Karlsruher Institut für Technologie

Vernetzte Energieversorgung

Eine gesamtheitliche Betrachtung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität

Martin Zimmerlin, M.Sc.

Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik

Engesserstr. 11, 76131 Karlsruhe
0721 608-43058
martin.zimmerlin@kit.edu

Vernetzte Energieversorgung:
Eine gesamtheitliche Betrachtung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität

Einleitung

Die bisherige Ausgestaltung der „Energiewende“ in Deutschland konzentrierte sich sehr stark auf die Förderung von regenerativen Stromerzeugungsanlagen und könnte deshalb auch als „Stromwende“ bezeichnet werden. Nachdem mit dem Wärmesektor der größte Anteil des Endenergieverbrauchssektors im Haushaltsbereich in den Fokus genommen wurde (Abbildung 1), gab die jüngste Diskussion um die Zukunftsfähigkeit von Verbrennungsmotoren im Automobilbereich der Frage nach nachhaltiger Mobilität, dem größten Endenergieverbrauchssektor neuen Auftrieb.

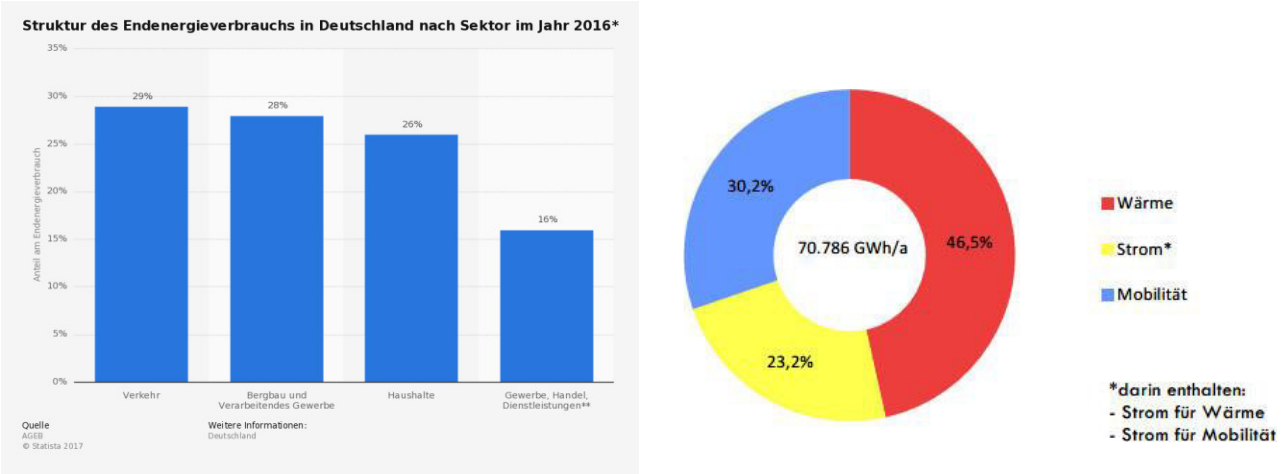


Abbildung 1: Endenergieverbrauch in Deutschland

Vor diesem Hintergrund scheint nun die Elektromobilität einen entscheidenden Schub zu bekommen. Doch unabhängig von der Frage ob zukünftig Autos durch den Menschen oder autonom gesteuert werden, ob der einzelne ein eigenes Auto besitzen wird oder der Anteil an Carsharing-Fahrzeugen deutlich zunehmen wird, stellt sich die Frage: wie können Elektrofahrzeuge möglichst effizient in das Gesamtenergieversorgungssystem integriert werden?

Doch nicht nur batteriebetriebene Elektrofahrzeuge können einen Beitrag zu einer Energiewende im Verkehrssektor leisten. Auch mit Wasserstoff aus regenerativen Quellen betriebene Fahrzeuge mit Brennstoffzellen oder Erdgasfahrzeuge, die mit Methan aus erneuerbaren Quellen (SNG) angetrieben werden, tragen zu einer Verbesserung der CO_2-Bilanz im Mobilitätssektor bei.

