



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Thomas Weber

Betriebsoptimierung industrieller Kälte- und Wärmeversorgungssysteme über mathematische Programmierung

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold



Institut für
Produktionsmanagement,
Technologie und
Werkzeugmaschinen

Betriebsoptimierung industrieller Kälte- und Wärmeversorgungssysteme über mathematische Programmierung

Am Fachbereich Maschinenbau

an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigt

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Thomas Weber, M.Sc.

aus Aschaffenburg

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht

Tag der Einreichung: 16.08.2022

Tag der mündlichen Prüfung: 08.11.2022

Darmstadt 2022

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Thomas Weber

**Betriebsoptimierung industrieller Kälte- und
Wärmeversorgungssysteme über mathematische
Programmierung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2023

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2023

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8939-4

ISSN 1864-2179

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 des Herausgebers

Die anthropogenen Auswirkungen auf die Umwelt sowie die daraus resultierenden klimatischen Veränderungen sind die bestimmenden Probleme unserer Zeit. Besonders energieversorgungsbedingte Treibhausgasemissionen stehen im Zentrum der Debatte. Um den Klimawandel möglichst zu begrenzen, werden Unternehmen auch durch monetäre Anreize zu mehr Energieeffizienz in der Produktion gedrängt. Eine Möglichkeit die energiebedingten Kosten in Unternehmen kurzfristig zu senken, ist die Optimierung des Betriebs energetisch relevanter Maschinen und Anlagen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Methodik zur Erstellung und Anwendung mathematischer Programmierung zur Betriebsoptimierung industrieller Wärme- und Kälteversorgungssysteme sowie ein Framework zur standardisierten Modellierung ebendieser Energiesysteme vorgestellt. Die Methodik, welche an das CRISP-ML Prozessmodell angelehnt ist, gliedert sich in fünf Phasen und wird im Rahmen der Arbeit anhand von drei Referenzsystemen validiert. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf der Anwendbarkeit der Verfahren in der industriellen Fertigung. So werden anhand der drei Referenzsysteme eine Reihe von Problemen im Zusammenhang mit der Anwendbarkeit mathematischer Optimierungsmodelle und daraus resultierender Anforderungen definiert, welche durch ein Verfahren zur Betriebsoptimierung zu erfüllen sind. Zudem werden die konkreten monetären Einsparpotentiale, welche durch den Einsatz der mathematischen Programmierung zur Betriebsoptimierung erzielt werden können, unter realitätsnahen Bedingungen quantifiziert. In diesem Zusammenhang wird insbesondere auf Auswirkungen von Modellierungsfehlern auf die Optimierungsperformanz eingegangen.

Darmstadt, 07.12.2022

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Vorwort des Autors

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Forschungsgruppe ETA (Energietechnologien und Anwendungen in der Produktion) am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt. Ich habe in dieser Zeit viel gelernt, erlebt und mich persönlich weiterentwickelt. Deshalb möchte ich zuerst Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold für die Betreuung meiner Doktorarbeit und die vielen Chancen und Freiheiten danken, die uns wissenschaftlichen Mitarbeitern am Institut ermöglicht wurden. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Rinderknecht für die Übernahme des Koreferats und das inhaltlich wertvolle Feedback zu meiner Arbeit.

Während der letzten Jahre in der ETA-Fabrik habe ich mit vielen tollen Kollegen und Kolleginnen zusammenarbeiten dürfen. Euch allen herzlichen Dank für die sehr gute Zusammenarbeit, die inspirierenden Diskussionen und die viele Unterstützung in unterschiedlichsten Belangen. Es war mir eine große Freude mit einer so hochmotivierten Truppe an den Problemen der Zeit zu arbeiten! Besonderer Dank an Dr. Vincent Klär, Heiko Ranzau und Pia Hannappel für das Korrekturlesen meiner Arbeit sowie die Unterstützung bei der Nutzung der Simulationsmodelle.

Insbesondere in Zeiten von Corona wäre das Arbeiten am Institut und damit das Erstellen der vorliegenden Arbeit nicht ohne die Unterstützung durch das Support Team möglich gewesen, weshalb ich mich auch hier für die Unterstützung bedanken möchte. Weiterhin danke ich allen Projektpartnern und Projektpartnerinnen sowie den großartigen Kollegen von etalytics mit denen ich in den letzten Jahren zusammenarbeiten durfte.

