
Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen unter Berücksichtigung der bidirektionalen Integration elektrischer Fahrzeuge

Georg Franke

Nordendstraße 2, 64560 Riedstadt

franke@ims.tu-darmstadt.de

015786007325

Institut für Mechatronische Systeme im Maschinenbau

Fachbereich Maschinenbau

Technische Universität Darmstadt

Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen unter Berücksichtigung der bidirektionalen Integration elektrischer Fahrzeuge

1. Kurzfassung

Die Notwendigkeit einer nachhaltigen und sozialverträglichen Energieversorgung auf Basis regenerativer Ressourcen ist in Deutschland und Europa so hoch wie nie zuvor. Im Zuge verschiedener Gesetze werden deshalb Regelungen für unterschiedliche Sektoren und Bereiche definiert. Zwei der wichtigsten dieser Bereiche stellen der Verkehrssektor und der Gebäudebereich dar, welche für einen großen Teil der ausgestoßenen Treibhausgasemissionen verantwortlich sind. Der Verkehrssektor wird in den letzten Jahren vor allem durch das Voranschreiten der Mobilitätswende geprägt, die Elektromobilität entwickelt sich in Deutschland und Europa mit wachsender Dynamik. Im Gebäude- und Wohnbereich zeichnet sich parallel ein Trend zur innerstädtischen Verdichtung ab. Zentral gelegene, mehrstöckige Wohnquartierkonzepte nehmen in Ballungsgebieten weiter zu. Deshalb werden auch Energieversorgungssysteme für Wohnquartiere mit integrierter Ladeinfrastruktur zunehmend an Bedeutung gewinnen. Durch mögliche Effizienzsteigerungen und vor dem Hintergrund steigender Energiepreise können hierbei durch einen optimierten energetischen Betrieb verschiedene Potenziale gehoben werden. Weitere Vorteile der energetischen Systemintegration birgt der Einsatz des bidirektionalen Ladens, da die energetische Flexibilität des Gesamtsystems so erhöht werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird untersucht, inwieweit das bidirektionale Laden als integrativer Bestandteil des Betriebs multimodaler Energieversorgungssysteme für Wohnquartiere ökonomischen und ökologischen Nutzen schaffen kann. Hierfür wird systematisch ein Modell entwickelt, welches sämtliche relevanten energiewirtschaftlichen, rechtlichen, technologischen und verhaltensbedingten Aspekte abbildet. Der Betrieb des Energieversorgungssystems wird hierbei mittels gemischt-ganzzahliger linearer Modellierung optimiert. Das Mobilitätsverhalten der Bewohner wird mit Copula-Funktionen abgebildet, während ihr Entscheidungs- und Ladeverhalten regelbasiert modelliert wird. Das Zusammenwirken aller Modellentitäten wird übergeordnet agentenbasiert realisiert. Das Gesamtmodell wird genutzt, um auf Basis von erhobenen Realdaten das Betriebsverhalten des simulierten Gesamtsystems aus stationären und mobilen energetischen Komponenten zu analysieren.

