

Energieprognose und Steuerungsmethoden für Energiespeichersysteme in Verteilungsnetzen

William Holderbaum · Feras Alasali · Ayush Sinha

Energieprognose und Steuerungsmethoden für Energiespeichersysteme in Verteilungsnetzen

Prädiktive Modellierung und
Kontrolltechniken

 Springer Vieweg

William Holderbaum
School of Science, Engineering and
Environment
University of Salford
Salford, UK

Feras Alasali
Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering
The Hashemite University
Zarqa, Jordan

Ayush Sinha
Department of Information Technology
Indian Institute of Information
Technology-Allahabad
Prayagraj, Uttar Pradesh, India

ISBN 978-3-031-45470-7 ISBN 978-3-031-45471-4 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-45471-4>

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

Übersetzung der englischen Ausgabe: „Hegemonic Transition“ von Florian Böller und Welf Werner, © The Editor(s) (if applicable) and The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2021. Veröffentlicht durch Springer International Publishing. Alle Rechte vorbehalten.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Nature Switzerland AG 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Anthony Doyle

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Nature Switzerland AG und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Gewerbestrasse 11, 6330 Cham, Switzerland

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Eine mögliche Lösung	3
1.2	Energiespeicherung	4
1.3	Welche Art von Kontrollmethoden dieses Buch vorstellt	5
1.4	Nachfrageprognose für Niederspannungs(NV)-Systeme	6
1.5	Warum benötigen wir Regelungen, die Nachfrageprognosen nutzen?	7
1.6	Worum geht es in dem Buch und worum geht es nicht?	8
1.7	Warum brauchen wir dieses Buch	8
1.8	Wie man dieses Buch liest	9
1.9	Hinweis für einen Semesterkurs	11
1.10	Danksagungen	12
	Literatur	13
2	Kurzfristige Lastprognose (STLF)	15
2.1	Rolle der Lastprognose im Stromsystem	15
2.2	Einführung in die Lastprognose	17
	2.2.1 Zeitreihenanalyse und Prognose	18
	2.2.2 Punkt- und rollierende Prognosen	21
2.3	Notation und Evaluationsmethoden für Lastprognosemodelle	22
2.4	Statistische und traditionelle Prognosemethoden	25
	2.4.1 Benchmark-Modelle	25
	2.4.2 AR-, MA-, ARIMA-, ARIMAX- und ARWD-Methoden	34
	2.4.3 Vektorautoregression (VAR)	44
2.5	Maschinelles Lernen für STLF	45
	2.5.1 Künstliches neuronales Netz (ANN)	45
	2.5.2 Rekurrentes neuronales Netz (RNN)	51
	2.5.3 Long Short Term Memory (LSTM)	52
2.6	Probabilistische Prognosemethoden	54
	2.6.1 ProbCast: Probabilistisches Prognosemodell und Visualisierungstool	55
2.7	Wahl einer STLF-Methode	57

2.8	Vergleich von Lastprognoseverfahren	58
2.9	Zusammenfassung	58
	Literatur	60
3	Fallstudie: Prognosen für Niederspannungsbedarf	61
3.1	Einführung	61
3.2	RTG-Kran-Nachfrageprognosen	62
3.2.1	Anfängliches experimentelles Design	62
3.2.2	Datenanalyse	64
3.2.3	Modellauswahl.	70
3.2.4	Ergebnisse, Analyse und Diskussion	75
3.3	Zusammenfassung	81
	Literatur	81
4	Einführung in Regelungsstrategien	83
4.1	Einführung	83
4.1.1	Geschlossene und offene Schleifenregler	84
4.1.2	Strategien der Regelungstechnik	86
4.1.3	Terminologie	88
4.2	PID-Regler	88
4.2.1	Theorie für PID-Regler	89
4.2.2	Diskreter PID	94
4.2.3	Beispiele für PID-Regelung.	95
4.2.4	Einfache PID-Abstimmung	99
4.3	Optimale Regelung	101
4.3.1	Notation	102
4.3.2	Mathematische Formulierung	102
4.3.3	Optimierungsbeispiele	105
4.3.4	Globale und lokale Optimierung	108
4.3.5	Beschränkte und unbeschränkte Optimierung	109
4.3.6	Kontinuierliche und diskrete Optimierung	111
4.3.7	Konvexität	111
4.3.8	Lineare und nichtlineare Optimierung	112
4.3.9	Stochastische und deterministische Optimierung	114
4.3.10	Mehrkriterielle Optimierung	115
4.4	Optimierungsalgorithmen	116
4.4.1	Arten von Optimierungsalgorithmen	116
4.4.2	Initialisierung	118
4.4.3	Stoppkriterien	119
4.4.4	Gradientenmethoden	120
4.4.5	Genetischer Algorithmus	122
4.5	Stochastische Optimierung	130
4.5.1	Ansatz 1: Mittelwert	131
4.5.2	Ansatz 2: Mittlere Zielfunktion	132
4.5.3	Ein Beispiel	133

