Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung

Stiftung Energie & Klimaschutz, Baden-Württemberg – Ideenwettbewerb 2017

„Meine Stadt von morgen: Wie sieht die Energielandschaft der Zukunft aus?“

Titel der Dissertation:

Modellgestützte Analyse und Bewertung der Einflüsse von Energie-Autarkie auf lokaler Ebene auf das Energiesystem – Anwendung einer Energiesystemanalyse am Fallbeispiel Metzingen in Baden-Württemberg

Fakultät:

Energie-, Verfahrens- und Biotechnik

Lukasz Brodecki, M. Sc.
Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)
Universität Stuttgart
Heßbrühlstraße 49a
70565 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 – 87858
E-Mail: lukasz.brodecki@ier.uni-stuttgart.de

Modellgestützte Analyse und Bewertung der Einflüsse von Energie-Autarkie auf lokaler Ebene auf das Energiesystem – Anwendung einer Energiesystemanalyse am Fallbeispiel Metzingen in BW

Einleitung

Um die Ziele der Landesregierung von Baden-Württemberg, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2020 um mindestens 25 % gegenüber dem Jahr 1990 zu reduzieren und darüber hinaus bis 2050 eine Reduktion um gar 90 % zu erreichen, müssen Strukturveränderungen im Energiesystem flächenmäßig umgesetzt werden. Dabei steigen lokal angesiedelte Energieprojekte und dezentral organisierte Energiesysteme in ihrer Zahl und werden zunehmend als durchführbare Alternative zu konventionellen Systemen angesehen. Viele Verbraucher folgen daher derzeit dem Ansatz der Selbstversorgung, versuchen zur Deckung ihres Energiebedarfs beizutragen und werden somit vom zentralen Energieversorgungssystem zu Teilen unabhängig bzw. autark. Dies widerspricht im Übrigen nicht den allgemeinen Zielen eines integrierten und offenen Energiemarktes. In ihrer Strategie „Energie 2020“ wird von der europäischen Kommission als eine von fünf Prioritäten die Stärkung von Verbraucherautonomie genannt. Somit wird deutlich, dass der Begriff der Autonomie bzw. Autarkie auch auf europäischer Ebene im Kontext eines großen europäischen Energiemarktes verwendet wird.

Ein weiterer Punkt zur Motivation dieser Arbeit ist, dass aufgrund der Dezentralisierung der Energieversorgung sich die Rolle der Bürger als Nutzer und gleichzeitig Anwender („Prosumenten“ oder „Prosumer“) verändert. Die Festlegung von externen Begründungszusammenhängen, wie Erneuerbaren- oder Treibhausgas-Ziele, diktiert durch top-down Ansätze ohne bürgernahe, lokale Beteiligung an Projekten, kann zu starken Widerständen und geringer Akzeptanz für die Umsetzung eines solchen Unterfangens führen. Wichtig ist zu erkennen, dass die Legitimation der Dezentralisierung sich nicht nur alleine aus ihrer Effizienz und den wirtschaftlichen Vorteilen ergibt, sondern zunehmend durch intrinsische Motivation der Bevölkerung gestützt wird. Neben der Aufklärung für die Akzeptabilität (Duldung einer technischen Innovation trotz persönlicher Ablehnung aufgrund übergeordneter Entscheidungen) spielt auch die Einbindung und Partizipation (bis hin zur finanziellen Beteiligung) für die individuelle Akzeptanz eine entscheidende Rolle. Autarkie und Autonomie auf lokaler Ebene im Zusammenhang mit der Energieversorgung stellt dabei als neue Wertorientierungen in der Energiepolitik eine polarisierende Größe dar. Die „Energie-Unabhängigkeit“ birgt hohes Potenzial zur Gewinnung eines zwar zum Teil subjektiv empfundenen aber viel wichtiger intrinsischen Nutzens. Es erhöht die Bedeutung der Akzeptanz von Anlagen und des damit einhergehenden Ausbaus der Energie-Infrastruktur. So kann das Bestreben nach lokaler Energie-(Teil)Autarkie einen Anteil zur Energiewende beitragen. Ziel der Kommunen kann dabei sein, im Hinblick auf die Autarkie ein Kostensenkungspotenzial durch Minderung des Energieverbrauchs zu heben und dabei zusätzlich sekundäre Vorteile zu erzielen, wie z. B. ein verringertes Risiko gegen Preisfluktuationen importierter Rohstoffe, die Förderung der lokalen Wertschöpfung durch Schaffung von neuen Arbeitsplätzen oder Anreizsetzung von lokal angesiedelten Investitionen.

Indem die Energie-Autarkie für Verbraucher zu einer neuen Zielgröße heranwächst, kann diese Entwicklung einen bedeutenden Anteil zur Prägung der Stadt und des lokalen Energiesystems von morgen haben. Es wurde bisher jedoch nur geringfügig untersucht, wie sich die lokale Energieversorgung bei zunehmender Anzahl von Prosumenten, die dem Ansatz der Selbstversorgung folgen, verändert. In dieser Arbeit wird daher in einem ersten Schritt das Energie-Autarkiepotenzial von ausgewählten Einzelsystemen isoliert dargestellt und anschließend die Betrachtung in einem zweiten Schritt auf einen Verbund erweitert. Ziel dieses Beitrags ist die systematische, modelgestützte Untersuchung und Bewertung der möglichen Eigenversorgungsgrade hinsichtlich der Energiebereitstellung anhand einer Beispielkommune in Baden-Württemberg. Für die Entwicklung von Pfaden zur Erreichung von Eigenversorgungskonzepten auf kommunaler Ebene wurde ein Energiesystemmodell erarbeitet, das es ermöglicht die mit der Energie-Autarkie einhergehenden Voraussetzungen sowie Konsequenzen für einen Bilanzraum zu untersuchen. Es wird dabei der Frage nachgegangen, wie Kommunen durch Ausbau der Anteile an Erneuerbaren Energien eine Entwicklung hin zu einem autarken oder teilautarken Bilanzraum einschlagen können. Zentraler Bestandteil ist hierbei die Identifikation der optimalen Technologie Allokation im kommunalen Umfeld, die zur Maximierung der Energie-Autarkie bzw. zur Minimierung der fossilen Energieimporte unter Minimierung der Gesamtsystemkosten führt. Dabei werden gezielt die Wechselwirkungen zwischen der Energiebereitstellung und –nachfrage und des übergeordneten Systems durch die Zielsetzung der Energie-Autarkie sowie die energiesystemtechnischen Unterschiede zu einer reinen Erneuerbaren Quote oder zu Emissionszielen erarbeitet.