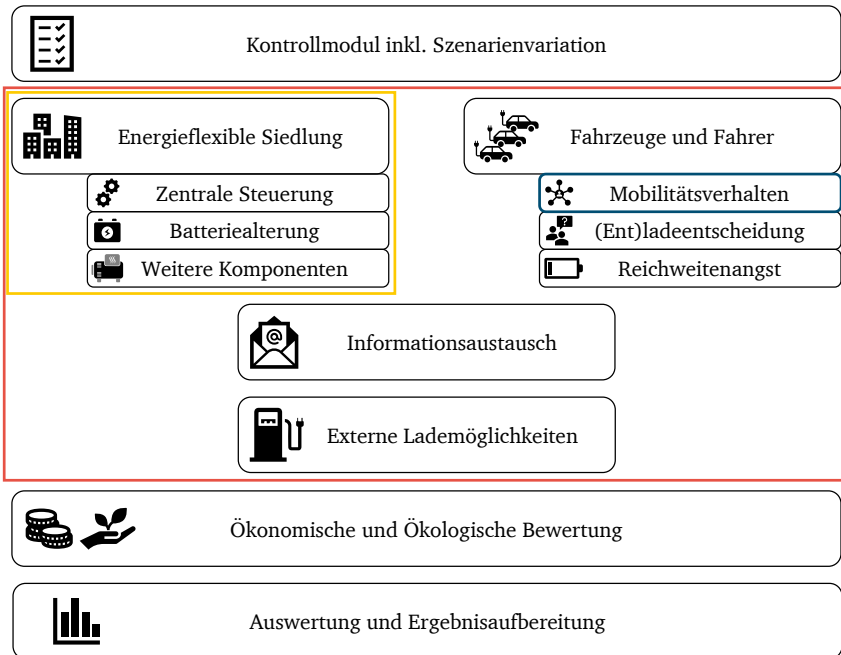
Die Simulationsergebnisse zeigen, dass das bidirektionale Laden im Zuge des optimierten Betriebs der untersuchten Energieversorgungssysteme von Wohnquartieren unter den aktuellen regulatorischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Deutschland nicht ökonomisch zielführend eingesetzt werden kann. Anpassungen dieser Rahmenbedingungen in Bezug auf den direkten Zugang kleinerer Wirtschaftseinheiten zum Energiemarkt sowie bei bestimmten regulatorisch bedingten Umlagen können jedoch dazu führen, dass das bidirektionale Laden im energetischen Betrieb ökonomische Parität erlangt. Zusätzlich wird gezeigt, dass übergeordnete Netzebenen entlastet werden können.

2. Zusammenfassung

Das hauptsächliche Anliegen der Arbeit ist das Schaffen neuer Erkenntnisse im Bereich der energetischen Betriebsoptimierung von effizienten und ressourcenschonenden Energieversorgungssystemen zukünftiger Wohnquartiere. Im Detail wird die ökonomisch und ökologisch zielführende Integration von Ladeinfrastruktur und hierbei speziell das bidirektionale Laden von elektrischen Fahrzeugen innerhalb Energieflexibler Siedlungen untersucht. Die erreichten Ergebnisse können Ausgangspunkt für weitere Forschungen und Informationsgrundlage und Anreiz für Entscheidungsträger in Industrie, Wirtschaft und Politik sein, um den Einsatz sektorenkoppelter energetischer Systeme in Wohnquartieren in Deutschland weiter voranzutreiben.

Für weiterführende Forschungsarbeiten kann vor allem die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methodik zum Aufbau des Gesamtmodells eine wertvolle Grundlage bilden. Hierbei können sowohl das Gesamtmodell als auch die einzelnen Teilmodelle genutzt, auf andere Anwendungsfälle übertragen und weiterentwickelt werden. Das verwendete multimodale Modell der Energieflexiblen Siedlung bildet sowohl die entscheidenden physikalischen Eigenschaften aller aktuell relevanten Versorgungstechnologien im Wohngebäudebereich als auch sämtliche betriebsrelevanten energiewirtschaftlichen und -rechtlichen Regelungen in Deutschland ab. Auf Basis eines gemischt-ganzzahligen linearen Optimierungsmodells kann somit aus Sicht eines zentralen Betreibers des Energieversorgungssystems ein für verschiedene Zielsetzungen angepasster Betrieb simuliert werden. Im Modell der Energieflexiblen Siedlung wird zusätzlich die für das Laden der elektrischen Fahrzeuge der Bewohner notwendige Ladeinfrastruktur berücksichtigt. Das hierfür benötigte Lademanagement kann wahlweise in die übergeordnete Betriebsstrategie integriert werden, um zusätzliche sektorenkoppelnde Betriebseffekte zu heben. Die wichtigsten Aspekte für die Integration der bidirektional ladenden Fahrzeuge in das stationäre Energiesystem stellen das Mobilitäts- und das Lade- bzw. Entladeverhalten der Fahrer dar. Aus diesem Grund sind die Fahrer und ihre Fahrzeuge in einem gesonderten Teilmodell detailliert modelliert. Das stochastische Mobilitätsverhalten wird hierbei mittels Copula-Funktionen abgebildet, für die Lade- und Entladeentscheidungen werden regelbasierte Ansätze genutzt. Diese basieren auf den wichtigsten in der wissenschaftlichen Literatur aufgeführten psychologischen und ökonomischen Faktoren der Beeinflussung des Ladeverhaltens. Um die unterschiedlichen Interessen und verschiedenen Entscheidungen der zu modellierenden Entitäten im Gesamtmodell zusammenführen zu können, wird im Rahmen der Arbeit ein agentenbasierter Ansatz verwendet. Die Energieflexible Siedlung und die Fahrer der elektrischen Fahrzeuge werden als handelnde Agenten modelliert, welche sich mit ihren jeweiligen Entscheidungen gegenseitig beeinflussen. Die Systematik dynamischer Lade- und Entladepreise wird in diesem Kontext verwendet, um das Verhalten der Agenten mittels ökonomischer Signale zielgerichtet aufeinander abstimmen zu können. Zur übergeordneten Beurteilung und Untersuchung der Auswirkung bestimmter Variationen wird im Rahmen der Arbeit eine Bewertungssystematik für das simulierte Gesamtsystem entwickelt und verwendet. Mithilfe dieser werden verschiedene ökologische und ökonomische Kennzahlen definiert, welche unterschiedliche Aspekte der jeweiligen Simulationen miteinander vergleichbar machen.