- 4.5.4 Beispiel für Wohnnetze 136
- 4.6 Ein Vergleich der Niederspannungsregelungsstrategien 138
 - Literatur 139
- 5 Modellprädiktive Regelung 141**
 - 5.1 Einführung 141
 - 5.2 Modellprädiktive Regelung 142
 - 5.2.1 Mathematische Formulierung 145
 - 5.2.2 Abtastezeit 147
 - 5.2.3 Horizont 148
 - 5.2.4 Rechenkomplexität von MPC 150
 - 5.2.5 Beispielanwendung: Autonome Drohennavigation 150
 - 5.3 Stochastische modellprädiktive Regelung 153
 - 5.3.1 Stochastische MPC: Mathematischer Rahmen 154
 - 5.3.2 SMPC-Parameter 157
 - 5.3.3 Beispiel für ein Siedlungs-Stromnetz 159
 - 5.4 Zusammenfassung: Vorteile von MPC und SMPC 161
 - Literatur 162
- 6 Fallstudie: Speichersteuerung für Niederspannungsnetze 163**
 - 6.1 Gestaltung eines Regelungssystems 164
 - 6.2 Niederspannungs-Wohnnetz 167
 - 6.2.1 Studienziel 168
 - 6.2.2 Datenerfassung und -analyse 169
 - 6.2.3 Auswahl der Parameter und Gestaltung des Regelungsalgorithmus 169
 - 6.2.4 Erzeugung eines Prognosemodells 174
 - 6.2.5 Simulationsergebnisse 176
 - 6.3 Fallstudie 2: Stromnetz bei RTG-Kranen. 182
 - 6.3.1 Studienziel 182
 - 6.3.2 Die Daten zur Nachfrage von elektrifizierten RTG-Kranen 183
 - 6.3.3 Auswahl der Parameter und Design des Regelungsalgorithmus 183
 - 6.3.4 Zukünftiges Nachfrageprofil generieren 188
 - 6.3.5 Simulationsergebnisse 189
 - 6.4 Zusammenfassung 195
 - Literatur 196
- Anhang A: Geführte Übungsaufgabe zur Regelung der Energiespeicherung. 197**
- Anhang B: Weiterführende Literatur 205**
- Anhang C: Öffentliches Datensatz- und Modellrepository. 209**

Anhang D: Wahrscheinlichkeit: Definition und Eigenschaften	211
Anhang E: Elementare Statistik	219
Literatur	223

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Konzentrationen von atmosphärischem Kohlendioxid und globale durchschnittliche Jahrestemperaturen (in C) über die Jahre 1880 bis 2009 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Atmospheric_carbon_dioxide_concentrations_and_global_annual_average_temperatures_(in_C)_over_the_years_1880_to_2009.svg . Diese Datei wird unter der Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication zur Verfügung gestellt	2
Abb. 1.2	IEO2013 Weltweite Stromerzeugung: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IEO2013_World_Electricity_Generation.png . Diese Datei wird unter der Creative Commons CC0 1.0 Universal Public Domain Dedication zur Verfügung gestellt	2
Abb. 1.3	Kurzfristige Lastprognosemodelle unterteilt in 3 Hauptkategorien (traditionelle Punkt-, Punkt-KI-Methoden und probabilistische Modelle), von denen viele in diesem Buch untersucht werden	7
Abb. 1.4	Struktur des Buches und Verbindungen zwischen den Kapiteln. Breite Pfeile zeigen starke Voraussetzungen an, wo es starke Abhängigkeiten in den vorhergehenden Kapiteln gibt. Gestrichelte Linien zeigen nützliche Voraussetzungen, wo die vorhergehenden Kapitel hilfreich für das Verständnis der Kapitel sind	10
Abb. 2.1	Ablaufdiagramm für das aktuelle Kapitel	16
Abb. 2.2	Trendmuster in FRED-Daten.	20
Abb. 2.3	Saisonalitätsmuster in OPSD-Daten	20
Abb. 2.4	Korrelation im ACF-Diagramm.	21
Abb. 2.5	Partielle Autokorrelationsfunktion des FRED-Datensatzes.	21
Abb. 2.6	Autokorrelationsfunktion des FRED-Datensatzes.	22
Abb. 2.7	Ein Beispiel für die lineare Regression und Korrelation zwischen der dreiphasigen Wirkleistung und dem	