Im Wärmesektor liegt der Fokus auf Kraftwärmekopplung(KWK)-Anlagen wie Blockheizkraftwerken, die entweder einzelne Gebäude oder über Nahwärmenetze auch ganze Quartiere mit Wärme versorgen können und dabei Strom erzeugen. Das beispielsweise eingesetzte Erdgas kann mittels Power-to-Gas-Prozessen auch räumlich entfernt erzeugt werden, sodass das Gasnetz als Speicher verwendet werden kann. Weitere Heizungstechnologien die in Betracht gezogen werden können sind Wärmepumpen, Brennstoffzellen oder auch elektrische Heizstäbe (siehe Abbildung 2). Unabhängig von der Heizungstechnologie wird ein thermischer Pufferspeicher berücksichtigt.

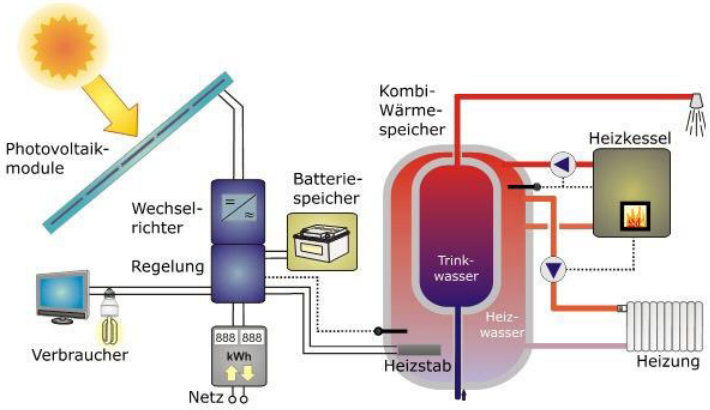


Abbildung 2: Beispiel eines Gebäudeenergiesystems [Quaschning]

Im Rahmen dieses Beitrags wird ein Optimierungsansatz vorgestellt mit welchem ein komplexes, vernetztes Energiesystem gesamtheitlich und optimal gesteuert werden kann. Dies kann sich sowohl auf die optimale Steuerung eines einzelnen Gebäudeenergiesystems mit regenerativer Erzeugungsanlage, thermischen und/oder elektrochemischen Energiespeichern, Heizung und Ladestation für Elektrofahrzeuge beziehen oder auf ein gesamtes Quartier. In letzterem Fall werden mehrere Gebäudeenergiesysteme durch einen zentralen Optimierungsalgorithmus gesteuert. Hierbei können zusätzlich Randbedingungen berücksichtigt werden, die einen sicheren Betrieb von Strom-, Gas,- und Wärmeverteilnetzen garantieren.

Methodik: Struktur des Optimierungsproblems

Bedingt durch die technischen Eigenschaften der betrachteten Komponenten ergibt sich aus der Zielstellung ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem. Dies resultiert in der Regel in einem erhöhten Rechenaufwand. Um die Rechenzeit dennoch zu begrenzen, soll das Optimierungsproblem deshalb, so weit möglich, mithilfe linearer Gleichungen beschrieben werden.

Allgemein kann ein Optimierungsproblem als Minimierung einer Zielfunktion $f(x)$ aufgefasst werden:

$$\min_x f(x) \tag{1}$$

Dabei sind folgende, lineare Randbedingungen zu beachten:

$$Ax \leq b \tag{2}$$

$$A_{eq}x = b_{eq} \tag{3}$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \tag{4}$$

$$x_i \in \mathbb{Z}$$

$$x_j \in \{0,1\}$$

$$i \neq j$$

Mithilfe der Zielfunktion, die nicht zwingend linear sein muss, können diverse Optimierungsziele untersucht werden. Dies können unter anderem eine möglichst regionale Nutzung von regenerativ erzeugter Energie um den Netzausbau zu minimieren (zellularer Ansatz), eine kostenminimale oder eine möglichst CO_2-neutrale Energieversorgung sein. Darüber hinaus können Optimierungsziele auch gleichzeitig verfolgt und mit einer jeweiligen Gewichtung in die Zielfunktion integriert werden.