Basierend auf den entwickelten Modellen werden unter Verwendung von Realdaten Simulationen verschiedener Varianten der Energieflexiblen Siedlung und den Fahrern und ihrer Fahrzeuge durchgeführt. Hierbei werden mit verschiedenen Bauvarianten, energetischen Komponenten und Jahreszeiten vor allem wechselnde Rahmenbedingungen berücksichtigt, welche das Betriebsverhalten des Gesamtsystems signifikant beeinflussen können. Der grundlegende Gültigkeitsbereich der Simulationsergebnisse kann somit erhöht werden. Zusätzlich können die Veränderungen, welche durch regulatorische oder andere Anpassungen in bestimmten Varianten erzeugt werden, gezielt nachverfolgt und analysiert werden.



- Gemischt-ganzzahlig lineare Modellierung
- Modellierung mittels Copula-Funktionen
- Agentenbasierte Modellierung

Abbildung 1: Abstrakte Struktur des Gesamtmodells

3. Zentrale Ergebnisse

Ausgehend von den detaillierten Auswertungen der Simulationsergebnisse lassen sich verschiedene Erkenntnisse ableiten, welche unterschiedliche Aspekte des Betriebs der Energieflexiblen Siedlung und des Einsatzes des bidirektionalen Ladens betreffen. Unabhängig vom bidirektionalen Laden kann festgehalten werden, dass die verschiedenen untersuchten Bauvarianten und Jahreszeiten einen entscheidenden Einfluss auf die optimalen energetischen Betriebsstrategien der Energieflexiblen Siedlung haben und teilweise zu stark unterschiedlichen ökonomischen und ökologischen Bewertungskennzahlen führen. Ein speziell auf die aktuelle Situation abgestimmter Betrieb des Energieversorgungssystems ist demnach unabdingbar. Zusätzlich konnte die generelle ökonomische Vorteilhaftigkeit der Integration der Lademanagements in die übergeordnete Betriebsstrategie gezeigt werden. Eine integrierte Betrachtung des stationären Energieversorgungssystems und der Ladeinfrastruktur kann somit immer empfohlen werden.