	Bruttogewicht des Containers am RTG-Kran: Die Regressionslinie ist in Rot.	26
Abb. 2.8	Ein Beispiel für die lineare Regression und Korrelation zwischen der dreiphasigen Wirkleistung und der Anzahl der Kranbewegungen am RTG-Kran: Die Regressionslinie ist in Rot.	27
Abb. 2.9	Ein Beispiel für eine Autokorrelationsfunktion (ACF) mit 120 Verzögerungen	36
Abb. 2.10	Ein Beispiel für eine partielle Autokorrelationsfunktion (PACF) mit 120 Verzögerungen.	37
Abb. 2.11	Zusammenfassung des ARIMA- und ARIMAX-Ansatzes. (Bild von Alasali et al. (2021) mit Open Creative Common CC BY-Lizenz 4.0)	38
Abb. 2.12	Elektrische Lastdaten pro Minutenintervall.	41
Abb. 2.13	ACF- und PACF-Diagramm der elektrischen Lastdaten	42
Abb. 2.14	ARIMA-Prognoseergebnis für elektrische Lastdaten	
	Abb. 2.14: Bitte Prognose prüfen.	43
Abb. 2.15	Die Struktur der typischen künstlichen Neuronenverarbeitung in einer NN-Einheit. (Bild von Alasali et al. (2021) mit Open Creative Common CC BY-Lizenz 4.0).	46
Abb. 2.16	Das einfachste neuronale Netz	47
Abb. 2.17	Das mehrschichtige neuronale Netz	48
Abb. 2.18	Zusammenfassung des ANN-Modellansatzes. Bild von Alasali et al. (2021) mit Open Creative Common CC BY-Lizenz 4.0	49
Abb. 2.19	Schleife in der RNN-Struktur	52
Abb. 2.20	Ein aufgerolltes rekurrentes neuronales Netz	52
Abb. 2.21	Vier interagierende Schichten im LSTM-Wiederholungsmodul.	53
Abb. 2.22	Prognose für die Windleistungsdichte mit der Methode <code>plot.MultQR()</code> , die in <code>ProbCast</code> bereitgestellt wird	57
Abb. 3.1	Bild des in dieser Fallstudie betrachteten RTG-Krans, der im Hafen von Felixstowe stationiert ist. (Bild von Alasali et al. (2017) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0).	62
Abb. 3.2	Stündlicher Strombedarf vom 15. April bis 10. Mai 2016 für den elektrifizierten RTG-Kran im Hafen von Felixstowe in Großbritannien	65
Abb. 3.3	Durchschnittlicher täglicher RTG-Kran-Strombedarf im Hafen von Felixstowe in Großbritannien vom 15. April bis 10. Mai 2016	66
Abb. 3.4	Streuung des elektrifizierten RTG-Kran-Strombedarfs nach Stunde eines Tages. (Bild von Alasali et al. (2018) mit Open Access Creative Common CC BY Lizenz 4.0)	66