Um den Energiespeicher optimal einsetzen und Anfahrverhalten von Anlagen berücksichtigen zu können, wird das Optimierungsproblem nicht für einen einzelnen Zeitpunkt sondern für einen

Zeitraum der Länge T gelöst. Somit ergibt sich beispielsweise für eine möglichst regionale Energieversorgung folgende Zielfunktion:

$$f(x) = \sum_{t=1}^{T} (P_{HUB,el}^{t})^2 \tag{5}$$

Die Zielfunktion (5) wird beschrieben durch die Summe der Quadrate der elektrischen Austauschleistung mit dem überlagerten elektrischen Netz. Durch die Quadrierung können für den Netzausbau relevante Leistungsspitzen reduziert und sowohl Bezugs- als auch Rückspeiseenergie minimiert werden.

In den Randbedingungen des Optimierungsproblems (2)-(4) werden lineare Berechnungsmodelle der Einzelkomponenten und Energieverteilnetze mithilfe von Gleichheitsbedingungen (2) und Ungleichheitsbedingungen (3)-(4) beschrieben. Im Vektor x sind dabei alle Zustandsgrößen gespeichert, die kontinuierlich, ganzzahlig oder binär sein können. So muss beispielsweise für ein Blockheizkraftwerk eine binäre An-/Aus-Variable eingeführt werden, um eine Mindestleistung in der Optimierung zu berücksichtigen. Anderenfalls würde die Anlage immer in Betrieb sein.

In Abbildung 3 sind alle Elemente der Matrix Aeq dargestellt, die nicht Null sind. In der Darstellung für einen Zeitpunkt (links) wird die Verbindung der einzelnen Teilmodelle mit den Netzmodellen (Strom und Gas) deutlich. In der rechten Darstellung (drei Zeitpunkte) wird die Verbindung einzelner Zeitschritte mithilfe der Speichergleichungen deutlich. Hierbei werden Einträge in der unteren Diagonalhälfte ergänzt. Insgesamt sind die Nicht-Null-Elemente jedoch sehr nahe an der Diagonalen, was sich positiv auf die Berechnungsdauer auswirkt.

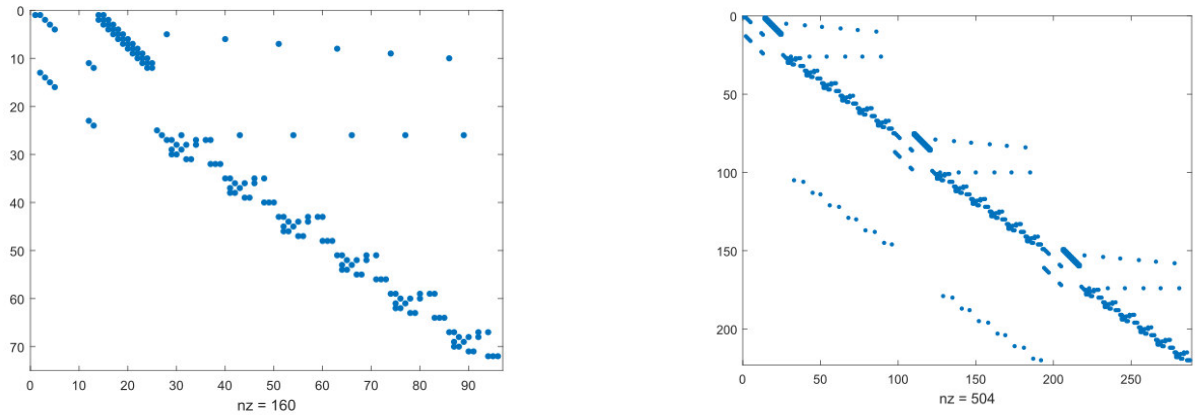


Abbildung 3: Nebenbedingungsmatrix

Anwendungsszenario

Im folgenden Abschnitt wird mithilfe des zuvor beschriebenen Ansatzes eine Optimierung durchgeführt, mit dem Ziel, eine möglichst regionale Nutzung regenerativer Energie zu ermöglichen. Als Zielfunktion wird dabei (5) verwendet. Dies führt zu einer Koordination von Ladevorgängen von Elektrofahrzeugen, Strom- und Wärmeproduktion sowie dem entsprechenden Einsatz von thermischen und elektrochemischen Energiespeichern. Das Nutzerverhalten wird dabei über Standardlastprofile nachgebildet und als nicht veränderlich angenommen. Somit entsteht für den Nutzer keinerlei Komforteinschränkung.