Mein größter Dank jedoch gilt meiner Familie, die mir auf dem Weg der Promotion mit sehr viel Unterstützung stets den notwendigen Rückhalt geboten hat. Insbesondere meine Eltern und Schwiegereltern haben zahlreiche Stunden Kinderbetreuung übernommen, in denen ich mich der vorliegenden Arbeit widmen durfte. Außerdem noch die wichtigste Person, meine Frau Kathrin. Danke, dass du, nicht nur bei der Erstellung der Arbeit, sondern auch in jeglichen Lebenslagen, unterstützt. Du hast mir mit viel Verständnis und Geduld den notwendigen Freiraum und fortwährend einen Ausgleich im Privaten gegeben. Damit hast du wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Vorwort des Herausgebers | i |
| Inhaltsverzeichnis | iii |
| Abbildungsverzeichnis | v |
| Tabellenverzeichnis | ix |
| Abkürzungsverzeichnis | xi |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Motivation und Problemstellung | 1 |
| 1.2 Aufbau der Arbeit..... | 7 |
| 1.3 Wissenschaftliche Neuwertigkeit der Arbeit | 10 |
| 2 Grundlagen zur Optimierung der Betriebsstrategie industrieller Energiesysteme | 12 |
| 2.1 Energiesysteme im Kontext der Produktion | 12 |
| 2.2 Energiebezug | 17 |
| 2.2.1 Bilanzkreise für Strom und Gas..... | 18 |
| 2.2.2 Großhandelsmärkte für Strom und Gas..... | 20 |
| 2.2.3 Definitionen verbraucherseitiger Energieflexibilität..... | 25 |
| 2.2.4 Weitere Komponenten der Strom- und Gaspreise | 27 |
| 2.2.5 Betriebsoptimierung industrielle versorgungstechnischer Systeme in der deutschen Energiewirtschaft | 34 |
| 2.3 Energieumwandlung und Verteilung von Wärme und Kälte in industriellen versorgungstechnischen Systemen..... | 35 |
| 2.3.1 Hydraulische und strömungsmechanische Grundlagen | 37 |
| 2.3.2 Hydraulische Grundsaltungen..... | 39 |
| 2.3.3 Umwälzpumpen | 41 |
| 2.3.4 Wärmetauscher..... | 44 |
| 2.3.5 Wärme- und Kälteerzeuger..... | 46 |
| 2.3.6 Speicher..... | 56 |
| 2.4 Mathematische Programmierung und modellprädiktive Regelung..... | 58 |
| 3 Stand der Forschung und Technik | 63 |
| 3.1 Themenverwandte Forschungsströmungen | 63 |
| 3.2 Eingrenzen des Untersuchungsrahmens..... | 66 |
| 3.3 Empirische Analyse der Forschungsaktivität zur Betriebsoptimierung industrieller Wärme- und Kälteversorgungssysteme | 67 |
| 3.4 Detaillierte Analyse ausgewählter wissenschaftlicher Arbeiten | 70 |
| 3.5 Fazit zum Stand der Forschung und Technik..... | 73 |
| 4 Methodik der Arbeit | 77 |
| 4.1 Forschungsfragen und Forschungsziel | 77 |
| 4.2 Methodisches Vorgehen zur Beantwortung der Forschungsfragen | 78 |
| 5 Die Anwendungsfälle und ihre jeweiligen Anforderungen in Bezug auf die Optimierung des Anlagenbetriebs | 84 |