Bezüglich des Einsatzes dynamischer Preise für Lade- und Entladeenergie zeigen die Simulationsergebnisse eindeutig, dass im Vergleich zur vollständig zentralen Ladesteuerung durch die Energieflexible Siedlung niemals bessere ökonomische Gesamtergebnisse erzielt werden können. Die geteilte Entscheidungsgewalt bezüglich der Durchführung der Ladevorgänge zwischen der Energieflexiblen Siedlung und den Fahrern der Fahrzeuge führt hierbei immer zu einer gesamtsystemisch nicht optimalen Lösung. Die als Signale zur Koordination der Agenten genutzten Lade- und Entladepreise sind in Verbindung mit den für die Ladeentscheidung der Fahrer relevanten Faktoren nicht ausreichend, um eine gesamtsystemisch optimale Lösung mittels dezentraler Entscheidungen nachbilden zu können. Trotzdem kann mit den Simulationsergebnissen nachgewiesen werden, dass durch die dynamischen Preise die zusätzliche Flexibilität der Veränderung des Mobilitätsverhaltens der Fahrer aktiviert werden kann und für das Gesamtsystem ökonomisch vorteilhaft eingesetzt wird. Im Rahmen eines vollständig zentralen Lademanagements müssten die Fahrer große Teile ihrer Entscheidungshoheit an das übergeordnete Energiemanagement der Energieflexiblen Siedlung abgeben. Falls dies nicht gewünscht sein sollte, stellt die Systematik der dynamischen Preise eine sinnvolle Alternative dar. Die Fahrer können ihre Entscheidungsgewalt bezüglich des Ladens beibehalten, während das zentrale Energiemanagement der Energieflexiblen Siedlung über die dynamischen Preissignale trotzdem gezielt Einfluss auf das Ladeverhalten nehmen kann. Weiterhin ist zu beachten, dass erst die dynamische Preissetzung den ökonomischen Einsatz des bidirektionalen Ladens im Betrieb der Energieflexiblen Siedlung ermöglicht. Nur mithilfe der zeitlich variablen „Weitergabe“ der aktuellen ökonomischen Situation der Energieflexiblen Siedlung an die Fahrer kann die Flexibilität des bidirektionalen Ladens aktiviert werden.

4. Verwertbarkeit und Ausblick

Zusätzlich zu den direkten Auswirkungen des bidirektionalen Ladens auf den energetischen Betrieb Energieflexibler Siedlungen können übergeordnet weitere positive Effekte erzielt werden, falls das bidirektionale Laden in Wohnquartieren und anderen lokalen Energiesystemen hohe Verbreitung findet. Durch das Aufzeigen des ökonomisch sinnvollen lokalen Einsatzes des bidirektionalen Ladens liefert die vorliegende Arbeit hierzu einen wichtigen Beitrag. Die Möglichkeit der

Erhöhung der Eigenverbrauchsquote, welche in den Simulationen direkt nachgewiesen werden konnte, kann ein gewichtiger Baustein zur Verringerung des übergeordneten Netzausbaus und der Senkung der zugehörigen volkswirtschaftlichen Kosten sein. Die Initiative „Bidirektionales Laden“ weist in ihrem aktuellen Positionspapier auf weitere volkswirtschaftliche Mehrwerte hin, welche durch einen erhöhten Einsatz des bidirektionalen Ladens in Deutschland geschaffen werden könnten. Hierzu gehört eine schnellere Durchdringung der E-Mobilität, ein höherer möglicher Anteil fluktuierender, erneuerbarer Energien im öffentlichen Netz sowie eine kosteneffiziente Transformation der übergeordneten energetischen Infrastruktur mit sowieso vorhandenen Assets. Mit der Verbreitung lokaler, integrierter und intelligenter Energieversorgungssysteme können ökonomisch attraktive Einsatzgebiete für das bidirektionale Laden geschaffen und somit volkswirtschaftlicher Mehrwert generiert werden.