Abb. 3.5	ACF (oben) und PACF (unten) Diagramm für den elektrifizierten RTG-Kran über den Trainingsatz für 50 Zeitverzögerungen	67
Abb. 3.6	3D-Streudiagramm für die Leistungsanforderung des elektrifizierten RTG-Krans, das Bruttogewicht des Containers und die Anzahl der Bewegungen. (Bild von Alasali et al. (2018) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0).	68
Abb. 3.7	Der Unterschied zwischen den Leistungsanforderungswerten für mehrere Stunden, die die gleiche Anzahl von Bewegungen verwendet und das gleiche Bruttogewicht des Containers getragen haben	69
Abb. 3.8	2D-Histogramm für den elektrifizierten RTG-Kranstrombedarf, das Bruttogewicht des Containers und die Anzahl der Bewegungen. (Bild von Alasali et al. (2018) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0)	71
Abb. 3.9	Illustration der möglichen Containergewichte, wenn eine der exogenen Variablen (in diesem Fall die Anzahl der Kranbewegungen) mit $Y_t = 2$ bekannt ist. (Bild von Alasali et al. (2018) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0).	72
Abb. 3.10	ANN-Prognosemodelle: Modell A mit vier Eingangsneuronen und Modell B mit zwei Eingangsneuronen. (Bild von Alasali et al. (2018) mit Open Access Creative Common CC BY Lizenz 4.0)	72
Abb. 3.11	Durchschnittliche RMSE-Fehler über Testset 1 und 2 für die ausgewählten Methoden. Balken sind farblich basierend auf dem Basismodell, rot ist ANN (B1 und B2), schwarz ist ARIMAX (C1, C2) und blau ist AR (D1, D2)	79
Abb. 4.1	Grundlegendes Regelungssystem	84
Abb. 4.2	Darstellung eines offenen Regelkreises ohne Rückkopplung	84
Abb. 4.3	Darstellung eines geschlossenen Regelkreises (mit Rückkopplung)	85
Abb. 4.4	Eine einfache Klassifizierung von ESS-Regelungstechniken	87
Abb. 4.5	Grundlegendes Schema für den PID-Regler	89
Abb. 4.6	Anstiegszeit, Einschwingzeit und andere Charakteristika bei einer Sprungfunktion	91
Abb. 4.7	Beispiel für die Auswirkung auf die Ausgangsantwort von unterschiedlichen proportionalen Verstärkungen K_p , für feste Werte von K_I und K_D	92
Abb. 4.8	Beispiel für den Effekt auf die Ausgangsantwort von verschiedenen K_I -Werten, bei festen Werten von K_p und K_D	93
Abb. 4.9	Die Auswirkung der Erhöhung von K_D , während K_p und K_I konstant gehalten werden	93

Abb. 4.10	Beispiel für Reaktionen von zwei verschiedenen PID-Reglern mit Sprungantwortcharakteristiken basierend auf unterschiedlichen K_P -, K_I - und K_D -Werten	96
Abb. 4.11	Die PID-Regelung für die Raumtemperatur. Die Parameter des PID-Regelungsmodells wurden durch umfangreiche Simulationen mit einer Reihe von repräsentativen Regelungsparametern ermittelt	97
Abb. 4.12	Änderung der Raumtemperatur als Ergebnis der Anwendung des PID-Reglers	97
Abb. 4.13	Ein Beispiel für die Verwendung von ESS mit Sollwertregler mit zwei Sollwertwerten	98
Abb. 4.14	Der Ladezustand (SoC) für ESS über einen Tageszeitraum für Sollwertregler, für die im Haupttext vorgestellte Fallstudie	99
Abb. 4.15	Graph der Maximierung und Minimierung der Kostenfunktion	104
Abb. 4.16	Eine Darstellung für $f(x) = (x_1 - 4)^2 + (x_2 + 1)^2$	105
Abb. 4.17	Graph der Kostenfunktion $Fläche = 100w - 2w^2$	106
Abb. 4.18	Grafik der Funktion $f(x) = x - 50 $. Ebenfalls gezeigt wird der zulässige Bereich, der durch das Intervall $[30, 60]$ definiert ist, zwischen den beiden vertikalen Linien	107
Abb. 4.19	Graph der Kostenfunktion $f(x)$	107
Abb. 4.20	Ein Beispiel für lokale und globale Minima	108
Abb. 4.21	Beispiel für machbare Lösungsbereiche basierend auf verschiedenen Einschränkungen. Die gelben Bereiche sind die machbaren Teile und das Grün ist in b und c nicht machbar	109
Abb. 4.22	Beispiel für konvexe und nicht konvexe Mengen	112
Abb. 4.23	Beispiel für konvexe und nicht-konvexe bivariate Funktionen.	112
Abb. 4.24	Veranschaulichung der Intuition hinter Gradientenmethoden.	118
Abb. 4.25	Flussdiagramm des genetischen Algorithmus. (Bild von Alasali et al. (2019) von Alasali et al., Copyright Elsevier (2019)).	124
Abb. 4.26	Ein Beispiel für die Roulette-Methode, die entsprechend den verschiedenen Fitness-Wahrscheinlichkeiten (FP) aufgeteilt ist	127
Abb. 4.27	Ein Beispiel für Einpunkt-Crossover.	128
Abb. 4.28	Ein Beispiel für Zweipunkt-Crossover	128
Abb. 4.29	Ein Beispiel für uniformes Crossover	128
Abb. 4.30	Ein Beispiel für eine Bit-Flip-Mutation, bei der ein Gen bei einem Individuum umgeklappt wird	129
Abb. 4.31	Ein Beispiel für eine zufällige Zurücksetzungsmutation.	129
Abb. 4.32	Ein Beispiel für eine Swap-Mutation	130