| | | |
|-----------------------------|---|------------|
| 5.1 | Grundsätzliche Anforderungen an Softwarebausteine zur Betriebsoptimierung industrieller versorgungstechnischer Systeme | 84 |
| 5.2 | Beschreibung der untersuchten industriellen Kälte- und Wärmeversorgungssysteme | 88 |
| 5.2.1 | System 1 - Wärmeversorgung | 89 |
| 5.2.2 | System 2 – Kälteversorgung | 98 |
| 5.2.3 | System 3 – Hybride Kälte- und Wärmeversorgung | 101 |
| 5.3 | Zusammenfassung der Anforderungen an ein Verfahren zur Betriebsoptimierung industrieller Wärme- und Kälteversorgungssysteme..... | 104 |
| 6 | Ansatz zur mathematischen Modellierung thermischer Versorgungssysteme | 108 |
| 6.1 | Definition der Problemstruktur..... | 108 |
| 6.1.1 | Mathematische Modellierung der Energiewandler | 109 |
| 6.1.2 | Mathematische Modellierung thermischer Energiespeicher | 119 |
| 6.1.3 | Mathematische Modellierung nicht regelbarer Verbraucher und Erzeuger | 122 |
| 6.1.4 | Modellieren systembezogener Komponenten des Optimierungsproblems..... | 123 |
| 6.1.5 | Übergeordnete Einstellungsmöglichkeiten..... | 126 |
| 6.2 | Parameteridentifikation | 128 |
| 6.3 | Modellbewertung..... | 130 |
| 6.4 | Parametrieren der Systemmodelle 1 – 3 | 131 |
| 6.4.1 | Parametrierung System 1..... | 131 |
| 6.4.2 | Parametrierung System 2..... | 135 |
| 6.4.3 | Parametrierung System 3..... | 138 |
| 7 | Evaluation der Optimierungsmodelle auf Basis historischer Daten | 142 |
| 7.1 | Methodik zur Evaluation von Optimierungsmodellen | 142 |
| 7.2 | Offline-Auswertung des Betriebsoptimierungsmodells für System 1..... | 144 |
| 7.3 | Offline-Auswertung des Betriebsoptimierungsmodells für System 2..... | 147 |
| 7.4 | Offline-Auswertung des Betriebsoptimierungsmodells für System 3..... | 150 |
| 8 | Anbindung der Optimierungsmodelle an die versorgungstechnischen Systeme | 154 |
| 9 | Ausführen und kontinuierliche Verbesserung von Modellen zur Betriebsoptimierung von Wärme- und Kälteversorgungssystemen..... | 160 |
| 9.1 | Versuchsauswertung System 1..... | 161 |
| 9.2 | Versuchsauswertung System 3..... | 168 |
| 9.3 | Versuchsauswertung System 2..... | 175 |
| 9.4 | Diskussion und kritische Würdigung | 179 |
| 10 | Zusammenfassung und Fazit der Arbeit | 186 |
| 10.1 | Zusammenfassung..... | 186 |
| 10.2 | Ausblick | 187 |
| Anhang A | | 190 |
| Anhang B | | 193 |
| Literaturverzeichnis | | 196 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abb. 1-1: Anteile der Industrie an den CO ² Emissionen in Deutschland im Jahr 2018 (Umwelt Bundesamt 2021a) | 1 |
| Abb. 1-2: Emissionen der deutschen Industrie in Mio. Tonnen CO ² Äquivalente in den vergangenen Jahren (blau) sowie die nach dem Klimaschutzgesetz künftig zulässigen Emissionen bis 2030 (grün) (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2021; BMU 2021) | 2 |
| Abb. 1-3: Zusammensetzung des Strompreises für die Industrie in Deutschland von 1998 bis 2021 in ct/kWh (BDEW 2021c) | 3 |
| Abb. 1-4: Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland von 1990 bis 2020 (ohne Geothermie) (BMWi 2021f) | 4 |
| Abb. 1-5: Spannungsfeld und Einflüsse auf die Industrie | 6 |
| Abb. 1-6: Übersicht der Abschnitte der vorliegenden Arbeit | 9 |
| Abb. 2-1: Periphere Ordnung der Subsysteme einer Fabrik angelehnt an (Schenk et al. 2014, S. 138).. | 13 |
| Abb. 2-2: Energieumwandlungskette von der Primärenergie bis zur Energieanwendung in Anlehnung an (Panten 2019)..... | 14 |
| Abb. 2-3: Energetische Zusammenhänge in produzierenden Unternehmen Energieumwandlungssystem angelehnt an (Panten 2019)..... | 16 |
| Abb. 2-4: Übersicht der wichtigsten Endenergieformen sowie des jeweiligen Nutzenergiebedarfs angelehnt an (Panten 2019, S. 20) auf Basis der Daten von (Rohde 2020) | 17 |
| Abb. 2-5: Ausgeglichene Bilanzkreise als Basis für ein stabiles Stromnetz, angelehnt an (50Hertz Transmission GmbH 2021) | 18 |
| Abb. 2-6: Zeitliche Abfolge am Energy-Only Markt angelehnt an (Buhl et al. 2019, S. 11) | 21 |
| Abb. 2-7: Merit Order und der Merit-Order-Effekt angelehnt an (Next Kraftwerke GmbH 2021)..... | 22 |
| Abb. 2-8: Anzahl der Stunden mit negativen Strompreisen im Day-Ahead-Auktionenhandel für Deutschland (Bundesnetzagentur 2021) | 23 |
| Abb. 2-9: Kategorien des DSM nach ihrer Reaktionszeit sowie dem Einfluss auf die Prozessqualität angelehnt an (Palensky und Dietrich 2011) | 26 |
| Abb. 2-10: Bestandteile der Strompreise für Industriekunden mit minimaler (min) und maximaler (max) Last an Steuern und Umlagen | 28 |
| Abb. 2-11: Vereinfachter Aufbau eines zentralen Kälteversorgungssystems..... | 36 |
| Abb. 2-12: Drosselschaltung und Umlenkschaltung bei Wärmekreisläufen..... | 39 |
| Abb. 2-13: Drucklose hydraulische Schaltung mit mehreren Verbrauchern | 40 |
| Abb. 2-14: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb einer Pumpe | 42 |
| Abb. 2-15 Qualitative Darstellung einer Pumpen- und einer Anlagenkennlinie sowie des Betriebspunkts des hydraulischen Systems als Schnittpunkt beider Linien | 43 |
| Abb. 2-16: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Wärmetauschers | 45 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 2-17: Kaltdampfprozess einer Kompressionskältemaschine | 47 |
| Abb. 2-18: log p-h Diagramm des Kaltdampfprozesses einer Kompressionskältemaschine angelehnt an (Dehli 2020, S. 512) | 48 |