Die entscheidende Voraussetzung für die Realisierung der beschriebenen Vorteile durch das bidirektionale Laden ist die Anpassung der entsprechenden Regulatorik. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Anpassungen vorgeschlagen und ihre Wichtigkeit für den betriebsstrategisch sinnvollen Einsatz des bidirektionalen Ladens in intelligenten Energiesystemen demonstriert. Diese werden neben anderen ebenfalls von der Initiative „Bidirektionales Laden“ gefordert (vgl. [236, S. 30 ff.]). Zeitnahe gesetzliche Anpassungen sind im Rahmen der Dringlichkeit der Energiewende als Grundlage für planbare Geschäftsmodelle im Bereich intelligenter und energieflexibler Systeme unabdingbar. Für die unterschiedlichen Stakeholder im Kontext des Konzepts der Energieflexiblen Siedlung würden sich mit den regulatorischen Anpassungen verschiedene Folgen ergeben. Das Geschäftsmodell des Betriebes lokaler Energieversorgungssysteme würde auch für Unternehmen außerhalb der großen Energieversorgungskonzerne attraktiver werden. Innovation und Konkurrenz könnten somit zu einer weiteren Beschleunigung der Entwicklungen auf diesem Gebiet führen. Die bisher etablierten Energieversorger würden zusätzliche Wettbewerber bekommen, ihr Interesse an einer regulatorischen Vereinfachung und Öffnung ist deshalb als gering einzuschätzen. Die Bewohner könnten sich durch integrierte Energieflexible Siedlungen aktiv im Bereich der lokalen Energieversorgung einbringen und zusätzlich von potenziell geringeren Energiekosten profitieren. Auch gesamtgesellschaftlich können sich wie beschrieben Vorteile entwickeln, eine weitere Integration und Flexibilisierung lokaler Energieversorgungssysteme ist somit auch gegen einen potenziellen Widerstand etablierter Versorger wünschenswert.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das bidirektionale Laden in Energieflexiblen Siedlungen vor dem Hintergrund bestimmter regulatorischer Anpassungen einen relevanten Beitrag zum Umbau der energetischen Infrastruktur in Deutschland leisten kann. Vor allem durch das Bereitstellen zusätzlicher energetischer Flexibilität kann das bidirektionale Laden in energetisch intelligent betriebenen Wohnquartieren ein wichtiger Baustein der anstehenden Transformation des deutschen Energiesystems sein. Die realisierbare Flexibilität kann unterschiedlich und zielgerichtet eingesetzt werden und dabei die generelle Nachhaltigkeit, die Resilienz und den Ressourcenverbrauch des Transformationsprozesses verbessern.

Betriebsoptimierung Energieflexibler Siedlungen unter Berücksichtigung der bidirektionalen Integration elektrischer Fahrzeuge



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

MASCHINENBAU
We engineer future

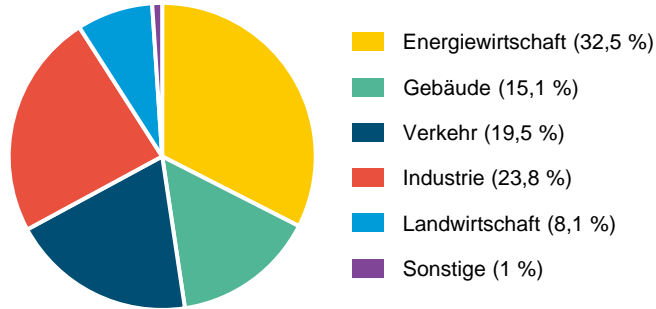
IMS

Symposium Energie-Campus
Georg Avemarie



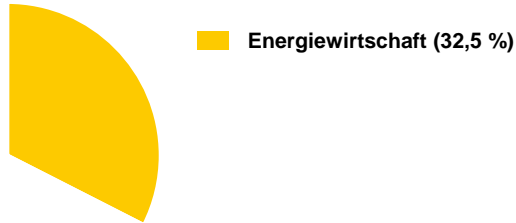
Sektorenkopplung in Wohnsiedlungen

Treibhausgasemissionen Deutschland 2021



Sektorenkopplung in Wohnsiedlungen

Treibhausgasemissionen Deutschland 2021

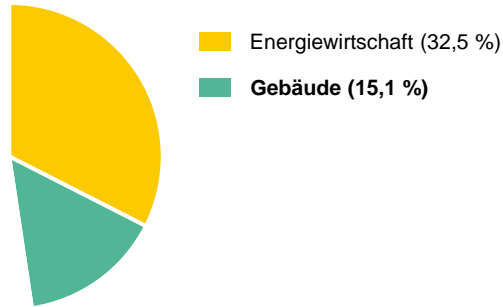


Energiewirtschaft

- „Energiewende“
- Regenerative und dezentrale Erzeugung
→ Komplexe lokale Prosumer-Strukturen

Sektorenkopplung in Wohnsiedlungen

Treibhausgasemissionen Deutschland 2021



Energiewirtschaft

- „Energiewende“
- Regenerative und dezentrale Erzeugung
→ Komplexe lokale Prosumer-Strukturen

