

Energy System Analysis: A Systematic Review (Master thesis)

Autor: Marius Schönegege
Erstprüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing Aaron Praktiknjo
Betreuung: Lars Nolting, M. Sc.

Kurzfassung

Die globale Erwärmung und die CO₂-Emissionen sind weithin als äußerst wichtige globale Themen anerkannt. Das Pariser Abkommen trat am 4. November 2016 in Kraft und zielt darauf ab, die globale Erwärmung bis zum Jahr 2100 auf 2°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Bis heute haben 159 der 197 beteiligten Parteien das Übereinkommen unterzeichnet und ihre Bereitschaft erklärt, den Klimawandel durch massive CO₂-Reduzierung abzuwenden (UNFCCC, 2017). Infolgedessen und aufgrund der zunehmenden Wettbewerbsfähigkeit der erneuerbaren Energieressourcen (EE) sind die Investitionen in nachhaltige Energie erheblich gestiegen.

In den vergangenen 150 Jahren dienten fossile Brennstoffe als sehr kostengünstige und leistungsfähige Energiespeicher. Sie wurden für die Umwandlung von Energie in mechanische, thermische und elektrische Energie auf Abruf genutzt. Da die fossile Speicherung die erforderliche Flexibilität bot, blieb der Rest des Energiesystems überwiegend unflexibel (Connolly et al., 2016). Im Gegensatz dazu erfordert die Integration intermittierender erneuerbarer Energien eine hohe Flexibilität, und ihre unkontrollierbare Stromspeisung muss mit der Nachfrage ausgeglichen werden. Künftige Energiesysteme erfordern daher Technologien, die große Mengen an flexiblen Lasten und Kapazitäten für die Energiespeicherung bereitstellen. Mittelfristig wird erwartet, dass hochflexible fossile Kraftwerke die Energiewende erleichtern. Die Versorgung des Verkehrs- und Wärmesektors mit erneuerbaren Energien wird voraussichtlich zu einer weiteren Verringerung der CO₂-Emissionen führen. Einerseits werden für die Integration dieser Sektoren große Mengen zusätzlicher Elektrizität benötigt, andererseits bieten Wärme- und Verkehrsanlagen Möglichkeiten für einen flexiblen Betrieb, der die Integration der Sektoren erleichtern kann. Flexible Geräte müssen so gesteuert werden, dass ein kosteneffizientes Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage entsteht. Hier setzt die "Industrie 4.0" an, zu deren Anwendungen der Betrieb von Smart Grids (SG) gehört (Drath und Horch, 2014).

Es bleibt unklar, welcher Weg zu wählen ist, um den oben beschriebenen Übergang zu erleichtern. Die Kosteneffizienz spielt eine Schlüsselrolle, da ein Anstieg der Strompreise negative Auswirkungen auf die Wettbewerbsfähigkeit der Wirtschaft hat. Die Begrenzung der erforderlichen Investitionen in das Netz, die Verringerung des Bedarfs an Reservekapazitäten und die Einführung intelligenter Verfahren zu niedrigen Kosten sind nur einige der Faktoren, die den künftigen Strompreis beeinflussen dürften. Das Forschungsgebiet der Energiesystemanalyse (ESA) ist darauf ausgerichtet, Szenarien zu analysieren, um einen Weg zu den zukünftigen intelligenten Energiesystemen (SES) zu finden. Im Rahmen von Industrie 4.0 befindet sich die Entwicklung von selbstregulierenden SGs und intelligenten Zählern, die mit Endgeräten interagieren, noch im Anfangsstadium der Umsetzung, während die Flexibilitätspotenziale der Integration zahlreicher Endgeräte vielversprechend sind. Aufgrund der Dekarbonisierung sind in den letzten Jahren mehrere Einheiten im Wärme- und Verkehrssektor in den Fokus gerückt.

Die Vorteile einer intelligenten Steuerung sind jedoch von verschiedenen Faktoren technischer und wirtschaftlicher Art sowie von den Einschränkungen der Endnutzer abhängig.

