

Sven F. Crone

## **Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel**

# **GABLER RESEARCH**

## Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung

Herausgegeben von

Prof. Dr. Dr. h.c. Herbert Jacob (†), Universität Hamburg

Prof. Dr. Karl-Werner Hansmann, Universität Hamburg

Prof. Dr. Manfred Layer, Universität Hamburg

Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter B. Preßmar, Universität Hamburg

Prof. Dr. Kai-Ingo Voigt, Universität Erlangen-Nürnberg

Sven F. Crone

# **Neuronale Netze zur Prognose und Disposition im Handel**

Mit einem Geleitwort von  
Prof. Dr. Dr. h. c. Dieter B. Preßmar



**RESEARCH**

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.

Dissertation Universität Hamburg, 2008

1. Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten

© Gabler Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

Lektorat: Ute Wrasmann | Sabine Schöller

Gabler Verlag ist eine Marke von Springer Fachmedien.

Springer Fachmedien ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.

[www.gabler.de](http://www.gabler.de)



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Printed in Germany

ISBN 978-3-8349-1174-2

---

## Geleitwort

Das zentrale Gestaltungsproblem eines Handelsbetriebs besteht darin, seine Lieferfähigkeit zu jedem künftigen Zeitpunkt zu garantieren. Dazu ist sowohl eine verlässliche Prognose der Absatzmengen für das Tagesgeschäft notwendig als auch die Bestimmung einer kostenoptimalen Lagerhaltungs- und Bestellpolitik. Für jedes dieser genannten Teilprobleme existieren mathematische Modelle, die im Falle einer praktischen Anwendung zu einer abgestimmten Lösung zusammengeführt werden müssen. Wegen der bekannten Interdependenzprobleme lässt sich diese Planungsaufgabe insbesondere für die praktische Unternehmensführung nur unter großen Schwierigkeiten zufriedenstellend lösen.

Hier zeigt die vorliegende Arbeit neue Wege zu einer bemerkenswerten Problemlösung auf. Maßgebend für die vorgeschlagene Methodenwahl ist der Planungserfolg in der empirischen Konfrontation mit der betrieblichen Praxis. Der Verfasser erweist sich in seiner Analyse der Planungsprobleme als Insider des Handelsgeschäfts; deshalb ist die in seiner Arbeit präsentierte Praxisnähe vorbildlich und aner kennenswert. Vor diesem Hintergrund kann er mit großer Überzeugungskraft zeigen, dass sein Methoden- und Verfahrensvorschlag für den robusten Praxiseinsatz geeignet ist und zugleich den Anforderungen an die Optimalqualität der einschlägigen betriebswirtschaftlichen Theorie genügt.

Die in der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelte Alternative zu den bekannten varianz-analytischen Prognoseverfahren und den entsprechenden Lagerhaltungsmodellen ergibt sich aus der Methodenklasse der künstlichen neuronalen Netze. Kennzeichen dieser Methoden ist das umfassende Lern- und Trainingsverfahren, das sich auch an heterogene und komplexe Planungssituationen anpassen kann. In der gegebenen Fragestellung beschreitet der Verfasser neuartige Wege, indem er das gemeinsame Problem von Prognose und Disposition in der Warenwirtschaft auf der Grundlage eines Simultanansatzes mithilfe der neuronalen Netze löst. Dazu werden die bekannten Algorithmen der neuronalen Netze durch asymmetrische lineare und quadratische Bewertungsfunktionen zur Steuerung des Lernprozesses erweitert. Mit diesem Ansatz gelingt es, das Prognoseproblem und die Dispositionsaufgabe miteinander zu verknüpfen und somit simultan zu lösen. Die dabei erzielte Lösungsqualität wird anhand von zahlreichen Datenkonstellationen aus der Praxis überprüft und mit überzeugendem Erfolg nachgewiesen.