| Abb. 2-19: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb einer Kompressionskältemaschine | 49 |
| Abb. 2-20: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Kühlturms | 51 |
| Abb. 2-21: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Brennwertkessels | 53 |
| Abb. 2-22: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Elektrokessels | 54 |
| Abb. 2-23: Darstellung der gewandelten Energieformen sowie der Einflussfaktoren auf den Betrieb eines Blockheizkraftwerks | 55 |
| Abb. 2-24: Zeitlicher Ablauf der rollierenden Optimierung anhand von drei Optimierungsiterationen. 62 | |
| Abb. 3-1: Verschiedene Formen von Microgrids und das Macrogrid | 65 |
| Abb. 3-2: Ergebnis der empirischen Literaturrecherche nach Schlagworten im Volltext der Veröffentlichungen in den Jahren 2011 bis 2021 | 69 |
| Abb. 3-3: Ergebnisse der empirischen Literaturrecherche nach Schlagworten in Titel, Abstract und denen vom Autor angegebenen Key Words in den Jahren 2011 bis 2021 | 70 |
| Abb. 4-1: Phasen des CRISP-ML Prozessmodells, angewandt auf die Erstellung und Ausführung von mathematischen Modellen zur Optimierung des Betriebs von Energiesystemen | 80 |
| Abb. 5-1: Übersichtsplan der wesentlichen Energiewandler und deren Verschaltungen von Systems 189 | |
| Abb. 5-2: Diskrepanz zwischen der geschichteten Temperaturverteilung des Wärmespeichers in der Simulation oder Realität und der homogenen Temperatur des Wärmespeichers im mathematischen Modell | 94 |
| Abb. 5-3: Starttemperatur im mathematischen Modell über den Mittelwert der aufgenommenen Temperaturen im Speicher kann zu einer großen Temperaturdifferenz zwischen der oberen und der unteren Schicht im Speicher führen..... | 95 |
| Abb. 5-4: Qualitative Darstellung der Versorgungssicherheitsproblematik bei fehlerbehafteten mathematischen Modellen | 97 |
| Abb. 5-5: Übersichtsplan der wesentlichen Energiewandler und deren Verschaltungen von Systems 298 | |
| Abb. 5-6: Übersichtsplan der wesentlichen Energiewandler und deren Verschaltungen von Systems 3 | 102 |
| Abb. 6-1: Komponenten eines mathematischen Modells zur Betriebsoptimierung von Wärme- und Kälteversorgungssystemen | 109 |
| Abb. 6-2: Abstrakte Darstellung eines Energiewandlers als Konsument und Produzent unterschiedlicher Leistungsströme | 111 |
| Abb. 6-3: Darstellung der im Modellierungsframework verfügbaren datenbasierten linearen Anlagendynamiken..... | 112 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 6-4: Darstellung des erlaubten Temperaturbands sowie des Solltemperaturbereichs im thermischen Energiespeicher | 121 |
| Abb. 6-5: Darstellung der bidirektionalen hydraulischen Verbindung zwischen zwei Energiewandlern im Modellierungsframework | 124 |
| Abb. 6-6: Verknüpfung mehrerer thermischer Energiewandler über eine thermische Weiche am Beispiel von System 1 | 125 |
| Abb. 6-7: Grafische Darstellung einer Anlagendynamik im mathematischen Modellierungsframework | 129 |
| Abb. 7-1: Erzeugen einer optimierten Betriebstrajektorie über ein mathematisches Modell ohne Interaktion mit einer Simulation oder einem realen Energiesystem..... | 143 |
| Abb. 7-2: Vorgehen zur Bewertung eines mathematischen Optimierungsmodells ohne Interaktion mit einem simulierten oder realen Energiesystem | 144 |
| Abb. 7-3: Betriebsstrategie von System 1 vom 01.01.2017 – 16.01.2017 ohne Interaktion mit dem Simulationsmodell. Dunkelrot steht für volle Auslastung, hellrot für Teillast und grau für kein Betrieb der Anlage. | 146 |
| Abb. 7-4: Verteilung der Stellsignale des konventionellen Betriebs im Vergleich zum optimierten Betrieb von System 1 | 147 |
| Abb. 7-5: Betriebsstrategie von System 2 vom 17.02.2021 - 18.04.2021 ohne Interaktion mit dem Simulationsmodell. Dunkelrot steht für volle Auslastung, hellrot für Teillast und grau für kein Betrieb der Anlage. | 148 |
| Abb. 7-6: Verteilung der Stellsignale des konventionellen Betriebs im Vergleich zum optimierten Betrieb von System 2 | 150 |
| Abb. 7-7: Betriebsstrategie von System 3 vom 01.01.2017 – 31.05.2017 ohne Interaktion mit dem Simulationsmodell. Dunkelrot steht für volle Auslastung, hellrot für Teillast und grau für kein Betrieb der Anlage. | 152 |
| Abb. 7-8: Verteilung der Stellsignale des konventionellen Betriebs im Vergleich zum optimierten Betrieb von System 3 | 153 |
| Abb. 8-1: Interaktion zwischen dem Optimierungsmodell als Agent und der Umgebung..... | 154 |
| Abb. 8-2: Programmablauf zur Durchführung der Optimierung (abstrakt)..... | 155 |
| Abb. 8-3: Interaktion des Optimierers als Agent mit der Simulationsumgebung über das ETA-X Framework | 156 |
| Abb. 8-4: Interaktion des Optimierers als Agent mit dem realen Energiesystem über die etaONE Energiemanagementplattform | 157 |
| Abb. 8-5: Programmablauf der Betriebsoptimierung über die etaONE Plattform | 158 |
| Abb. 9-1: Auswertung der betriebsbedingten Kostenblöcke für das Jahr 2017 | 162 |
| Abb. 9-2: Auswertung der betriebsbedingten Kostenblöcke für das Jahr 2018 | 163 |
| Abb. 9-3: Konventioneller Betrieb von System 1 vom 01.01.2018 bis zum 31.05.2018..... | 164 |
| Abb. 9-4: Optimierter Betrieb von System 1 über ein mit Daten des konventionellen Betriebs trainiertes Modell | 165 |