Der Autarkie Begriff in der Literatur & Praxis

Basierend auf der dargestellten Problemstellung wird in dieser Arbeit zunächst ein weiter Überblick über den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich gegeben und die unterschiedlichen Verständnisse der Autarkie sowie die verschiedenen Mess- und Zielgrößen aufgezeigt. Trotz der Anwendung von Schlagwörtern, wie Autarkie oder Energie-Unabhängigkeit ist der Begriff der Energie-Autarkie nicht einheitlich definiert oder wird nach unterschiedlichem Verständnis eingesetzt. Grundsätzlich kann zwischen zwei Varianten der Autarkie unterschieden werden: der lastgerechten und der bilanziellen Energie-Autarkie. In ersterer darf Energie zu keiner Zeit von außen über die definierten Systemgrenzen hineingetragen werden, wohingegen die bilanzielle Autarkie einen bilateralen Energieaustausch über die Systemgrenze hinweg erlaubt, aber die Bilanz für definierte Ströme im Betrachtungszeitraum nicht negativ sein darf. Dabei orientieren sich mit großer Mehrheit der untersuchten autarken Bilanzräume an der bilanziellen Autarkie.

Daraufhin werden die Zusammenhänge der vollständig hergeleiteten Definition der Energie-Autarkie im Bereich der Energiesystemanalyse angewendet. Dabei gilt es zum einen die entsprechenden Strukturen und Merkmale einer regionalen Energieversorgung als Investitionsentscheidungen im Modell zu implementieren und zum anderen für die Autarkie relevanten Technologien einzubeziehen. Um fundierte Aussagen über die Einflüsse und die Auswirkungen sowie die Ursachen der Autarkie treffen zu können, wird anhand einer Bestandanalyse in Deutschland bzw. auch in Europa und der Welt für verschiedene Bilanzräume untersucht. Es soll ein tieferes Verständnis der Zusammenhänge der Autarkie in unterschiedlichen Sektoren bzw. Bilanzräumen gewonnen werden. Als Fallstudie der Energiesystemanalyse dient die Stadt Metzingen, eine baden-württembergische Mittelstadt, gelegen an der Schwäbischen Alb in der Region Neckar-Alb. Metzingen ist mit seinen 21.332 Einwohnern (Stand 2014) die zweitgrößte Stadt des Landkreises Reutlingen und ist vor allem bekannt durch Fabrikverkäufe zahlreicher Textilunternehmen, kennzeichnet sich daher durch die Position eines starken Wirtschaftsstandortes aus.

Einzelgebäudemodell

Die Zielerreichung bzw. die Möglichkeiten der Energie-Autarkie sind zu großem Anteil vom betrachteten Bilanzraum abhängig. Um die Unterschiede der Potenziale, Möglichkeiten, Kosten aber auch Effekte der Energie-Autarkie zu untersuchen, werden unterschiedliche Grenzen der Autarkie bewertet. Daher werden im Rahmen der Analyse zunächst Einzelsysteme auf ihre Eignung zur Energie-Autarkie untersucht. In der Einzelfallbetrachtung werden repräsentativ auftretende Versorgungsaufgaben eines Energiesystems entkoppelt im Zusammenhang der Energie-Autarkie bewertet. Dies erfolgt mithilfe von Gebäudesimulationen in hoher zeitlicher Auflösung (15-minütlich). Die Untersuchung betrachtet zwei verschiedene Wohngebäudetypen (Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus) sowie für jeden Typ zwei energetische Gebäudestandards, um den Einfluss des Heizwärmebedarfs auf das Energie-Autarkiepotenzial zu ermitteln. Hierfür werden ein Neubau sowie ein Bestandsgebäude untersucht. Der energetische Gebäudestandard des Neubaus orientiert sich an den Anforderungen des Passivhausstandards. Der energetische Standard des Bestandsgebäudes ergibt sich aus typischen Kennwerten des Gebäudebestandes in Deutschland und ist an die Anforderungen nach Wärmeschutzverordnung 95 angelehnt. Zusätzlich werden repräsentativ für die GHD-Struktur im betrachteten Bilanzraum die Versorgungsaufgabe für Bürobetriebe sowie den Handel analysiert. Dazu werden für jede Versorgungsaufgabe je Referenzgebäude individuelle Stromlastprofile und Raumwärme- sowie Warmwasserlastprofile erstellt.

