

Anes Benzarti

Ein Beitrag zur Flexibilitäts- bereitstellung durch thermische Lasten unter Netz- und Systemrestriktionen

Band 11

Ein Beitrag zur Flexibilitätsbereitstellung durch thermische Lasten unter Netz- und Systemrestriktionen

vom

Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Kaiserslautern
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

M. Sc. Anes Benzarti
geb. in Offenbach am Main

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2020

Dekan des Fachbereichs: Prof. Dr.-Ing. Ralph Urbansky

Prüfungskommission:

Vorsitzende: Prof. Dr. Ping Zhang

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellföw

2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen

D386

Forschungsberichte des Lehrstuhls für Energiesysteme und
Energiemanagement

Band 11

Anes Benzarti

**Ein Beitrag zur Flexibilitätsbereitstellung durch
thermische Lasten unter Netz- und Systemrestriktionen**

D 386 (Diss. Technische Universität Kaiserslautern)

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kaiserslautern, TU, Diss., 2020

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7836-7

ISSN 2366-4967

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Für meine Eltern.
Pour mes parents.
For my parents.
إلى والدي.

„Man soll die Dinge so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher.“

A. Einstein

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement der Technischen Universität Kaiserslautern. Ich möchte allen danken, die mich während sowie bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram H. Wellßow, der an mich glaubte und es mir ermöglichte an seinem Lehrstuhl zu promovieren. Für die Freiheit, die er mir bei der Themenwahl und der Gestaltung meiner Arbeit eingeräumt hat, bin ich sehr dankbar. Seine zahlreichen Anregungen und seine scharfsinnigen Kommentare haben zum Gelingen dieser Arbeit geführt. Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen danke ich für das Interesse an der Thematik und die freundliche Übernahme des Koreferates. Weiterhin danke ich der Vorsitzenden der Promotionskommission, Frau Prof. Dr. Ping Zhang.

Den jetzigen und ehemaligen Lehrstuhlkollegen möchte ich ebenfalls meinen Dank aussprechen für die stete Unterstützung, die regen Diskussionen und das freundliche Arbeitsklima. Insbesondere möchte ich mich bei meinem ehemaligen Bürokollegen, Herr Dr.-Ing. Stephan Röhrenbeck, bedanken, der mich von Anfang an unterstützt hat und mit dem ich mich stundenlang austauschen konnte. Des Weiteren gilt mein Dank meinen Studenten, die mich während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter unterstützt haben. Meiner ehemaligen DLR-Kollegin Frau Dr.-Ing. Nadine Kaczmarkiewicz danke ich für den regen Austausch während des Entstehens dieser Arbeit.

Die Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen von zwei Forschungsprojekten: *ThermSpe4EE*, ein durch das BMWi gefördertes Verbundprojekt und *PtH4GR²ID*, ein durch den EFRE gefördertes EU-Projekt. Hiermit bedanke ich mich bei den Fördergebern und bei den Konsortialmitgliedern für die gute Zusammenarbeit im Rahmen der Projekte.

Nicht zuletzt gebührt ein besonderer Dank allen Familienmitgliedern und Freunden, die mir während meiner Zeit in Kaiserslautern zur Seite standen.

