Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Tobias Kull

Untersuchung feldtauglicher optimaler Betriebsstrategien für gewerbliche Energiesysteme unter Verwendung ökonomischer modellprädiktiver Regelung

Band 37

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Untersuchung feldtauglicher optimaler Betriebsstrategien für gewerbliche Energiesysteme unter Verwendung ökonomischer modellprädiktiver Regelung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften
der Universität Bayreuth
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von
Tobias Kull, M. Sc.
aus
Immenstadt i. Allgäu

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer
Zweitgutachter:	Prof. Dr. techn. Leonhard Reindl
Tag der mündlichen Prüfung:	04.04.2022

Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik
Universität Bayreuth
2022

Bayreuther Beiträge zur Sensorik und Messtechnik

Band 37

Tobias Kull

Untersuchung feldtauglicher optimaler Betriebsstrategien für gewerbliche Energiesysteme unter Verwendung ökonomischer modellprädiktiver Regelung

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8767-3
ISSN 1862-9466

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

Vorwort der Herausgeber

Prinzipiell eignet sich zur automatisierten Betriebsführung von lokalen Energiesystemen die auf mathematischer Optimierung basierende ökonomische modellprädiktive Regelung (EMPC). Dabei werden aktuelle Messwerte von Stromverbrauch, Stromerzeugung und Preisen mit Prognosen der für die nähere Zukunft erwarteten Werte verknüpft und daraus Stellbefehle abgeleitet. Die Notwendigkeit der umfangreichen mathematischen Modellierung des Energiesystems macht den Ansatz im Feld jedoch aufwändig und womöglich ökonomisch untragbar. Die vorliegende Arbeit beschreibt, wie eine EMPC unter den Ressourcenbeschränkungen feldtypischer Hard- und Software eingesetzt werden kann, wie sie sich vorab testen lässt und inwieweit sie den Energiesystembetrieb verbessert. Hierzu wird ein Vorgehen mit komplexitätsreduzierter Modellierung und aufwandsarmem Inbetriebnahmekonzept entwickelt. Damit wird eine lineare EMPC auf Feldgeräten – speicherprogrammierbaren Steuerungen und Edge Computer – zum Einsatz in kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) und gewerblichen Energiesystemen implementiert. Eine generalisierte Implementierung erlaubt die Anwendung auf eine größere Klasse von Energiesystemen.

Aus Sicherheitsgründen kann man die Leittechnik für ein Energiesystem nicht einfach in der Realumgebung testen. Daher wurde die implementierte EMPC in das virtuelle Abbild eines existierenden Energiesystems mit PV-Anlagen, Batteriespeicher, Elektrofahrzeug und industriellen Verbrauchern eingefügt (Hardware-in-the-loop-Prüfstand mit digitalen Zwillingen der Energiesystemkomponenten und Feldbuskommunikation). Es konnte demonstriert werden, dass auch mit feldtypischen Unsicherheiten, etwa bei der prognostizierten PV-Leistung, ein Großteil der theoretisch möglichen betriebswirtschaftlichen Einsparungen erreicht wird. Zudem konnten die aus dem Netz bezogene Energie, der Anteil fossiler Energien im Stromverbrauch und damit CO2-Emissionen verringert werden. Analog lassen sich auch die technoökonomischen Auswirkungen zukünftiger Strompreisszenarien oder Dimensionierungsvarianten bei PV-Anlagen, Elektrofahrzeugen u. ä. bewerten. Dies kann dazu beitragen, die Flexibilität von Energiesystemen in KMUs und kommunalen Anlagen zu erhöhen.

In der Arbeit werden die Grenzen der praktischen Anwendbarkeit aufgezeigt, sodass sich Ansätze für weitere Forschung identifizieren lassen.

Bayreuth im August 2022
Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer, Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Menschen, die mich bei der Anfertigung meiner Dissertation unterstützt haben, meinen Dank aussprechen.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik der Universität Bayreuth. Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer für die hervorragende Betreuung. Mein Dank gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl, die zu einer produktiven Arbeitsatmosphäre beigetragen haben und immer interessiert an fachlichen Diskussionen waren. Insbesondere möchte ich Luca Bifano für die angenehme Büropartnerschaft danken. Ich danke auch den von mir betreuten Studierenden Tobias Tietze, Markus Beck, Anna Walter, Niels Gensmer und David Hax, deren Arbeit wertvolle Anregungen für diese Dissertation lieferte.

Ich danke Professor Dr. techn. Leonhard Reindl für die Erstellung des Zweitgutachtens.

Weiter danke ich Bernd Zeilmann und seinen Kollegen von Richter R&W Steuerungstechnik GmbH, mit denen ich innerhalb zweier ZIM-Kooperationsprojekte vier Jahre lang sehr lösungsorientiert und motiviert zusammenarbeiten konnte. Außerdem danke ich Bernd Wunder, Kilian Gosses und Julian Kaiser von Fraunhofer IISB für die Zusammenarbeit. Ich möchte Charlotte Ramsteck für die hervorragende organisatorische Zusammenarbeit in den Projekten danken. Mein Dank gilt auch Bernd Schröder und seinen Kollegen von Wago Steuerungstechnik GmbH für die großartige Unterstützung bei Hard- und Software im SPS-Bereich.