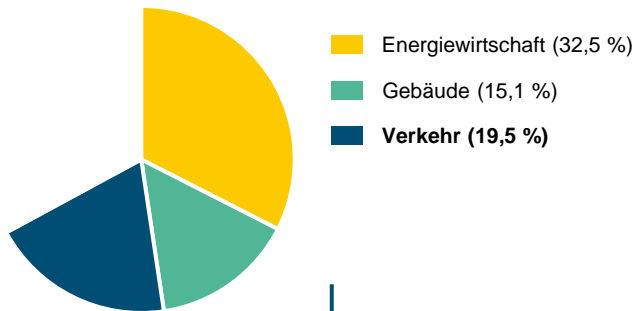


Gebäude

- Innerstädtische Verdichtung
- Einfamilienhäuser → Mehrfamilienhäuser
→ Zentrale, mehrgeschossige Siedlungskonzepte

Sektorenkopplung in Wohnsiedlungen

Treibhausgasemissionen Deutschland 2021



Energieversorgungssysteme für Wohnsiedlungen gewinnen zunehmend an Bedeutung.



Energiewirtschaft

- „Energiewende“
- Regenerative und dezentrale Erzeugung
→ Komplexe lokale Prosumer-Strukturen



Gebäude

- Innerstädtische Verdichtung
- Einfamilienhäuser → Mehrfamilienhäuser
→ Zentrale, mehrgeschossige Siedlungskonzepte



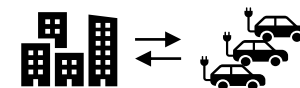
Verkehr

- „Mobilitätswende“
- Ziel für 2030: 15 Mio. Elektrofahrzeuge¹
→ Hoher zusätzlicher Ladeenergiebedarf

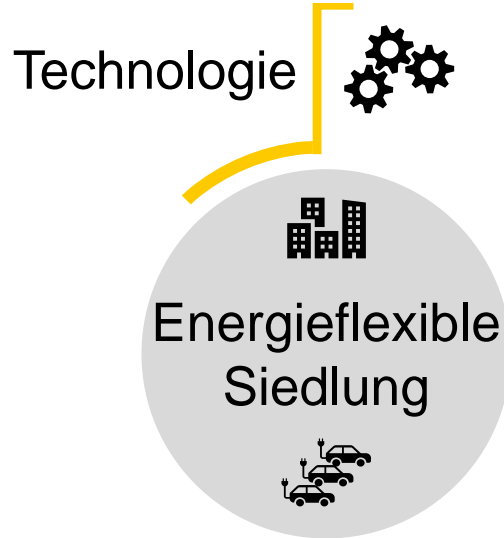
Quellen: [1] Koalitionsvertrag Bundesregierung 2021

Wissenschaftliche Schwerpunkte

Fokus	Integrale Untersuchung des energetischen Betriebs Energieflexibler Siedlungen
Ziel	Verbesserung ökonomischer und ökologischer Betriebskennzahlen
Ansatz	Optimierte Ausnutzung der Energieflexibilität
Spezielle Anwendung	Einsatz des bidirektionalen Ladens