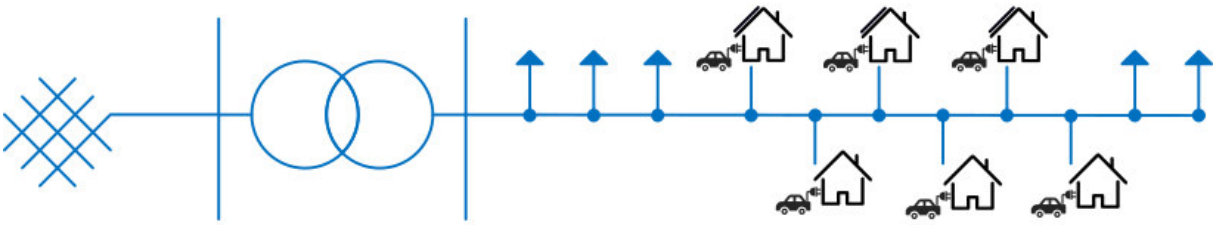


Abbildung 4: Beispielszenario

Als Beispielquartier dient ein Niederspannungsstrang, in dem sechs Mehrfamilienhäuser mit KWK-Anlagen, elektrischem Spitzenlastheizer und Elektrofahrzeugen angeschlossen sind. Einige der Gebäude verfügen zusätzlich noch über Photovoltaikanlagen. Neben diesen sechs sogenannten Energy Hubs sind Einfamilienhäuser Teil des Quartiers. Diese werden durch passive, nicht beeinflussbare Lasten abgebildet. Für die Ladeverfügbarkeit und die benötigte Ladeenergie der Elektrofahrzeuge werden Annahmen basierend auf Literaturangaben verwendet.

Da insbesondere der Wärmebedarf eine entscheidende Rolle spielt, werden sowohl ein Winter- als auch ein Sommerszenario berechnet. Der Optimierungshorizont ist dabei auf 2 Tage in 15min-Schritten gewählt. Das Optimierungsproblem umfasst somit 192 Zeitschritte.

Ergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse des Optimierungsansatzes dargestellt. Aus Gründen der Anschaulichkeit werden die resultierenden Zeitverläufe eines einzelnen Energy Hubs dargestellt. Die Optimierung uns Steuerung erfolgt jedoch auf Quartiersebene.

Im Winterszenario zeigt sich eine Eigenschafft einer gut dimensionierten KWK-Anlage. Aufgrund des Wärmebedarfs kann die KWK-Anlage keine Flexibilität bereitstellen, da sie durchgehend mit maximaler Leistung betrieben wird. Das Laden der Elektrofahrzeuge erfolgt deshalb mit möglichst geringer Leistung, um am Ende jedes Ladevorgangs den vorgegebenen Speicherzustand zu erreichen. Im untersuchten Fall soll der Fahrzeugspeicher vollständig geladen werden.