Für die Energieversorgung jeder Versorgungsaufgabe werden verschiedene Varianten zusammengestellt. Die analysierten Energieerzeugungs- und Energiespeichertechnologien beinhalten Kombinationen aus Wärmepumpe, Photovoltaik-Anlagen, solarthermische Anlagen, Brennwert-Spitzenlastkessel, Batteriespeicher, Warmwasserspeicher, Absorptionskältemaschinen und Eisspeicher. Die Dimensionierung der PV, Solarthermie sowie des Batterie- und Warmwasserspeichers wird dabei ebenfalls einer breiten Sensitivitätsanalyse unterzogen. Somit ergeben sich 144 verschiedene Energiesysteme für jedes der vier Wohngebäude und 108 Fallunterscheidungen je Versorgungsaufgabe im GHD Sektor. Anschließend wird eine ökonomische Analyse der verschiedenen Fälle durchgeführt. Für die ökonomische Bewertung werden alle mit der Energieversorgung des Gebäudes in Verbindung stehenden Kosten betrachtet. Dazu zählen die Investitionskosten der Anlagenkomponenten und die Kosten für den Strom- bzw. Gasbezug aus dem öffentlichen Netz. Die maximalen Autarkiegrade jedes Versorgungsfalls werden ins Verhältnis zu den resultierenden Kosten gesetzt. Ergebnis ist eine Kosten-Potenzial-Kurve verschiedener Versorgungsaufgaben, die aufzeigt welche Systeme für das Erreichen eines bestimmen Energie-Autarkiegrades notwendig sind und welche Kosten daraus resultieren.

TEAM Metzingen – Abbildung der Energie-Autarkie in einem Stadtmodell

Um nun ein Verständnis der Energie-Autarkie auf kommunaler Ebene zu entwickeln, wird die Energie-Autarkie im Kontext der vollständigen Gemeinde untersucht. Grundlage zur Modellierung des städtischen Energiesystems und der Verbraucherstruktur in Metzingen bildet ein lineares Optimierungsmodell auf der Basis des „The Integrated Markal Efom System“ (TIMES). Mit der Hilfe von TIMES wird ein Energiesystem technologisch detailliert als ein Netzwerk von Prozessen (z. B. Kraftwerkstypen, Verkehrstechnologien), Gütern (Energieträgern, Material) und den entstehenden Emissionen in Form eines Referenzenergiesystems abgebildet. Die Zielfunktion ist dabei die Kostenminimierung unter Umsetzung von Autarkie-Zielen und unter Einhaltung technischer sowie ökologischer Restriktionen.

Vorgegeben werden bei der Optimierung der anfängliche Anlagenbestand, die zukünftigen Nachfragen in den einzelnen Sektoren und der Primärenergieträgerpreise sowie die Technologien und Energieträger charakterisierenden Parameter. **T**IMES **E**nergie-**A**utarkie **M**odell (TEAM) für Metzingen stellt dabei eine Anwendung des TIMES Modells mit dem Schwerpunkt auf die Betrachtung von denjenigen Prozessen dar, die für ein Stadt- oder Quartiersmodell sowie für die Erreichung und Abbildung der Energie-Autarkie relevant sind. Dazu zählt z. B. eine detaillierte Abbildung des Verkehrs und dabei vor allem der Elektromobilität sowie der Ladevorgänge, die durch intelligente Regelung im Zusammenhang mit Vehicle-to-grid einen positiven Einfluss auf das System haben können. Darüber hinaus wurde der Fokus auf die Modellierung netzgebundener Versorgungskapazitäten in Verknüpfung mit Erneuerbaren Energien, wie solarthermisch unterstützte Nahwärme oder die Integration von Abwasserwärmepumpen gelegt. Durch Implementierung von Investitionsoptionen betreffend der kooperativen Energiebereitstellung für Wohn- und Nichtwohngebäude werden Sektorkopplungseffekte ebenfalls berücksichtigt. Der Modellierungszeitraum ist von 2010 bis 2050 in 5-Jahresschritte eingeteilt. Um den technischen Eigenschaften der Energie-Autarkie und der damit einhergehenden Problematik der Kopplung einer fluktuierenden Nachfrage sowie einer dargebotsabhängigen Erzeugung auf Basis von Erneuerbaren Energien gerecht zu werden, beträgt die zeitliche Auflösung 840 Zeitsegmente. Diese sind unterteilt in fünf Typwochen, die je einer Jahreszeit entsprechen in je stündlicher Auflösung (168 Stunden je Typwoche) plus einer Peak-Woche. Durch Auswahl repräsentativer Typwochen sind zum einen die fluktuierenden Erneuerbaren realitätsnah abgebildet und zum anderen erfolgt durch die hohe zeitliche Auflösung kein Glättungseffekt der Nachfrage- und Erzeugungsganglinien.