Diese Arbeit befasst sich mit den sich entwickelnden Potenzialen von Industrie 4.0 im Energiesektor, wofür eine eigenständige systematische Literaturrecherche an der Schnittstelle von ESA und Industrie 4.0 durchgeführt wurde. Es wurde festgestellt, dass die aktuelle Forschung von vielen Studien profitiert, die sich auf die mangelnde Flexibilität in Energiesystemen beziehen und einen Weg zur Entwicklung von SESs aufzeigen. Mehrere Überarbeitungen konzentrieren sich auf den Betrieb und die Implementierung von SGs (Camarinha-Matos, 2016; Iqtiyanillham et al., 2017; Leiva et al., 2016; Zhou et al., 2016), während andere die Speichertechnologien gründlich untersuchen (Akinyele und Rayudu, 2014; Gallo et al., 2016; Koohi-Kamali et al., 2013; Zakeri und Syri, 2015; Zhao et al., 2015).

Ziel dieser Übersicht ist es, einen strukturierten Überblick über die Rolle der Technologien in der Diskussion über den sozialen Markt zu geben. Im Gegensatz zu den oben genannten Übersichten werden hier die folgenden beiden Hauptunterkategorien analysiert:

- Die Rolle der Sektorkopplungstechnologien bei der Bereitstellung von Flexibilität für einen SES
- Die Rolle industrieller dezentraler Energieverbraucher (Distributed Energy Prosumer, DEP) bei der Flexibilisierung eines SES, wobei der Schwerpunkt auf energieintensiven Industrien (EII) und Industrie 4.0-Prozessen liegt

Abstract

Global warming and CO₂ emissions are widely recognized as highly important global issues. The Paris Agreement came into force on November 4th, 2016 and targets to limit global warming to 2°C above pre-industrial levels by the year 2100. To date, 159 of the 197 involved parties have signed the convention and declared their willingness to avert climate change through massive CO₂ reduction (UNFCCC, 2017). As a result and due to the increasing competitiveness of Renewable Energy Resources (RES), investments in sustainable energy rose significantly.

For the past 150 years, fossil fuels served as very cheap and potent means of energy storage. They were utilized for the conversion of energy to mechanical, thermal and electrical energy on demand. As fossil storage provided the flexibility that was required, the rest of the energy system remained predominantly inflexible (Connolly et al., 2016). In contrast, the integration of intermittent RES requires high flexibility and their uncontrollable injection of electricity must be balanced with demand. Hence, future energy systems require technologies that provide large amounts of flexible loads and capacity for energy storage. On the mid-term, highly flexible fossil plants are expected to ease the energy transition. Powering the transport and heating sectors with renewable energy is expected to further decrease CO₂ emissions. On one hand, the integration of these sectors will demand vast amounts of extra electricity, while on the other, heat and transport devices offer capabilities for flexible operations that can ease the sectors' integration. Flexible devices need to be controlled in a way that cost-efficiently balances demand and supply. This is where "Industry 4.0" comes in, whose applications include the operation of Smart Grids (SG) (Drath and Horch, 2014).

It remains unclear which pathway to choose in order to ease the transition described above. Cost effectiveness plays a key role as an increase in electricity prices has negative effects on the economy's competitiveness. Limiting the required investments in the grid, reducing the

need for reserve capacity and implementing smart operations at low cost are but a few of the factors which are expected to influence the future price of electricity. The research field of Energy System Analysis (ESA) is set to analyze scenarios in finding a pathway towards the prospective Smart Energy Systems (SES). Within Industry 4.0, the development of self-regulating SGs and smart meters that interact with end-user devices is still in the early stages of implementation, while the flexibility potentials of integrating numerous end devices are highly promising. Due to decarbonization, several units within the heat and transport sector came into focus during the past years. However, the benefits of smart control are dependent on various factors of a technical and economical nature, as well as on end-user restrictions.

This thesis addresses the evolving potentials of Industry 4.0 within the energy sector, in view of which a standalone systematic literature review was conducted on the interface of ESA and Industry 4.0. It has been found, that current research profits from many studies that refer to the lack of flexibility in energy systems and which draw a pathway towards developing SESs. Several reviews focus on the operation and implementation of SGs (Camarinha-Matos, 2016; Iqtiyanillham et al., 2017; Leiva et al., 2016; Zhou et al., 2016), while others rigorously review storage technologies (Akinyele and Rayudu, 2014; Gallo et al., 2016; Koochi-Kamali et al., 2013; Zakeri and Syri, 2015; Zhao et al., 2015).

The purpose of this review is to provide a structured overview of the role of technologies in the discussion of SESs. In contrast to the above-mentioned reviews it analyzes the following two main subcategories:

- The role of sector-coupling technologies in providing flexibility to an SES
- The role of industrial Distributed Energy Prosumers (DEP) in providing flexibility to an SES, with a focus on Energy Intensive Industries (EII) and Industry 4.0 processes