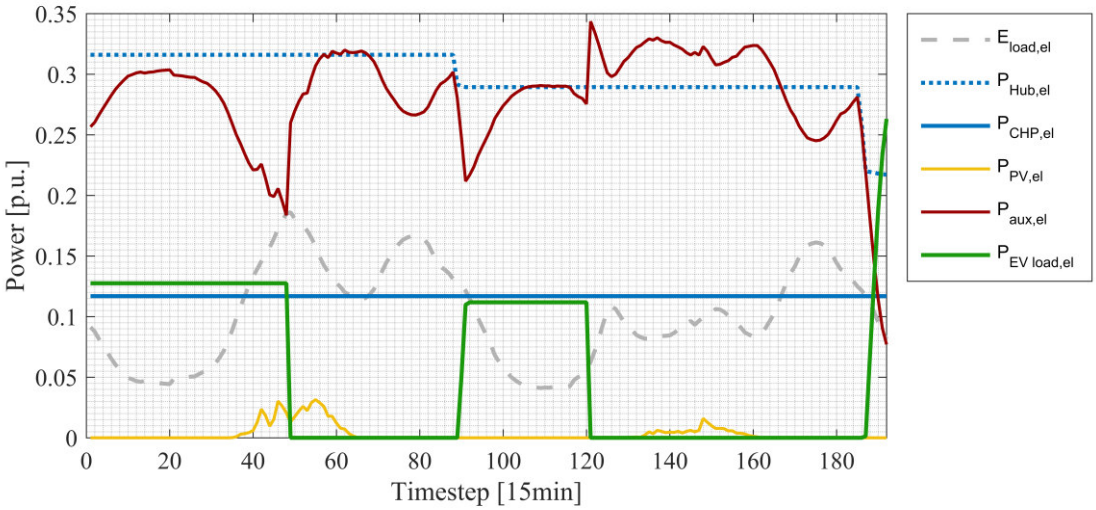


Abbildung 5: Ergebnis Winter

Im Sommer zeigt sich ein anderes Bild. Hier ist der thermische Bedarf deutlich geringer und die Einspeisung der Photovoltaikanlagen größer als im Winterszenario.

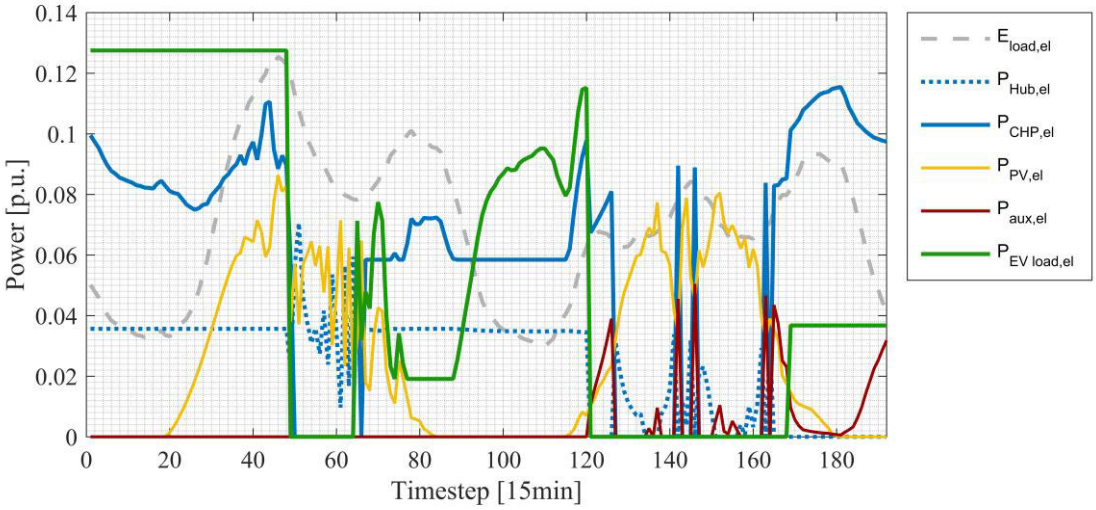


Abbildung 6: Ergebnis Sommer

Somit kann die KWK-Anlage als Flexibilitätsoption zu einer stabilen, regionalisierten Energieversorgung auf Quartiersebene beitragen. Einschränkung ist hierbei die Verwendung der produzierten Wärme. In Abbildung 6 wird deutlich, dass die KWK-Anlage parallel zum Laden des Fahrzeugs in Betrieb genommen wird und somit direkt einen Teil der benötigten elektrischen Leistung bereitstellt.

Fazit

Im Rahmen der aktuell laufenden Forschungsarbeit wird eine gesamtheitliche Optimierung der Energieversorgung auf Quartiersebene untersucht. Hierbei können Synergiepotentiale aus einer Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ausgeschöpft werden.