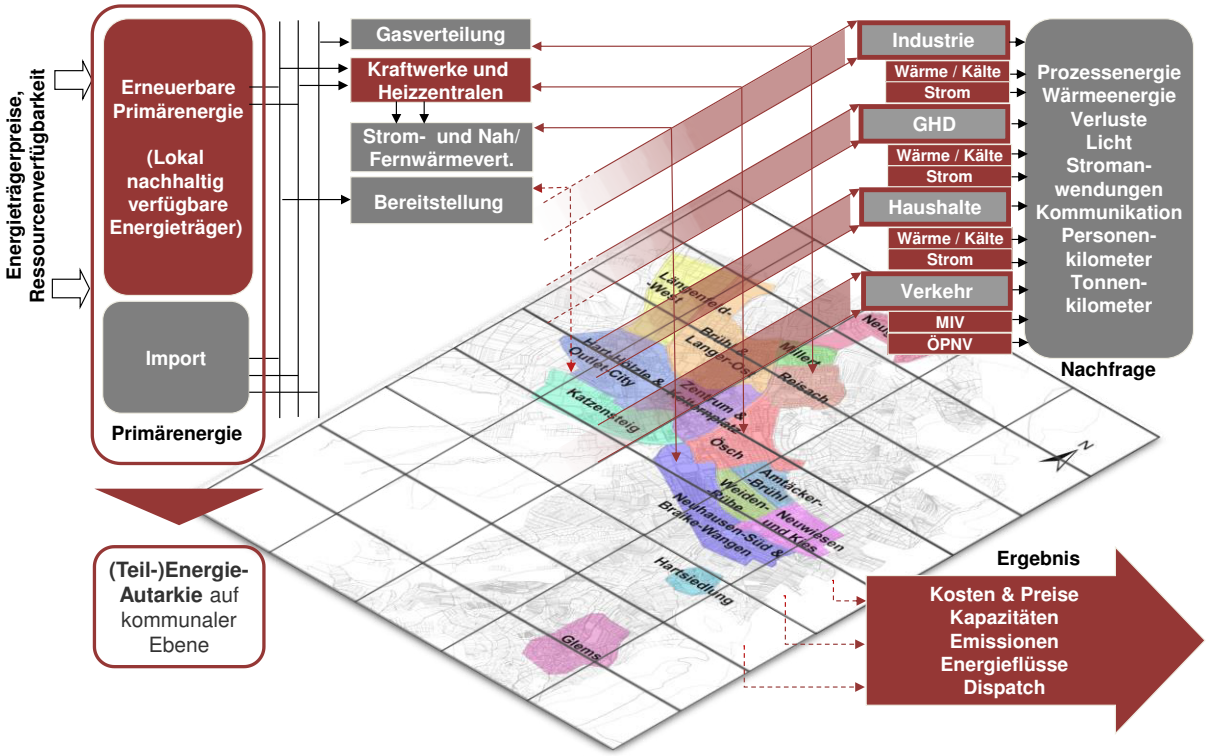


Abbildung 1: Referenzenergiesystem des angewandten TEAM Modellansatzes unter Berücksichtigung der Sektoren und der räumlichen Auflösung

Ergebnisse - Beitrag der Energie-Autarkie zur Energiewende auf kommunaler Ebene. Auswirkungen auf das lokale und übergeordnete Energiesystem

Die Analysen der Einzelgebäude-Simulationen haben gezeigt, dass eine bilanzielle Energie-Autarkie für die beiden GHD-Versorgungsaufgaben Büro- und Handelsgebäude sowie für die Mehrfamiliengebäude als alleinstehende Einheit nicht möglich ist (siehe Abbildung 2, links). Dahingehend sind die Voraussetzungen nur für den Fall des Bestandsgebäudes und des Neubaus beim Einfamilienhaus gegeben. Dies erfordert die vollständige Nutzung der energetisch verfügbaren Dachfläche mit PV-Modulen (10 kW) in Kombination mit einer elektrischen Wärmepumpe zur Wärmeversorgung. Im Einfamilienhaus Neubau können bilanziell betrachtet gar hohe Energieüberschüsse (+38 %) erzielt werden. Die ökonomische Bewertung der Technologievarianten hat ergeben, dass für das Einfamilienhaus keine der untersuchten Varianten im Vergleich zur konventionellen Gebäudeenergieversorgung (Gas-Brennwertgerät & Anschluss an das öffentliche Stromnetz) aus rein wirtschaftlichen Gesichtspunkten konkurrenzfähig ist. Die jährlichen Mehrkosten der Energieversorgung bei zu erzielenden hohen Graden der Eigenversorgung bewegen sich dabei zwischen 700 € (Neubau) und 1750 € (Bestand). Lediglich für das Mehrfamilienhaus ergibt sich, durch eine vollständige Belegung der energetisch nutzbaren Dachfläche mit PV-Modulen, ein Kostenvorteil in Höhe von 7 % (Neubau) und 10 % (Bestand) gegenüber einer konventionellen Energieversorgung. Ein im Vergleich zu den Wohngebäuden deutlich geringeres Autarkiepotenzial weisen die GHD Versorgungsaufgaben auf. Während der höchste lastgerechte Energie-Autarkiegrad mit 29 % für das Bürogebäude mit einer Kombination von Solarthermie (28,3 m^2), Photovoltaik (11,2 kW), einer Wärmepumpe und einem Batteriespeicher (40 kWh) erreicht wird, liegt das Maximum bilanziell gesehen bei 33 %. Für Handelsbetriebe liegen der lastgerechte und bilanzielle Energie-Autarkiegrad bei jeweils 37 % mit einer Technologiekombination aus Solarthermie (52 m^2), Photovoltaik (57,8 kW), einer Wärmepumpe und einem Eisspeicher. Die ökonomische Bewertung der Technologievarianten zeigt, dass mit Ausnahme eines geringen Eigenversorgungsanteils im Bürogebäude keine der untersuchten Varianten Kostenvorteile gegenüber einer konventionellen Gebäudeenergieversorgung aufweist.

Der erreichbare Energie-Autarkiegrad ist dabei im Wesentlichen von den Wärmeverlusten des betrachteten Gebäudes und folglich der Raumwärmenachfrage abhängig. Während bilanziell autarke Wohngebäude je nach Größe und Baualter bereits heute umsetzbar sind, so sind annähernd lastgerecht autarke Wohngebäude (vor allem Mehrfamiliengebäude) nur bedingt realisierbar (maximal 20 % im Bestand und 36 % im Neubau) und dabei nur zu sehr hohen Kosten. Beim Einfamilienhaus lassen sich maximal 45 % (Bestandsgebäude) bzw. 71 % (Neubau) des Gebäudeenergiebedarfs lastgerecht mit regenerativen Energien decken. Grund dafür sind die mangelnden Flächenpotenziale und die hohe Energiedichte im Verbrauch. Daher ist klar zu sagen, dass ein vollständiger Verzicht auf den Anschluss an das öffentliche Stromnetz mit den betrachteten Technologievarianten in keiner der Versorgungsaufgaben möglich ist. Allgemein ist zu beobachten, dass hohe Autarkiegrade eine Elektrifizierung des Versorgungssystems voraussetzen.