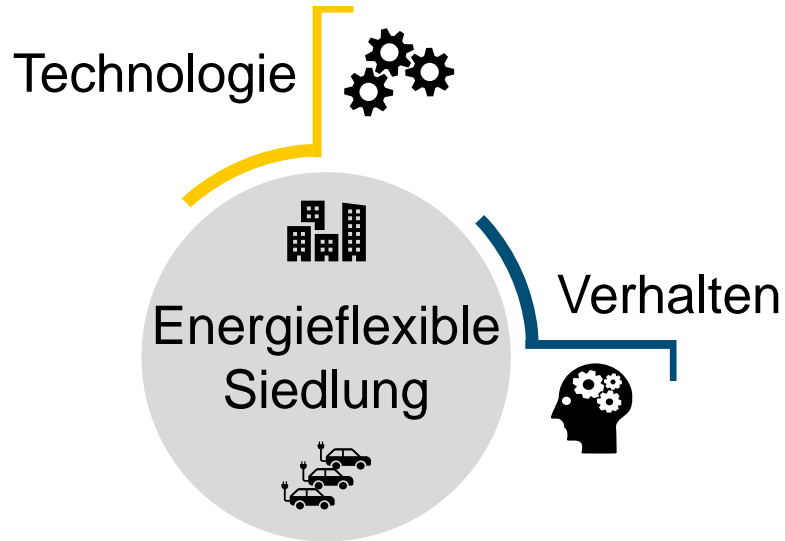


Forschungsfragen



**Potenziale der Integration stationärer
und mobiler energetischer Komponenten**

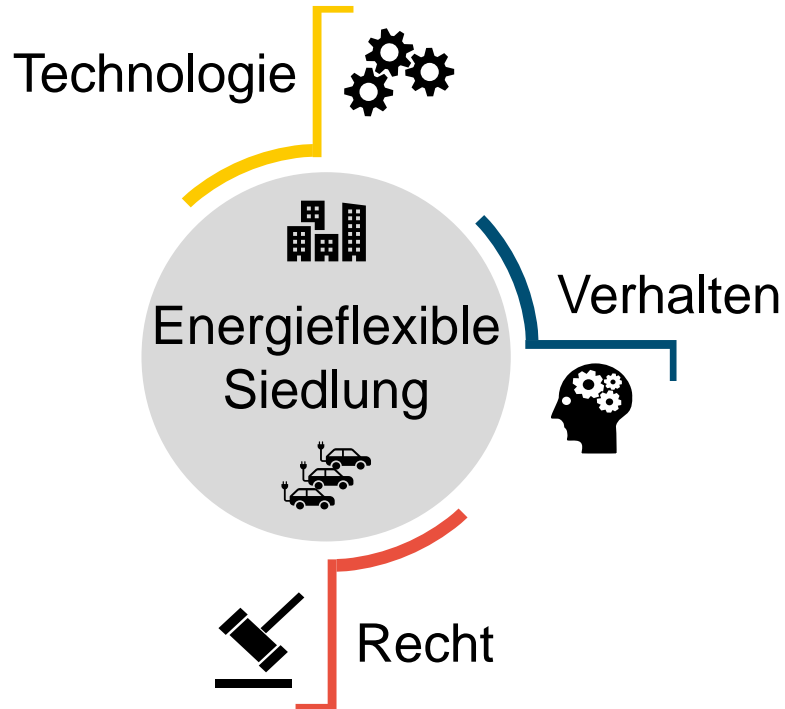
Forschungsfragen



? Potenziale der Integration stationärer und mobiler energetischer Komponenten

? Beeinflussung des Lade- und Mobilitätsverhaltens der Fahrer

Forschungsfragen

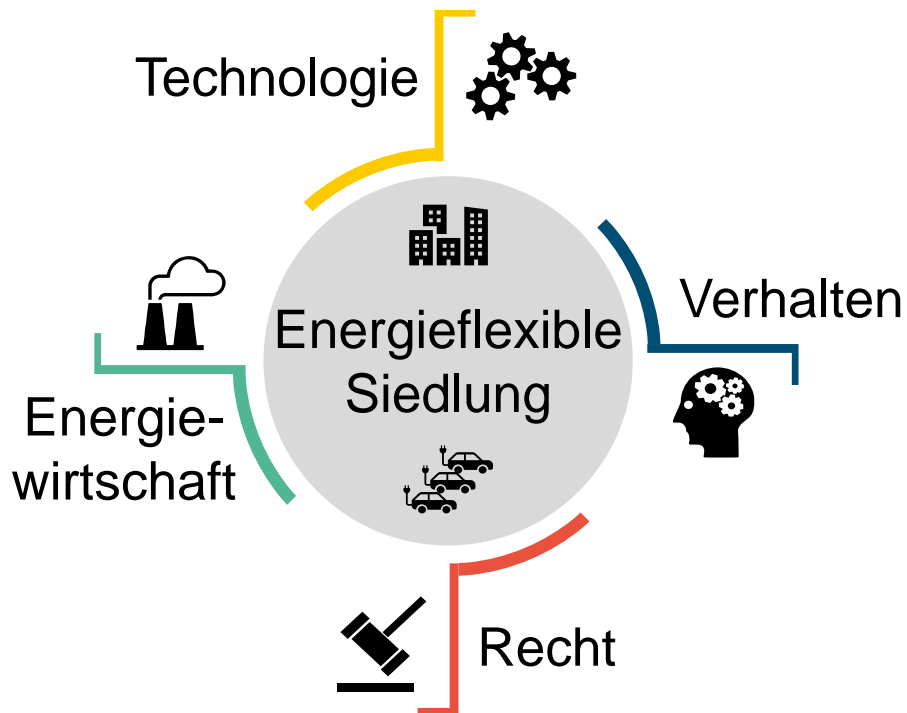






? Potenziale der Integration stationärer und mobiler energetischer Komponenten

? Beeinflussung des Lade- und Mobilitätsverhaltens der Fahrer

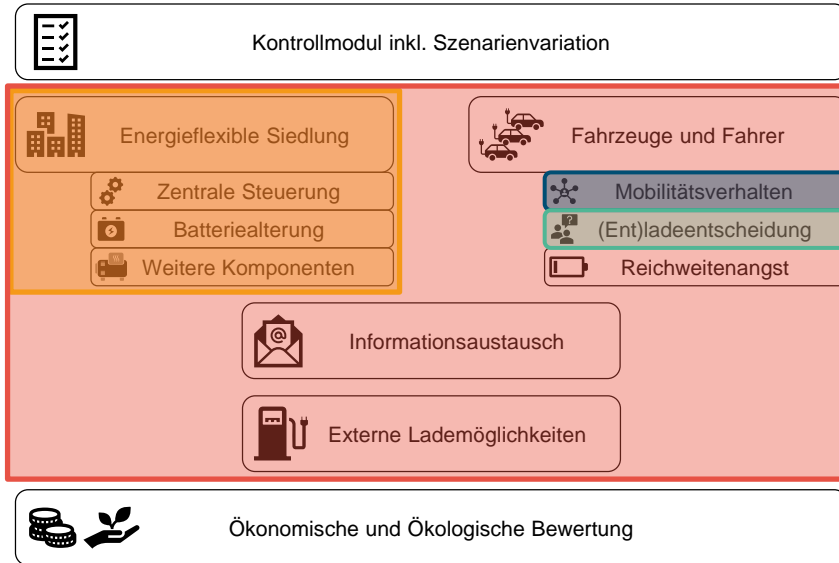
? Einfluss und mögliche Anpassungen der relevanten Regulatorik

Forschungsfragen



-  Potenziale der Integration stationärer und mobiler energetischer Komponenten
-  Beeinflussung des Lade- und Mobilitätsverhaltens der Fahrer
-  Einfluss und mögliche Anpassungen der relevanten Regulatorik
-  **Konkrete Folgen auftretender sektorenkoppelnder Effekte**

Übersicht Modellierung



Gemischt-ganzzahlig lineare Modellierung

- Betriebsoptimierung Energieflexible Siedlung
- Abbildung sämtlicher Rahmenbedingungen

Modellierung mittels Copula-Funktionen