| | |
|--|-----|
| Abb. 9-5: Optimierter Betrieb von System 1 über ein mit Daten des optimierten Betriebs trainiertes Modell | 166 |
| Abb. 9-6: Auswertung der betriebsbedingten Kostenblöcke für das Jahr 2017 | 170 |
| Abb. 9-7: Auswertung der betriebsbedingten Kostenblöcke für das Jahr 2018 | 170 |
| Abb. 9-8: Konventioneller Betrieb von System 3 vom 01.01.2018 bis zum 31.05.2018..... | 171 |
| Abb. 9-9: Optimierter Betrieb von System 3 über ein mit Daten des konventionellen Betriebs trainiertes Modell | 172 |
| Abb. 9-10: Optimierter Betrieb von System 3 über ein mit Daten des optimierten Betriebs trainiertes Modell | 173 |
| Abb. 9-11: Betriebsstrategie von System 2 vom 17.02.2021 - 18.04.2021 ohne Interaktion mit dem Simulationsmodell. Dunkelrot steht für volle Auslastung, hellrot für Teillast und grau für kein Betrieb der Anlage..... | 178 |
| Abb. 10-1: Konventioneller Betrieb von System 1 für das Jahr 2017 | 190 |
| Abb. 10-2: Optimierter Betrieb von System 1 des Jahres 2017, trainiert mit Daten des konventionellen Betriebs | 191 |
| Abb. 10-3: Optimierter Betrieb von System 1 des Jahres 2017, trainiert mit Daten des optimierten Betriebs | 192 |
| Abb. 10-4: Konventioneller Betrieb von System 3 des Jahres 2017 | 193 |
| Abb. 10-5: Optimierter Betrieb von System 3 des Jahres 2017, trainiert mit Daten des konventionellen Betriebs | 194 |
| Abb. 10-6: Optimierter Betrieb von System 3 des Jahres 2017, trainiert mit Daten des optimierten Betriebs | 195 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|-----|
| Tab. 2-1: Zusammenfassung der Auswirkungen der jeweiligen Preiskomponenten auf den optimierten Anlagenbetrieb..... | 32 |
| Tab. 2-2: Zusammenfassung der im Kontext der vorliegenden Arbeit relevantesten Klassen von Optimierungsproblemen angelehnt an (Gröll 2018) | 58 |
| Tab. 3-1: Übersicht der verwendeten Schlagwörter für die jeweiligen Relevanzgruppen..... | 68 |
| Tab. 3-2: Übersicht der relevantesten analysierten Publikationen im Vergleich zur vorliegenden Arbeit | 75 |
| Tab. 5-1: Qualitätsmerkmale für Machine-Learning-Modelle nach dem CRISP-ML Prozessmodell nach (Studer et al. 2021)..... | 84 |
| Tab. 5-2: Wichtige Parameter und Aktionsräume der jeweiligen Komponenten für System 1 | 91 |
| Tab. 5-3: Wichtige Parameter und Aktionsräume der jeweiligen Komponenten für System 2 | 99 |
| Tab. 5-4: Wichtige Parameter und Aktionsräume der jeweiligen Komponenten für System 3 | 103 |
| Tab. 6-1: Liste aller Parameter und Variablen zur Modellierung von Energiewandlern | 109 |
| Tab. 6-2: Liste aller Parameter und Variablen zur Modellierung von thermischen Energiespeichern .. | 119 |
| Tab. 6-3: Liste aller Parameter und Variablen zur Modellierung von nicht regelbaren Verbrauchern und Erzeugern | 122 |
| Tab. 6-4: Liste aller Parameter und Variablen zur Modellierung von systembezogenen Komponenten des Optimierungsproblems | 123 |
| Tab. 6-5: Aufteilung des Optimierungshorizonts für System 1..... | 131 |
| Tab. 6-6: Zusammenfassung der Modellparameter für System 1 | 132 |
| Tab. 6-7: Rohdaten für die Parameteridentifikation..... | 134 |
| Tab. 6-8: Abgeleitete Zeitserien für die Parameteridentifikation..... | 134 |
| Tab. 6-9: Aufteilung des Optimierungshorizonts für System 2..... | 135 |
| Tab. 6-10: Zusammenfassung der Modellparameter für System 2 | 136 |
| Tab. 6-11: Rohdaten für die Parameteridentifikation | 137 |
| Tab. 6-12: Abgeleitete Zeitserien für die Parameteridentifikation..... | 137 |
| Tab. 6-13: Aufteilung des Optimierungshorizonts für System 3..... | 138 |
| Tab. 6-14: Zusammenfassung der Modellparameter für System 3 | 139 |
| Tab. 6-15: Rohdaten für die Parameteridentifikation | 141 |
| Tab. 7-1: Auswertung der Modellierungsfehler der Anlagendynamiken von System 1 | 145 |
| Tab. 7-2: Vergleich der Kosten im optimierten Betrieb zum konventionellen Betrieb ohne Berücksichtigung von Modellierungsfehlern | 146 |
| Tab. 7-3: Auswertung der Modellierungsfehler der Anlagendynamiken von System 2 | 148 |