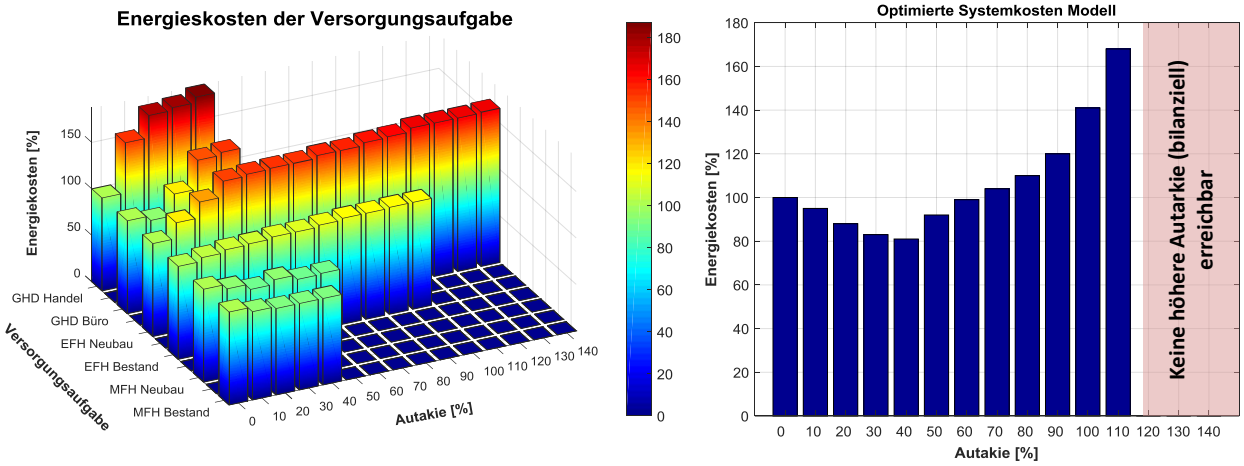


Abbildung 2: Energie-Autarkiepotenziale und Kosten für bilanzielle Eigenversorgung bei isolierter Betrachtung von Versorgungsaufgaben (links) und bei ganzheitlicher Optimierung des Bilanzraumes Metzingen hinsichtlich der Eigenversorgung (rechts). Die Referenzkosten setzen sich bei der Einzelbetrachtung aus einer konventionellen Energieversorgung (Strombezug aus dem Netz und einem Gas-Brennwertkessel) zusammen. Bei der ganzheitlichen Optimierung ist die Referenz der Strombezug aus dem übergeordnetem Netz (Mittelspannungsnetzebene) und der Wärmeversorgung im Basisszenario ohne Erneuerbare Energien Anteil.

In der durchgeführten Energiesystemanalyse mit TIMES werden durch Kopplung und Integration über alle Gebäude, Verbraucher und Versorger Glättungseffekte bei der Erzeugung und Nachfrage berücksichtigt, die sich bei Betrachtung der Einzelgebäude nicht ergeben. Im Rahmen der ganzheitlichen Energiesystemanalyse ist zu erkennen, dass im Zusammenhang mit der Energieautarkie vermehrt Quartierspeicher (thermisch und elektrisch) auf lokaler Ebene zum Einsatz kommen mit dem Ziel Angebot und Nachfrage in Einklang zu bringen und die zeitliche Diskrepanz zwischen Angebot nach Erneuerbaren und Bedarf zu überbrücken. Im Vergleich zur Basis werden bis 2050 131 % mehr Quartiersspeicherkapazität zugebaut (Steigerung von 120 MWh auf 278 MWh). Gleichzeitig steigt der Anteil der Eigenversorgung bzw. Eigennutzung durch Zubau von lokal, direkt beim Verbraucher installierten Speichern (+75 %). Dies hat vor allem großen Einfluss auf die Belastung der elektrischen Verteilnetze durch Reduktion der eingespeisten Stromüberschüsse. Als zweiten deutlichen Effekt ist zu erkennen, dass verstärkt Infrastrukturgebundene Technologien zum Einsatz kommen. Nah- und Fernwärme, die im Zusammenhang mit Power-to-heat durch Heizstäbe (Standard) oder Wärmepumpen (fortschrittlich) elektrisch unterstützt werden können und somit weitere Stromüberschüsse ausgleichen, nehmen an Bedeutung zu. Dies erfordert jedoch eine intelligente Verknüpfung von dezentralen Prosumern und traditionellen Versorgern durch Regelungsschaltungen und moderne Informations- und Kommunikationstechnik. Eine starke Elektrifizierung spiegelt sich zudem im Verkehrssektor wider. Hier werden im Zieljahr 2050 41 % der Fahrzeugkapazitäten (4573 Fahrzeuge verglichen zu 1212 im Basisszenario) aus Batteriebetriebenen oder Mild- und Voll-hybriden Elektrofahrzeugen bereitgestellt. Dies ermöglicht auch die zusätzliche Nutzung der Batteriespeicher für Vehicle-to-grid. Dabei werden in 2050 bis zu 11,58 GWh Strom im Zusammenhang mit Vehicle-to-grid eingesetzt, was ca. 4,5 % der gesamten umgesetzten Strommenge in 2050 im maximalen Autarkie-Szenario entspricht.