Zu guter Letzt danke ich meiner Familie und allen meinen Freunden für die Unterstützung und Zusprüche während der Arbeit an dieser Dissertation.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis **IX**

1 Einleitung, Stand der Technik und Zielsetzung **1**
1.1 Einleitung . . . 1
1.2 Stand der Technik . . . 3
1.2.1 Definitionen . . . 3
1.2.2 Betriebsstrategien für PEI . . . 4
1.2.3 Technologiereifegrad und Forschungslücken . . . 6
1.2.4 Ansätze zur beschleunigten Feldimplementierung von MPC . . . 9
1.3 Forschungsgegenstand und Hypothese . . . 11
1.4 Aufbau der Arbeit . . . 12

2 Theoretische Grundlagen der Energiesystemoptimierung **15**
2.1 Technische, ökonomische, regulatorische Rahmenbedingungen . . . 15
2.1.1 Energiemarkt . . . 15
2.1.2 Intelligentes Messsystem und Tarife . . . 16
2.1.3 Speicherbetrieb . . . 18
2.2 Lineare Optimierung . . . 19
2.2.1 Definitionen und Notation . . . 19
2.2.2 Lösungsverfahren für LP und MILP . . . 21
2.2.3 Implementierungen von Lösungsverfahren . . . 22
2.3 Modellprädiktive Regelung . . . 25
2.4 Zuverlässigkeit eingebetteter MPC . . . 27
2.4.1 Sicherheit und Schutz . . . 27
2.4.2 Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit . . . 28
2.4.3 Aufweichen von Nebenbedingungen . . . 29
2.4.4 Hardware-in-the-Loop-Tests . . . 30
2.5 Vorhersagen von Photovoltaikleistung . . . 32
2.5.1 Klassifizierung der Vorhersagen . . . 32
2.5.2 Datenquellen . . . 34

3 Modellbildung des Energiesystems **35**
3.1 Grundsätzliche Anforderungen an die Modellierung . . . 35
3.2 Systemarchitektur des Regelungsmodells und dargestellte Geräte . . . 37
3.3 Regelungsmodell für ein Grundsystem . . . 38
3.4 Generalisiertes Systemmodell . . . 44
3.4.1 Charakteristika der Komponenten bei mehrfachem Vorkommen . . . 45
3.4.2 Systemmodell . . . 47
3.5 Physikalisches Modell der PV zu Vorhersagezwecken . . . 52

4 Implementierung der Regelung auf Feldgeräten 55
4.1 Vorhersagen . . . 55
4.1.1 Vorhersage der PV-Leistung . . . 55
4.1.1.1 Implementierung der physikalischen Modellierung . . . 55
4.1.1.2 Messungen . . . 58
4.1.2 Vorhersage der Strompreise . . . 59
4.1.3 Vorhersage der Verbraucherleistung . . . 61
4.2 Analyse historischer Strompreise . . . 62
4.3 Implementierung der ökonomischen MPC . . . 63
4.3.1 Hardware und Schnittstellen . . . 63
4.3.2 Grundsystem . . . 67
4.3.3 Generalisiertes Systemmodell . . . 69
4.3.3.1 Programmiertechnische Umsetzung auf der SPS . . . 69
4.3.3.2 Programmiertechnische Umsetzung im EC . . . 70
4.4 Implementierung der HiL-Simulation . . . 71
4.5 IT-Sicherheitskonzept . . . 76
4.6 Szenarien für die HiL-Simulation mit dem Grundsystem . . . 78
4.6.1 Szenario 1 . . . 78
4.6.2 Szenario 2 . . . 79
4.7 Szenario für die HiL-Simulation mit dem generalisierten Regelungsmodell . . . 79
4.8 Erweiterungen um ganzzahlige Variablen . . . 80

5 Ergebnisse und Diskussion 83
5.1 Vorhersagen . . . 83
5.1.1 Leistungsvorhersagen Photovoltaik . . . 83
5.1.2 Preisanalyse und Preisvorhersage . . . 87
5.1.3 Vorhersagequalität der PV- und Verbraucherleistung in den Szenarien 91
5.2 Benchmarks . . . 92
5.3 HiL-Auswertungen . . . 94
5.3.1 Grundsystem . . . 95
5.3.1.1 Verifizierung des Reglermodells . . . 95
5.3.1.2 Auswirkungen der Regelung auf das Betriebsverhalten . . . 95
5.3.2 Generalisiertes System . . . 100
5.4 Abschließende Bewertung . . . 105

6 Zusammenfassung und Ausblick 111
6.1 Zusammenfassung . . . 111
6.2 Ausblick . . . 113
6.3 Summary . . . 114
6.4 Outlook . . . 116

Literatur 117

Eigene Publikationen 128