Die in diesem Beitrag vorgestellte Beispielanwendung des Optimierungsansatzes zeigt, wie der Einsatz von KWK-Anlagen auf das Laden von Elektrofahrzeugen abgestimmt werden kann. Dies führt zu einer effizienten Energieversorgung, da die erzeugte Energie direkt vor Ort genutzt wird.

Im weiteren Verlauf der Arbeit sollen weitere Elemente, wie beispielsweise Power-to-Gas-Anlagen, Gastankstellen für SNG-Fahrzeuge und auch Wärmenetze modelliert und in die Optimierungsumgebung integriert werden.

Karlsruher Institut für Technologie

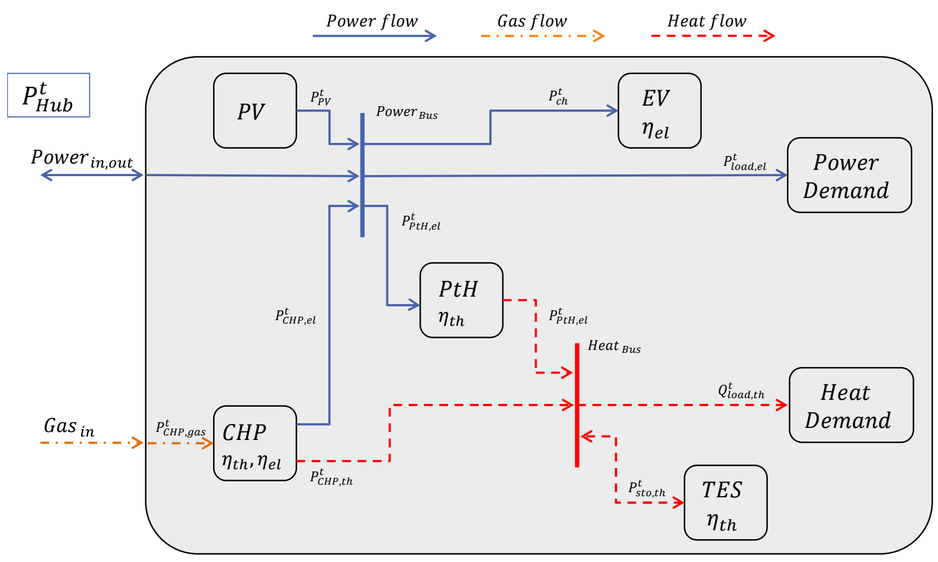
Institut für Elektroenergiesysteme und Hochspannungstechnik (IEH)

Vernetzte Energieversorgung: Eine gesamtheitliche Betrachtung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität

Martin Zimmerlin

Modellierungsansatz

- Grundlage: Energy Hub Koncept [1]
- Berücksichtigung von Strom- und Gasnetzen
- Energy Hub bestehend aus:
  - Ladestationen für Elektrofahrzeuge (EV)
  - KWK-Anlagen (CHP)
  - Thermische Speicher (TES)
  - PV-Anlagen (PV)
  - Elektrischen Spitzenlastkessel (PtH)
  - Lastverläufe
  - …



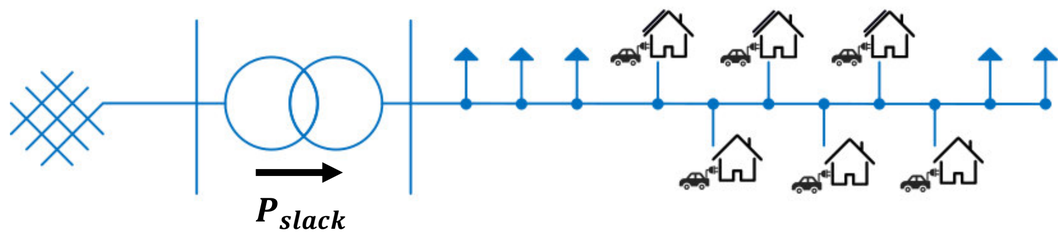
Optimierung

- Gemischt-Ganzzahliges Lineares / Quadratisches Optimierungsproblem (MILP / MIQP)
- Lineare Randbedingungen (Modelle der Komponenten und Netze)
  - (Un-)Gleichheitsbedingungen, Begrenzungen
- Zeitabhängige Randbedingungen zur optimalen Ausnutzung von Energiespeichern, Abbildung von Start- und Ausschaltzeiten (Ramping) und Vorgabe von Soll-Speicherzuständen
- Lineare (Kostenoptimierung, CO_2-Minimierung) oder quadratische Zielfunktion (Minimierung von Spitzenlasten, Regionalisierung)
- Solver: BONMIN