Vorläufige Vergleichsszenarien ohne Autarkieziel, jedoch mit Vorgabe einer Erneuerbaren-Quote am Endenergieverbrauch in Höhe von 100 % ergeben einen deutlich reduzierten Eigenverbrauchsanteil (sektorübergreifend 22 % im Vergleich zu 48 % im Autarkieszenario). Hohe Einspeisungen ins übergreifende Netz, als regionale Stromexporte sind die Folge.

Werden die Energiebedingten Kosten betrachtet so führt eine vollständige Umsetzung der Energie-Autarkie im Bilanzraum zu Mehrkosten von 740 € pro Jahr je Einwohner bis 2050 im Vergleich zum Basisszenario mit einem Autarkiegrad von 48 %. Die Mehrkosten schließen den Infrastruktur- sowie Verteilnetzausbau ein. Ein Vergleich der Einzelsystemanalyse und der ganzheitlichen Systembewertung ergibt, dass eine starke Tendenz zur Elektrifizierung des Energiesystems im Zusammenhang mit der Energie-Autarkie besteht. Zudem ist zu beobachten, dass die Teil-Energie-Autarkie in ausgewählten Versorgungsfällen bzw. unter gegebenen Systemeigenschaften wirtschaftlich vorteilhaft sein kann. In der Ganzheitlichen Systembewertung hat sich ein Autarkiegrad von 48 % als kostenoptimale Lösung herausgestellt. Der maximale bilanzielle Autarkie-Grad des gesamten Bilanzraumes Metzingen beträgt 118 %.

Zukünftig werden durch den „Klimaschutzplan 2050“ der Bundesregierung bedingten Ausbau der Erneuerbaren sowie durch Effizienzgewinne und andere Maßnahmen zunehmend mehr (teil-)autarke Regionen Bestandteil des Energiesystems sein. Es ist jedoch nicht vorauszusehen, ob dies vor allem durch bundesweite Maßnahmen, wie Technologiesubventionen, CO_2-Steuer und mithilfe kommunaler Initiativen, wie Klimaschutzpläne im top-down Ansatz geschieht oder intrinsisch motivierte Einzelakteure, die danach streben (teilweise) unabhängig vom zentralen Energieversorgungssystem zu sein, die Treiber der Entwicklung zur Stadt von morgen sein werden. Unterschiede in den Ergebnissen der Energiesystemanalyse werden jedoch bei Vergleich der Autarkie- und den EE-Quoten- bzw. Emissionsreduktionszenarien deutlich z. B. bei der Speicherdimensionierung, den Speicherverlusten oder des eingesetztes Technologieportfolio zur Bereitstellung der zukünftigen Energiesystemdienstleistungen.

Das Fallbeispiel Metzingen stellt in diesem Beitrag dar, welchen Einfluss die Energie-Autarkie auf lokaler Ebene auf das Energiesystem haben kann. Metzingen stellt dabei repräsentativ einen Bilanzraum für Mittelstädte mit vergleichbarer Größenordnung und Verbrauchsstruktur dar, die summiert ca. 30 % des heutigen Endenergieverbrauchs in Deutschland ausmachen.

Auf Basis des Modells kann eine Vielzahl von Autarkie-Graden für unterschiedliche Akteure abgebildet werden und qualitative Aussagen zur Entwicklung des Energiesystems getroffen werden. Die Ergebnisse können dabei helfen mögliche Entwicklungspfade von Kommunen/Städten aufzuzeigen, um frühzeitig auf Probleme oder Chancen der Energie-Autarkie hinzuweisen und durch entsprechende Maßnahmen Investitionsentscheidungen zu optimieren.

Universität Stuttgart
IER Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart
lukasz.brodecki@ier.uni-stuttgart.de
Tel.: +49 (0)711 685 878 58

Lukasz Brodecki

Modellgestützte Analyse der Einflüsse von Energie-Autarkie auf städtische Energiesysteme

1. Motivation

Zunehmende Autarkie-Bestrebungen von Bürgern & Gemeinden | Steigender Anteil von Prosumern innerhalb des Energiesektors | Hohe Zielkongruenz mit Energie- und Klimapolitik

Zielsetzung: Modellgestützte Analyse möglicher Autarkiegrade und integrale Betrachtung der städtische Energieversorgungsstruktur anhand einer Beispielregion in Baden-Württemberg

Keine einheitliche und vollständige Definition zur Abbildung von Autarkie in Energiesystemmodellen vorhanden
➔ Schließung von Definitionslücken der Autarkie und Festlegung detaillierter Aspekte bezüglich Bilanzierungsmethoden von Energieflüssen

Modelltechnische Abbildung von Versorgungsaufgaben mit Fokus auf Energie-Autarkie relevante Merkmale zur ganzheitlichen Bewertung von Energieversorgungssystemen fehlt
➔ Identifizierung und Implementierung relevanter Einflüsse und Rahmenbedingungen für eine modelltechnische Abbildung von Autarkie

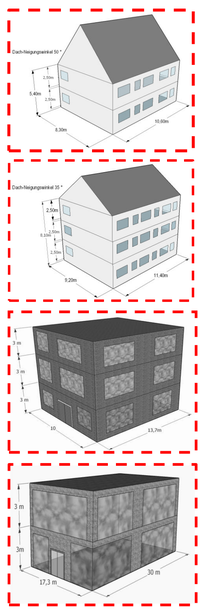
Systembewertung unter Autarkie und Analyse des Autarkie-Potenzials in städtischen Energieversorgungsystemen fehlt
➔ Integrale Bewertung der Autarkiepotenziale unter Berücksichtigung aller Bestandteile der Energieversorgung (Strom, Wärme, Mobilität) unter technischen, ökonomischen, ökologischen Gesichtspunkten