| | |
|--|-----|
| Tab. 7-4: Vergleich der Kosten des optimierten Betriebs mit dem konventionellen Betrieb für System 2 ohne Berücksichtigung von Modellierungsfehlern | 149 |
| Tab. 7-5: Auswertung der Modellierungsfehler der Anlagendynamiken von System 3 | 151 |
| Tab. 7-6: Vergleich der Kosten im optimierten Betrieb zum konventionellen Betrieb ohne Berücksichtigung von Modellierungsfehlern für den Versuchszeitraum vom 01.01.2017 bis zum 31.05.2017..... | 152 |
| Tab. 9-1: Zusammenfassung der durchgeführten Versuche der Systeme 1 und 3..... | 160 |
| Tab. 9-2: Zusammenfassung der Kostenterme für die durchgeführten Versuche von System 1..... | 161 |
| Tab. 9-3: Zusammenfassung der Modellierungsfehler im optimierten Betrieb für die Optimierungsmodelle, welche auf Basis der konventionellen Regelung (konv.) sowie der optimierten Regelung (opt.) antrainiert wurden | 167 |
| Tab. 9-4: Zusammenfassung der Kostenterme für die durchgeführten Versuche von System 3..... | 168 |
| Tab. 9-5: Zusammenfassung der Modellierungsfehler für System 3 im optimierten Betrieb für die Optimierungsmodelle welche auf Basis der konventionellen Regelung sowie der optimierten Regelung antrainiert wurden | 174 |
| Tab. 9-6: Modellierungsgenauigkeit der Energiewandler des in Abschnitt 6.4.2 vorgestellten Modells (trainiert mit Datensatz 1) für die Datensätze 1 und 2 | 176 |
| Tab. 9-7: Modellierungsgenauigkeit der Energiewandler des in Abschnitt 6.4.2 vorgestellten Modells (trainiert mit Datensatz 2) für Datensatz 2 | 176 |
| Tab. 9-8: Vergleich der Kosten des optimierten Betriebs der Optimierungsmodelle mit dem konventionellen Betrieb für System 2 ohne Berücksichtigung von Modellierungsfehlern | 178 |