Abb. 4.33	Eine normalverteilte Variable mit einem Mittelwert von 100 und einer Standardabweichung von 20.	132
Abb. 4.34	Der Gewinn und Verlust für verschiedene Nachfragewerte (w)	134
Abb. 4.35	Gewinnprofile für verschiedene Werte der Nachfrage (w), in Rot. Ebenfalls dargestellt ist das Gewinnprofil für die erwartete Nachfrage (in Grün dargestellt)	135
Abb. 4.36	200 Nachfrageszenarien mit dem Durchschnitt davon aus den normalverteilten Daten	135
Abb. 4.37	Mittlere Zielfunktion für das Beispiel des Milchflaschenverkaufs.	135
Abb. 4.38	Beispiel für die Ensemble-Prognosen mit einem Monte-Carlo-Ansatz. Auch gezeigt wird der Durchschnitt über alle Ensembles als gestrichelte Linie. (Bild von Alasali et al. (2019) von Alasali et al., Copyright Elsevier (2019)).	136
Abb. 5.1	Schematische Darstellung der wesentlichen Komponenten für einen MPC-Regler bei jedem Zeitschritt	144
Abb. 5.2	Die Strategie des zurückweichenden Horizonts im MPC-Regler.	145
Abb. 5.3	Die Anstiegs- und Abtastzeitmerkmale	148
Abb. 5.4	Eine MPC-Regelung für eine autonome Drohne.	151
Abb. 5.5	Das Schema für den MPC-Regler für eine bestimmte Änderung (Δw_k) der Drohnenwinkel, der eine Abweichung von der zentralen roten Spur erzeugt.	152
Abb. 5.6	Der Prognosehorizontparameter im MPC-Regler	153
Abb. 5.7	Einfache Darstellung einer Regelschleife für stochastische modellprädiktive Regelung	154
Abb. 5.8	Beispiel für die Ensemble-Prognosen mit einem Monte-Carlo-Ansatz. Ebenfalls gezeigt ist der Durchschnitt über alle Ensembles als schwarze Linie	160
Abb. 5.9	Das Netzanforderungsprofil ohne ein Energiespeichersystem (w_3) und mit Speichersystem unter Verwendung von MPC und SMPC-Reglern	161
Abb. 6.1	Allgemeines Schema des optimalen Energiemanagementsystems basierend auf dem implementierten Lastprognoseverfahren	164
Abb. 6.2	Das allgemeine Diagramm für MPC in der Niederspannungs-Fallstudie. Bild von Yunusov et al. (2017) lizenziert unter CC BY 3.0 https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/	173
Abb. 6.3	Zusammenhang zwischen dem Prognosefehler und dem durchschnittlichen täglichen Energiebedarf für ST- und ARWD-Methoden. Bild von Yunusov et al. (2017) lizenziert unter CC BY 3.0	175

Abb. 6.4	Beispiel für Spitzenreduktion für einen bestimmten Wohnspeiser, für einen bestimmten Tag im Testset mit der SnT-Prognose (eine Methode, die nicht im Haupttext enthalten ist, aber hier zur Veranschaulichung des Unterschieds verwendet wird). Bild von Yunusov et al. (2017) lizenziert unter CC BY 3.0.	176
Abb. 6.5	Ein Boxplot-Vergleich der täglichen Spitzenreduktion für ausgewählte Prognosemodelle und die beiden Steuerungsmethoden. Bild von Yunusov et al. (2017) lizenziert unter CC BY 3.0	179
Abb. 6.6	Tägliche Spitzenreduktion pro Zuleitung pro Tag für den MPC-Regler mit jeder Prognosemethode. Bild von Yunusov et al. (2017) lizenziert unter CC BY 3.0.	181
Abb. 6.7	Einzelleitungsdiagramm des RTG-Kran-Stromnetz einschließlich des ESS-Standortszenarios. Bild von Alasali et al. (2019), Copyright Elsevier (2019)	184
Abb. 6.8	Das Schema des MPC für das Stromnetz der RTGs und eines ESS. Bild von Alasali et al. (2017) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0.	186
Abb. 6.9	Beispiel für ein Stichprobenprognosemodell (das MC-ARIMAX-Prognosemodell) mit den roten Linien im Vergleich zur tatsächlichen Nachfrage (schwarze Linie). Bild von Alasali et al. (2019), Copyright Elsevier (2019).	189
Abb. 6.10	Die prozentuale Spitzenlastreduktion durch MPC mit verschiedenen Horizontfenstergößen. Bild von Alasali et al. (2019), Copyright Elsevier (2019)	190
Abb. 6.11	Boxplot der täglichen Spitzenlastreduktion, die durch MPC, SMPC und Sollwertregler erreicht wurde. Bild von Alasali et al. (2020) mit Open-Access Creative Common CC BY-Lizenz 4.0	191
Abb. 6.12	Das RTG-Nachfrageprofil mit und ohne ESS. Bild von Alasali et al. (2019), Copyright Elsevier (2019)	193
Abb. 6.13	Das SoC-Profil ESS im Verlauf des Tages. Bild von Alasali et al. (2019), Copyright Elsevier (2019)	193
Abb. 6.14	Die durchschnittliche prozentuale Spitzenreduktion für verschiedene Prognosemodelle. Bild von Alasali et al. (2020) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0.	194
Abb. 6.15	Die Beziehung zwischen MAPE und der täglichen prozentualen Spitzenreduktion für den SMPC-Regler. Bild von Alasali et al. (2020) mit offener Creative Common CC BY-Lizenz 4.0	195
Abb. D.1	Additionsregel der Wahrscheinlichkeit	213
Abb. D.2	Kumulative Fläche der Standardnormalverteilungskurve	217

