

Vergleich verschiedener Formulierungen des Unit  
Commitment Problem bezüglich der Einspeisung  
erneuerbarer Energien

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B. Sc.)“ im Studiengang  
Wirtschaftsingenieur der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für  
Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität  
Hannover

vorgelegt von

Name: Köhler  
[REDACTED] [REDACTED]

Vorname: Ruven  
[REDACTED] [REDACTED]

Prüfer: Prof. Dr. M. H. Breitner

Hannover, den

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>iv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Relevanz . . . . .	2
1.2 Motivation . . . . .	2
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Arten von Modellformulierungen des Unit Commitment Problem</b>	<b>4</b>
2.1 Unterscheidung anhand der Umgebung . . . . .	4
2.2 Grudlegende Bausteine der Modelle . . . . .	4
2.3 Methoden zum Lösen des Unit Commitment Problem . . . . .	6
2.3.1 Exhaustive Enumeration / Brute-Force-Methode . . . . .	6
2.3.2 Priority Listing . . . . .	7
2.3.3 Dynamic Programming . . . . .	7
2.3.4 Mixed Integer Linear Programming (MILP) . . . . .	7
2.3.5 Branch and Bound . . . . .	8
2.3.6 Lagrangian Relaxation . . . . .	8
2.3.7 Tabu-Suche . . . . .	8
2.3.8 Simulated Annealing . . . . .	8
2.3.9 Expert Systems . . . . .	10
2.3.10 Fuzzy Systems . . . . .	10
2.3.11 Artificial Neural Networks . . . . .	10
2.3.12 Genetic and Evolutionary Algorithms . . . . .	10
2.3.13 Ant Colony Search Algorithm . . . . .	11
2.3.14 Shuffled Frog Leaping Algorithm . . . . .	11
<b>3 Kraftwerksüberblick</b>	<b>12</b>
3.1 Konventionelle Kraftwerke . . . . .	12
3.1.1 Kohlekraftwerke: Braunkohle und Steinkohle . . . . .	12
3.1.2 Gaskraftwerke . . . . .	14
3.1.3 Atomkraftwerke . . . . .	15
3.2 Erneuerbare Energien . . . . .	16
3.2.1 Windenergie onshore . . . . .	16
3.2.2 Windenergie offshore . . . . .	18
3.2.3 Photovoltaik . . . . .	19
3.2.4 Biomasse . . . . .	21
3.2.5 Wasserkraft . . . . .	21

<b>4</b>	<b>Vorstellung der Modelle</b>	<b>25</b>
4.1	Neu-Formulierung NF . . . . .	25
4.2	Wind-Energie-Vorhersage-Modell WFP-UC . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>37</b>
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>40</b>

# 1 Einleitung

Am 4. November 2016 trat das Pariser Klimaübereinkommen in Kraft. Ziel dieser Vereinbarung ist es, die Erderwärmung mindestens auf unter 2 °C im Vergleich zum vorindustriellen Temperaturniveau zu begrenzen, wenn möglich sogar auf 1,5 °C.<sup>1</sup>

EU-weit soll dieses Ziel durch Senkung der Treibhausgasemissionen um 80 bis 95 Prozent gegenüber dem Jahr 1990 erreicht werden.<sup>2</sup> Die hierzu nötigen Veränderungen im Zuge der Energiewende beziehen sich neben den Bereichen Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Industrie vor allem auf den Energiesektor. Mit Energiewende im Energiesektor ist der Übergang von einer durch Atomkraft und fossile Brennstoffe charakterisierten hin zu einer von erneuerbaren Energien dominierten Energieversorgung gemeint. Das erklärte Ziel Deutschlands für 2050 ist ein Anteil von mindestens 80 Prozent des Bruttostromverbrauchs aus der Nutzung erneuerbarer Energien in der Stromerzeugung. Die Zwischenziele bis dahin sind folgende: 35% bis 2020, 50% bis 2030 und 65% bis 2040 (Stand 2016: 31,6%).<sup>3</sup>

Den größten Anteil erneuerbarer Energien in Deutschland machen zurzeit vor allem onshore-Windenergieanlagen (WEA) und Photovoltaik (PV) aus. Weitere Beiträge liefern offshore-WEA, Laufwasserkraftwerke sowie die Nutzung von Biomasse.

International gesehen leistet die Wasserkraft den größten Anteil an erneuerbaren Energien. Zudem spielt die Geothermie eine weitaus wichtigere Rolle als in Deutschland.

Die im Zuge der bereits angesprochenen Energiewende wegfallenden Stromerzeugungsmöglichkeiten durch Atomkraftwerke sowie Braun- und Steinkohlekraftwerke müssen selbstverständlich durch den Zubau erneuerbarer Energien ersetzt werden, damit der Strombedarf auch in Zukunft weiterhin gedeckt ist.

Genau dies, die Erfüllung der Stromnachfrage durch die Erstellung eines möglichst optimalen Kraftwerkseinsatzplans, wird beschrieben durch ein mathematisches Optimierungsproblem, dem sogenannten Unit Commitment Problem (UCP).

Optimal kann hierbei unterschiedliche Bedeutungen haben, je nachdem welchem spezifischen Ziel sich das jeweilige Modell widmet. Bspw. könnte ein Modell einen kostenminimierenden Kraftwerkseinsatzplan verwirklichen wollen, ein anderes Modell hingegen versucht unter der Zielsetzung der Gewinnmaximierung einen nachfragedeckenden Einsatzplan zu generieren.