Kaiserslautern, 11. Oktober 2020

Anes Benzarti

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Motivation | 1 |
| 1.2 | Existierende Analyseansätze | 2 |
| 1.3 | Ziel und Aufbau der Arbeit | 3 |
| 2 | Rahmenbedingungen und Wende im europäischen Elektrizitätssystem | 5 |
| 2.1 | Historische Entwicklung | 5 |
| 2.2 | Aktuelle und zukünftige Situation in den Verteilnetzen | 6 |
| 2.2.1 | Paradigmenwechsel | 6 |
| 2.2.2 | Netzplanung und Netzführung von Niederspannungsnetzen | 8 |
| 2.2.3 | Herausforderungen der Wärmepumpenintegration | 11 |
| 2.3 | Strommarktorganisation | 12 |
| 2.3.1 | Strommarktdesign | 12 |
| 2.3.2 | Strompreise im europäischen Vergleich | 13 |
| 2.3.2.1 | Endkundenstrompreis | 13 |
| 2.3.2.2 | Börsenstrompreis | 14 |
| 2.4 | Flexibilitätsbereitstellung | 16 |
| 2.4.1 | Flexibilitätsoptionen | 16 |
| 2.4.2 | Lastmanagement als Flexibilitätsoption | 17 |
| 2.4.3 | Zeitvariable Stromtarife als Flexibilitätssignal | 18 |
| 2.5 | Resümee | 20 |
| 3 | Grundlagen zur Regelung von Wärmepumpen | 21 |
| 3.1 | Einführung | 21 |
| 3.2 | Marktpotenzial der Wärmepumpentechnologie in Europa | 21 |
| 3.3 | Wärmepumpen in der Gebäudeheiztechnik | 23 |
| 3.3.1 | Bestandteile eines Heizsystems | 23 |
| 3.3.2 | Klassifizierung von Wärmepumpen | 23 |
| 3.3.3 | Funktionsprinzip der Wärmepumpe | 24 |
| 3.3.4 | Wärmespeicher in der Gebäudeapplikation | 25 |
| 3.3.4.1 | Charakterisierung | 25 |
| 3.3.4.2 | Kostenanalyse | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.3.4.3 | Kombination mit Wärmepumpen | 28 |
| 3.4 | Stand der Technik der Wärmepumpenregelung | 30 |
| 3.5 | Fazit | 31 |
| 4 | Reglerentwicklung | 33 |
| 4.1 | Systemkonzeption | 33 |
| 4.1.1 | Einordnung der Regelstrategie | 33 |
| 4.1.2 | Analyse der Problemstruktur | 34 |
| 4.1.2.1 | Regelziele | 34 |
| 4.1.2.2 | Entscheidungsvariablen | 36 |
| 4.1.2.3 | Besonderheiten der Problemstruktur | 37 |
| 4.1.3 | Grundsätzliche Regelungskonzepte | 39 |
| 4.1.4 | Adaptive modellprädiktive Regelung | 40 |
| 4.1.4.1 | Theoretische Einführung | 40 |
| 4.1.4.2 | Funktionalitäten | 41 |
| 4.1.4.3 | Bestandteile | 42 |
| 4.1.5 | Konzeptübersicht | 43 |
| 4.2 | Modellbildung | 43 |
| 4.2.1 | Übersicht | 43 |
| 4.2.2 | Gebäude- und Heizsystemmodellierung | 44 |
| 4.2.2.1 | Modellklassen | 44 |
| 4.2.2.2 | Gebäude | 46 |
| 4.2.2.3 | Speicher | 49 |
| 4.2.2.4 | Wärmepumpe | 51 |
| 4.2.3 | Stromnetzmodellierung | 53 |
| 4.2.4 | Last- und Erzeugungsmmodellierung | 54 |
| 4.2.4.1 | Haushaltslasten | 54 |
| 4.2.4.2 | Elektroautos | 54 |
| 4.2.4.3 | Wärmepumpen | 54 |
| 4.2.4.4 | Photovoltaik | 55 |
| 4.2.4.5 | Annahmen und Szenarien | 55 |
| 4.2.5 | Strommarktmodellierung | 55 |
| 4.3 | Optimierungsverfahren | 56 |
| 4.3.1 | Anforderungen der Problemstruktur und Lösungsansatz | 56 |
| 4.3.1.1 | Problembeschreibung | 56 |
| 4.3.1.2 | Problemformulierung und allgemeiner Lösungsansatz | 58 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2 | Existierende Lösungsverfahren | 61 |
| 4.3.2.1 | Exakte Verfahren | 61 |