➔ Aufbauend auf linearem Optimierungsmodell TIMES Local/PanEU
➔ Optimierungszeitraum von 2012 bis 2050 einer Beispielkommune
➔ Zeitliche Auflösung auf Typwochen-Basis variabel zwischen 280 und 840 Zeitsegmenten
➔ Abbildung von privatem Haushaltsektor, GHDI und Mobilität mit Fokus auf regionalen/städtischen Energieversorgungsaufgaben

2. Methodik

Schritt 1: Einzelobjektbetrachtung für Autarkie in Gebäudesimulation

➔ Bewertung von Autarkiepotenzialen einzelner Bilanzräume basierend auf Simulation ausgewählter Versorgungsaufgaben für Wärme, Strom und Kälte

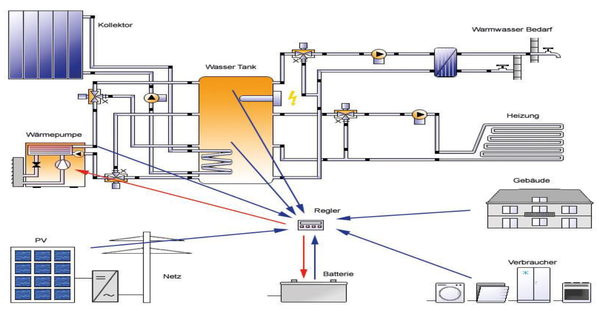


Einfamilienhaus
- Bestandsgebäude (WSVO 95)
- Neubau (Passivhaus)

Mehrfamilienhaus
- Bestandsgebäude (WSVO 95)
- Neubau (Passivhaus)

Bürogebäude
- angelehnt an Bestands-gebäude MFH (WSVO 95)

Großes Verkaufsgebäude
- angelehnt an Outlet-Center mit 700 m² Verkaufsfläche

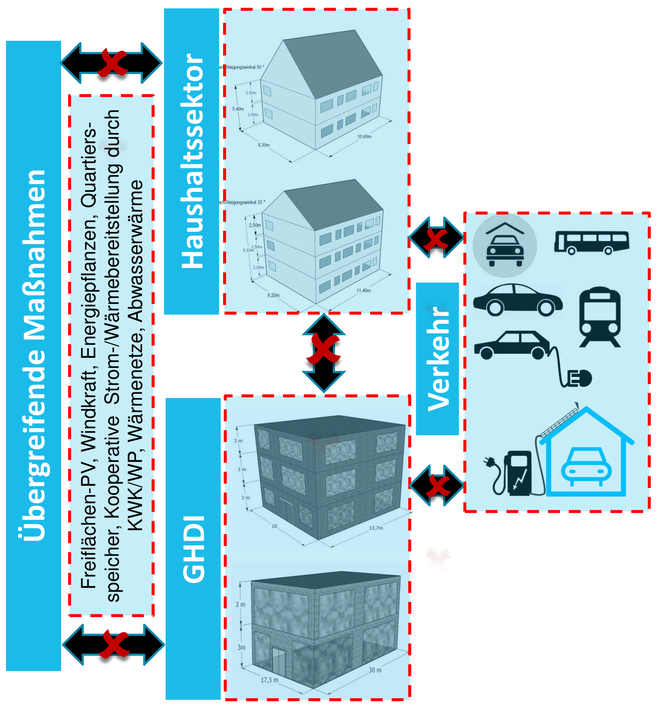


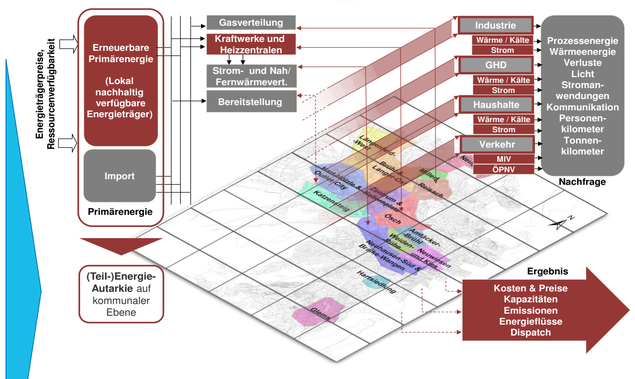
➔ Simulation von Einzelgebäuden in Verbindung mit verschiedenen Versorgungssystemen bestehend aus Kombinationen von Photovoltaik, Solarthermie, Gas-Brennwertgerät, Wärmepumpe, Mini-KWK, Lithium-Ionen Batterie, Warmwasserspeicher, Eisspeicher, Absorptionskältemaschine

Schritt 2: Sektorales Pooling für Autarkie in Energiesystemmodell

➔ Bewertung von sektoralen Autarkiepotenzialen unter Berücksichtigung von Ausgleichseffekten durch sektorales Pooling in homogenen Quartieren

Legende:
Bilanzraum/-Grenze
✕ Keine Sektor-kopplung





- Frage: Welcher „Autarkie-Zugewinn“ ergibt sich für einzelne Sektoren, durch sektorales Pooling im Vergleich zur Einzelversorgungsaufgabe (Vergleich mit Schritt 1)