Die unterschiedlichen Arten und Herangehensweisen zur Lösung des UCP werden später noch genauer betrachtet.

---

<sup>1</sup>bmud, Klimaschutzplan 2050, S.6

<sup>2</sup>bmud, Klimaschutzplan 2050, S.23

<sup>3</sup>Bundesregierung, Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Neuauflage 2016 [Stand: 30.5.2017], S.121

An der Erstellung und Optimierung solcher Modelle wird bereits seit mehr als 45 Jahren geforscht.<sup>4</sup> Einerseits wird versucht, die bereits bestehenden Modelle realistischer zu gestalten, indem mehr und mehr Restriktionen Einzug erhalten. Andererseits ist das Ziel, das Modell so zu vereinfachen, dass notwendige Rechnerleistung reduzieren werden kann, damit es in angemessener Zeit möglichst optimale Ergebnisse liefert. Aufgrund der bereits angesprochenen Transformation des Energiesektors im Zuge der Energiewende und der damit einhergehenden Änderung des Kraftwerksparks, ändern sich auch die Anforderungen an die UC-Modelle. Wie oben bereits erwähnt, wird ein Großteil der erneuerbaren Energien aus Sonnen- und Windenergie gewonnen. Der große Nachteil dieser beiden Energieformen besteht darin, dass sie nicht über die Zeit konstant zur Verfügung stehen. Die Stromerzeugung aus Sonnenenergie ist stark zeitabhängig, d.h. tagsüber stärker als nachts und im Sommer stärker als im Winter. Der Wind unterliegt noch stärkeren Schwankungen, da Windgeschwindigkeiten innerhalb kürzester Zeit stark variieren können. Mit diesen starken Variationen muss ein zukünftiges Modell zur Kraftwerkseinsatzplanung umgehen können.

## 1.1 Relevanz

Die Deckung der Stromnachfrage ist gerade unter Berücksichtigung des zunehmenden Anteils an Strom aus erneuerbaren Energien eine große Herausforderung für die Kraftwerkseinsatzplanung. Um diese zu meistern, werden Modelle benötigt, die einerseits versuchen, die Realität möglichst genau abzubilden und andererseits Lösungen innerhalb angemessener Zeit präsentieren können. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher untersucht werden, inwieweit bestehende UC-Modelle die an sie durch die zunehmende Einspeisung volatiler erneuerbarer Energien wie Wind und Sonne gestellten Anforderungen erfüllen.

## 1.2 Motivation

Um einen weitreichenden Einblick in die Vielfalt der Modelle zur Kraftwerkseinsatzplanung zu bekommen, ist das Ziel dieser Arbeit die Vorstellung unterschiedlicher Modelle, die versuchen, das Unit Commitment Problem abzubilden. Die Abhängigkeit von vielen Faktoren wie z.B. die limitierenden Eigenschaften bestimmter Kraftwerke oder aber auch die Berücksichtigung elektrischer Energienetze und deren Verluste erhöhen hierbei die Komplexität des Problems. Ein weiterer zu nennender Punkt ist die Modellierung von Unsicherheiten. Last-Schwankungen treten meist plötzlich und aus unterschied-

---

<sup>4</sup>Padhy NP., (2004), S.1196

lichsten Gründen auf. Seien es Kraftwerksausfälle, Unwetter, wegfallende Verbraucherlasten oder aber die schwankende Einspeisung erneuerbarer Energien. Durch letztere ist in den letzten Jahren noch ein weiterer Unsicherheitsfaktor zum Problem der optimalen Kraftwerkseinsatzplanung geworden. Die Frage, der sich diese Arbeit widmet, lässt sich folgendermaßen formulieren:

Eignen sich die bestehenden Modelle zur Kraftwerkseinsatzplanung auch für die Zukunft mit weiter wachsendem Anteil erneuerbarer Energien ?

### **1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit**

In Kapitel zwei werden zunächst die unterschiedlichen Ansätze und Lösungsmechanismen des Unit Commitment Problem vorgestellt. Daran anschließend werden anhand des deutschen Kraftwerksparks eine Reihe von Kraftwerkskennzahlen und deren typische Größen erläutert, die zum Verständnis der im vierten Kapitel vorgestellten Modelle unabdingbar sind. Zudem wird in Abschnitt 3 verstärkt auf die Entwicklung der erneuerbaren Energien und der hierdurch hervorgerufenen Transformation des Kraftwerksparks in Deutschland eingegangen. Nach Vergegenwärtigung der aktuellen Situation wird im fünften Kapitel der Vergleich zweier interessanter Modelle im Hinblick auf die Berücksichtigung erneuerbarer Energien vorgenommen.

## 6 Fazit

Als Fazit lässt sich festhalten, dass es durchaus gute Ansätze bei der Lösung des Unit Commitment Problem gibt, allerdings gibt es stets Verbesserungsmöglichkeiten, die es gilt zu suchen und zu implementieren. Dies könnte Forschungsgegenstand zukünftiger Arbeiten im Bereich des Unit Commitment sein. Besonders die zuverlässige Windenergie-Vorhersage dürfte in Deutschland von großem Interesse sein, angesichts der in dieser Arbeit gezeigten Entwicklungen der erneuerbaren Energien.