| 4.3.2.2 | Suboptimale Verfahren | 61 |
| 4.3.3 | Verfahrensauswahl | 61 |
| 4.4 | Implementierung | 62 |
| 4.4.1 | Zeitliche Auflösung | 62 |
| 4.4.1.1 | Abtastzeit | 62 |
| 4.4.1.2 | Prädiktionshorizont | 62 |
| 4.4.1.3 | Steuerhorizont | 62 |
| 4.4.2 | Statussignale | 64 |
| 4.4.2.1 | Übersicht | 64 |
| 4.4.2.2 | Marktsignal | 64 |
| 4.4.2.3 | Strompreissignal | 67 |
| 4.4.2.4 | Netzsignal | 69 |
| 4.4.2.5 | Speichersignal | 76 |
| 4.4.3 | Regelungsverfahren | 78 |
| 4.4.3.1 | Basismethode zur Ermittlung des Steuersignales | 78 |
| 4.4.3.2 | Angewendete Verfahren | 80 |
| 4.4.3.3 | Rollierende Planung und Modelladaption | 89 |
| 5 | Bewertung des Regelungskonzeptes | 93 |
| 5.1 | Allgemeine Bewertung | 93 |
| 5.1.1 | Untersuchungsansatz | 93 |
| 5.1.2 | Bewertungskriterien | 94 |
| 5.1.3 | Erfüllung der Zielsetzung | 96 |
| 5.1.3.1 | Restriktionseinhaltung | 96 |
| 5.1.3.2 | Zielfunktionserfüllung | 100 |
| 5.1.4 | Gegenüberstellung zur Referenzregelung | 101 |
| 5.1.5 | Sensitivitätsanalysen | 105 |
| 5.1.5.1 | Variation der Speicherkapazität | 105 |
| 5.1.5.2 | Variation der Tarifstruktur | 113 |
| 5.1.5.3 | Variation des Gebäudetyps | 115 |
| 5.2 | Vergleich verschiedener Zielsetzungen | 116 |
| 5.2.1 | Untersuchungsgegenstand | 116 |
| 5.2.2 | Einfache Zielsetzung | 117 |
| 5.2.3 | Mehrfache Zielsetzung | 123 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 5.2.4 | Konventionelle Zielsetzung | 124 |
| 5.3 | Zielerreichung | 125 |
| 5.3.1 | Untersuchungsszenarien | 125 |
| 5.3.2 | Wirtschaftlichkeit | 126 |
| 5.3.3 | Netzentlastung | 128 |
| 5.3.4 | Systembilanzierung | 132 |
| 6 | Zusammenfassung | 135 |
| 6.1 | Resümee | 135 |
| 6.2 | Schlussfolgerungen und Diskussion | 137 |
| 6.3 | Ausblick | 138 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 139 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis | 153 |
| 9 | Tabellenverzeichnis | 157 |
| 10 | Abkürzungsverzeichnis | 159 |
| 11 | Verzeichnis der Formelzeichen und Indizes | 161 |
| 12 | Anhang | 165 |
| 12.1 | Kostenvergleich von Batterie- und Wärmespeichern | 165 |
| 12.2 | Heizkennlinie | 166 |
| 12.3 | Modellspezifische Daten | 167 |
| 12.3.1 | Gebäude | 167 |
| 12.3.2 | Speicher | 168 |
| 12.3.3 | Wärmepumpe | 168 |
| 12.4 | Szenarienübersicht | 169 |
| 12.5 | Erläuterungen zur Netzsignalerstellung | 169 |
| 12.6 | Gruppierung des Steuersignales | 170 |
| 12.7 | Übersicht der Simulationskonfigurationen | 170 |
| 12.8 | Berechnung der Gesamtstromkosten | 171 |
| 12.9 | Zielerreichung in Zahlen | 174 |
| 13 | Veröffentlichungen und betreute Arbeiten | 175 |
| 13.1 | Publikationen | 175 |

| | |
|---|------------|
| 13.2 Studentische Arbeiten | 176 |
| 14 Extended Abstract | 179 |
| 14.1 Introduction | 179 |
| 14.2 Framework and turnarounds in the European electricity system | 180 |
| 14.3 Basics of heat pump control | 180 |
| 14.4 Control concept for electric driven heat pumps | 181 |
| 14.5 Evaluation of the control concept | 184 |
| 14.6 Summary and outlook | 185 |
| 15 Lebenslauf | 187 |