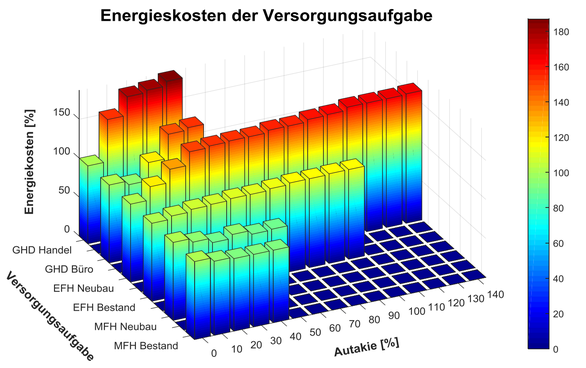
Schritt 3: Ganzheitliche Betrachtung für Autarkie in Energiesystemmodell

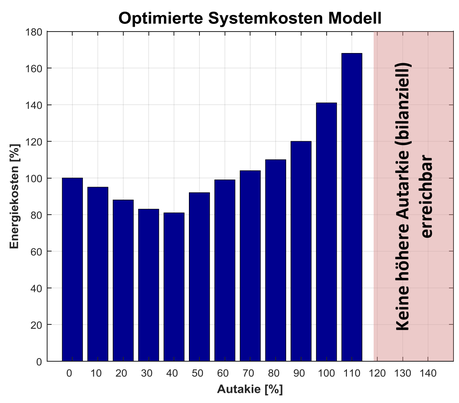
➔ **Ganzheitliche Analyse** und Bewertung eines städtischen Energiesystems hinsichtlich bilanzieller und lastgerechter Autarkiegrade im Vergleich zur Einzelbetrachtung der Versorgungsaufgaben

➔ Berücksichtigung von **Sektorkopplungseffekten** auf Autarkiegrad eines städtischen Energiesystems und Ermittlung von Autarkiepotenzialen

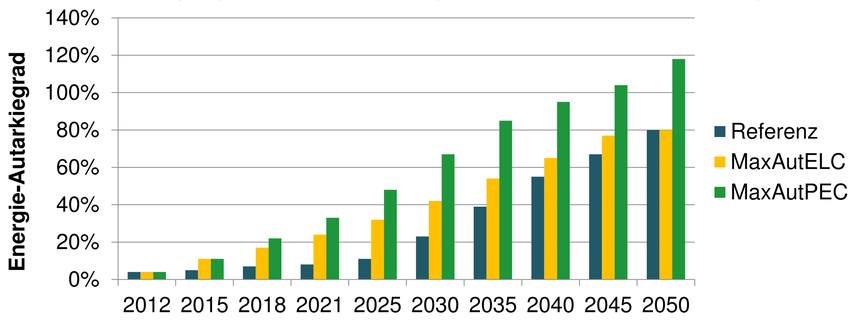
3. Ergebnisse

Energie-Autarkiepotenziale und Kosten für bilanzielle Eigenversorgung bei isolierter Betrachtung von Versorgungsaufgaben (links, siehe Methodik Schritt 1) und bei ganzheitlicher Optimierung des Bilanzraumes Metzingen hinsichtlich der Eigenversorgung (rechts, siehe Methodik Schritt 3).





Szenariendefinition		
Referenz	**MaxAutELC**	**MaxAutPEC**
Emissionsziel -90% CO_2 bis 2050 im Vgl. zu 1990 + keine Autarkie-Nebenbedingung	Emissionsziel + Max. bilanzieller Strom-Autarkiegrade	Emissionsziel + Max. bilanzieller Primärenergie-Autarkiegrade



➔ Das Ziel einer maximalen Stromautarkie führt zu vergleichbarer Import-Unabhängigkeit, wie das CO_2 Emissionsreduktionsziel in Referenz
➔ EE-Potentialerschließung erfolgt bei separater Autarkiebedingung für Strom und Wärme zu starken Verdrängungseffekten → Integrierte Betrachtung von Strom und Wärme sinnvoll
➔ Bilanzielle Energie-Unabhängigkeit von Gesamtsystem erreichbar (116%), jedoch keine Netzabkopplung (lastgerechte Autarkie) möglich.
➔ Deutliche Energiekostenzunahme durch Erschließung nicht wirtschaftlicher Versorgungslösungen oberhalb eines Anteils von 90% Eigenversorgung

4. Fazit

➔ Autarkie bzw. die Selbstversorgung mit Energie wird zunehmend als neue Werteorientierung für Akteure auf lokaler Ebene hinsichtlich ihrer Energiepolitik erachtet und kann einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende beisteuern
➔ Die Optimierung hinsichtlich Grad der Unabhängigkeit, Klimaschutz oder Kosten führt zu teilweise sehr unterschiedlichen Energiesystemlösungen
➔ Erreichung einer bilanziellen Strom-Autarkie mit vorliegenden Potenzialen stellt sowohl auf Gebäude-Ebene als auch auf städtischer Ebene keine bedeutsame Hürde dar; 100% Energie-Autarkie stellt dagegen aufgrund der hohen Wärmenachfrage ein bedeutend anspruchsvolleres Ziel und die teurere Lösung dar (+41% jährliche Systemkosten im Vergleich zur Referenz)
➔ Starke Elektrifizierung des Energiesystems ist Voraussetzung zur Erreichung eines hohen Autarkiegrades. Elektromobilität und Elektrokessel/Wärmepumpen tragen zur Integration hoher Anteile von EE in den Sektoren Wärme und Verkehr bei
➔ Nutzung von sektoralem Pooling sowie Sektorkopplungseffekten sind fundamentaler Bestandteil zur Erreichung hoher Autarkiegrade auf städtischer Ebene

Ausblick
➔ Weiterentwicklung der Modellierung durch Implementierung von DSM
➔ Berücksichtigung von Tarifsystemen und Analyse des Einflusses auf das Energieversorgungssystem im Hinblick auf lokale Selbstversorgung