Anwendungsfall

Niederspannungsstrang mit:

- Sechs steuerbaren Energy Hubs
  - Hub mit KWK, PV und EV
  - Hub mit KVK und EV
- Fünf passiven Haushaltslasten (Standardlastprofil)



Optimierungsziel

Möglichst regionale Nutzung regenerativer Energie

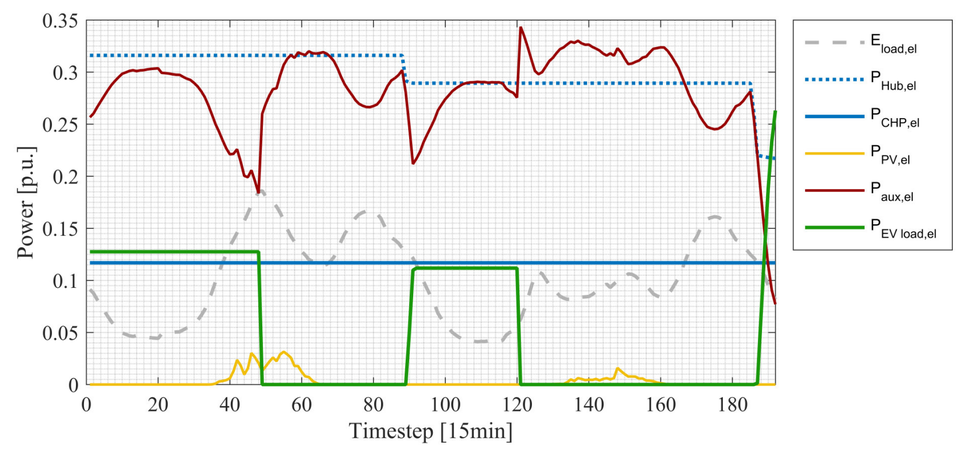
Minimierung von Spitzenlasten

→ **Minimierung von $P_{slack}{}^2$**

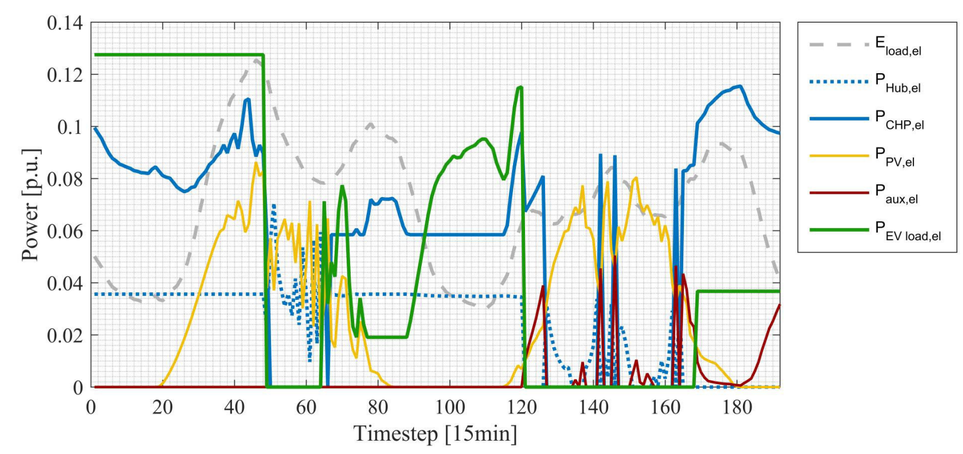
Synergiepotentiale durch sektorenübergreifende Optimierung des Energiesystems

Ergebnisse

Winter:



Sommer:



[1] M. Geidl, G. Andersson, "Optimal Power Flow of Multiple Energy Carriers", *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol. 22, 2007