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Die linearen Gleichungsparameter und das Bestimmtheitsmaß für die Beziehung zwischen dreiphasiger Wirklast, Anzahl der Kranbewegungen und Bruttogewicht des Containers.	27
Tab. 2.2	Der wöchentliche Prognosewert für die 7Sav-Methode.	28
Tab. 2.3	Geschätzte Prognose unter Verwendung einfacher Glättung für monatliche Verkaufsdaten.	31
Tab. 2.4	Geschätzte Prognosefehlermetriken für monatliche Verkaufsdaten.	31
Tab. 2.5	Modellparameter und ihre Beschreibung für die verschiedenen exponentiellen Glättungsmethoden	31
Tab. 2.6	Modellparameter anwendbar für die verschiedenen exponentiellen Glättungsmethoden	32
Tab. 2.7	Link-Funktion mit ihrer Verteilung	34
Tab. 2.8	Das Verhalten von PACF und ACF zur Auswahl der Parameter p, q	37
Tab. 2.9	Stichproben von elektrischen Lastdatenpunkten für das ARIMA-Modell	40
Tab. 2.10	Statistische Eigenschaften der elektrischen Lastdaten.	41
Tab. 2.11	Beschreibung der ARIMA-Funktion	42
Tab. 2.12	ARIMA Modellergebnisse	42
Tab. 2.13	Beschreibung der Wurzel	43
Tab. 2.14	Die Vor- und Nachteile der wichtigsten Methoden zur kurzfristigen Lastprognose.	59
Tab. 3.1	Zusammenfassung der Modelle mit verschiedenen exogenen Eingaben, die anzeigen, ob die geschätzten Werte für Containergewichte und Anzahl der Bewegungen verwendet werden (wenn nicht, dann werden die tatsächlichen Werte verwendet)	74
Tab. 3.2	Leistung der ANN-Prognose (Modell A und B) über Testperiode 1 und 2.	76

Tab. 3.3	Leistung der AR (Modell E) und ARIMA (Modell F) Prognosen über Testperioden 1 und 2.	77
Tab. 3.4	RMSE-Werte für ausgewählte Prognosemodelle, ANN (Modell B), ARIMAX (Modell C) und ARX (Modell D), über Testperioden 1 und 2.	79
Tab. 3.5	Leistung der Prognosemodelle ANN (Modell B) und ARIMAX (Modell C) für Testperioden 1, 2 und 3.	80
Tab. 4.1	Ein Vergleich der Vor- und Nachteile von offenen und geschlossenen Regelungstechniken	85
Tab. 4.2	Auswirkung der Abstimmung von PID- Regelungsparametern auf Anstiegszeit, Überschwingen, Einschwingzeit und stationären Fehler (SSE)	94
Tab. 4.3	Die Berechnungen der PID-Parameter mit der Ziegler- Nichols-Methode	101
Tab. 6.1	MAPE-Werte für die dreitägigen Prognosemodelle für SMA, ST und ARWD.	175
Tab. 6.2	Gesamte Spitzenreduktion für MPC-Regler und optimalen Regler mit fester Lastprognose über alle Verteiler	178
Tab. 6.3	ESS-Parameter, die in der Fallstudie verwendet werden	185