie z.B. Batterie- und Wärmespeicher) und Emissionen erfasst. Ein wesentliches Merkmal des Vorhabens besteht somit in einer sektorübergreifenden Modelllogik. Geeignete Simulationsansätze ermöglichen eine ganzheitliche Analyse und Optimierung des Systembetriebs unter Betrachtung der vier maßgeblichen Sektoren des Energiesystems.

Als realer Modellraum wurde Bayreuth gewählt. Die Stadtwerke Bayreuth sind daher Partner im Projekt. Die Gründe für diese regionale Auswahl sind folgende:

- Das Gebiet stellt ein typisches Verhältnis von urbaner zu ländlicher Energieversorgung dar.
- Das Gebiet ist übertragbar auf andere Regionen in Deutschland.

Projektpartner

- Lehrstuhl Informatik 7 (Rechnernetze und Kommunikationssysteme) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
- Lehrstuhl für Energieverfahrenstechnik an der FAU
- Lehrstuhl für Analytics & Mixed-Integer Optimization an der FAU
- Institut für Hochspannungstechnik, Energiesystem- und Anlagediagnose der Hochschule Coburg (IHEA)
- Lehrstuhl für Informatik 3, Professur für Modellierung und Simulation, Julius-Maximilians-Universität Würzburg
- Stadtwerke Bayreuth
- Energieagentur Nordbayern, Nürnberg
- Cluster Energietechnik, angesiedelt bei der Bayern Innovativ GmbH, Nürnberg

Weitere Informationen zum Modellprojekt ESM-Regio unter:

www.esm-regio.de



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Impressum

Herausgeber:
Bayern Innovativ GmbH
Am Tullnaupark 8
90402 Nürnberg

www.bayern-innovativ.de

Redaktion:

Cluster Energietechnik

Prof. Dr. Oliver Mayer, Katrin Schiller

Tel: + 49 911-20671-233

E-Mail: oliver.mayer@bayern-innovativ.de