Abkürzungsverzeichnis

BHKW *Blockheizkraftwerk*
CoV *Coefficient of Variation*
CRISP-DM *Cross Industry Standard Process for Data Mining*
CRISP-ML *Cross-Industry Standard Process for Machine Learning*
DR *Demand Response*
DSM *Demand-Side-Management*
EEG *Erneuerbare-Energien-Gesetz*
EER *Energy Efficiency Ratio*
FMU *Functional Mock-Up Unit*
GBT *Gasbrennwerttherme*
HLK *Heizung, Lüftung, Klimatechnik*
IKT *Informations- und Kommunikationstechnik*
KB *Kältebedarf*
KKM *Kompressionskältemaschine*
KT *Kühlturm*
KWK *Kraft-Wärme-Kopplung*
LNG *Liquefied Natural Gas*
LP *Lineare Programmierung*
MILP *Gemischt Ganzzahlige Lineare Programmierung*
MINLP *Gemischt Ganzzahlige Nichtlineare Programmierung*
MR *Momentan Reserve*
NLP *Nichtlineare Programmierung*
OTC *Over the Counter*
TOU *Time-of-Use*
TS *Tauchsieder*
UCP *Unit Commitment Problem*
ÜNB *Übertragungsnetzbetreiber*
WB *Wärmebedarf*
WP *Wärmepumpe*
WT *Wärmetauscher*