- Stochastisches Mobilitätsverhalten
- Individuelle Mobilitätsgrundlagen

Regelbasierte Entscheidungsfindung

- Lade- und Entladeentscheidungen
- Individuelle Entscheidungskriterien

Agentenbasierte Modellierung

- Wechselwirkungen der Energieflexiblen Siedlung mit Fahrzeugen und Fahrern

Zentrale Ergebnisse und Verwertung



Wichtigste Simulationsergebnisse



Technologie

Integration des Lademanagements in Betriebssteuerung hebt ökonomisches Potenzial



Verhalten

Dynamische Lade- und Entladepreise sind geeignet, um Fahrerverhalten zu beeinflussen



Recht

Notwendigkeit regulatorischer Anpassungen, um bidirektionales Laden ökonomisch attraktiv einzusetzen



Energiewirtschaft

Bidirektionales Laden kann übergeordnet positive Effekte bewirken



Ausblick und Verwertung

Umsetzung in Realsystemen

- Realisierung der entwickelten Ansätze in Hard- und Softwaremodulen

Erweiterung

- Integration zusätzlicher Aspekte (z. B. Netzdienstleistungen)
- Übertragung auf weitere Anwendungsfälle (z. B. Industrieparks)

Ausgründung und Kommerzialisierung

- Lösung für freien Markt durch Spin-off verfügbar machen



FOLIVORA
ENERGY