Die Arbeit von Sven Crone repräsentiert einen herausragenden und innovativen Beitrag zur Theorie der künstlichen neuronalen Netzen; zugleich wird ein umfassendes Lösungsverfahren für ein zentrales Planungsproblem des Handels aufgezeigt. In Würdigung dieser besonderen Leistung wurde die Forschungsarbeit bereits durch zwei Wissenschaftspreise ausgezeichnet. Ich wünsche dem Buch einen großen und fachlich engagierten Leserkreis.

Prof. Dr. Dr. h. c. Dieter B. Preßmar

---

## Vorwort

Die vorliegende Untersuchung entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Wirtschaftsinformatik der Universität Hamburg unter der Leitung von Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter Preßmar und Prof. Dr. Stefan Voß. Die Arbeit wurde am Department of Management Science der Universität Lancaster fertig gestellt und vom Fachbereich Wirtschaftswissenschaften als Inauguraldissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.) angenommen.

Mein besonderer Dank gilt meinem akademischen Lehrer Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Dieter B. Preßmar für die engagierte Betreuung und Förderung der Arbeit, seine stete Unterstützung und die freundschaftliche Zusammenarbeit. Die Entwicklung des Themas, im Spannungsfeld von wissenschaftlicher Forschung und den Problemstellungen der Praxis, wäre nicht ohne seine Faszination an künstlichen Neuronalen Netzen und dem nachhaltigen Bemühen um praktische, anwendungsorientierte Forschung in Projekten möglich gewesen.

Bei Herrn Prof. Karl-Werner Hansmann möchte ich mich für die Übernahme des Koreferats und bei Herrn Prof. Stefan Voß für die Übernahme des Vorsitzes des Prüfungsausschusses bedanken. Mein weiterer Dank gilt meinen Kollegen, den Mitarbeitern und ehemaligen Mitarbeitern des Lehrstuhls. Ferner danke ich den Juroren zur Verleihung des Prof. Herbert Jacob Preises der Universität Hamburg für das Jahr 2008 sowie den Juroren des nationalen Dissertationspreises der Gesellschaft für Operations Research (GOR e.V.) für das Jahr 2009.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, ohne deren Unterstützung diese Arbeit niemals fertig gestellt worden wäre und deren Rückhalt wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Ebenso bedanke ich mich herzlich bei meiner Freundin für ihr Verständnis, Durchhaltevermögen und moralische Unterstützung während der Fertigstellung der Arbeit.

Sven F. Crone

## Inhaltsübersicht

|                                                                                         |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>                                                          | <b>XI</b>   |
| <b>Darstellungsverzeichnisse .....</b>                                                  | <b>XVII</b> |
| <b>Sonstige Verzeichnisse .....</b>                                                     | <b>XXIX</b> |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                                               | <b>1</b>    |
| 1.1 Problemstellung .....                                                               | 1           |
| 1.2 Gang der Untersuchung .....                                                         | 6           |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>2 Prognose und Disposition im Handel.....</b>                                        | <b>9</b>    |
| 2.1 Grundlagen der Warendisposition .....                                               | 9           |
| 2.2 Modelle der Bedarfsrechnung.....                                                    | 22          |
| 2.3 Modelle der Bestellmengenrechnung .....                                             | 32          |
| 2.4 Beurteilung von Dispositionsverfahren .....                                         | 62          |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>3 Methodische Grundlagen der Prognose .....</b>                                      | <b>67</b>   |
| 3.1 Determinanten der Prognosemodelle.....                                              | 67          |
| 3.2 Berechnung von Prognoseverfahren .....                                              | 94          |
| 3.3 Beurteilung von Prognoseverfahren .....                                             | 128         |
| 3.4 Anwendung von Prognoseverfahren.....                                                | 142         |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>4 Neuronale Netze als Instrument der Prognose .....</b>                              | <b>159</b>  |
| 4.1 Methodische Grundlagen von Neuronalen Netzen .....                                  | 159         |
| 4.2 Aufbau und Funktionsweise von Neuronalen Netzen .....                               | 164         |
| 4.3 Parametrisierung von Neuronalen Netzen .....                                        | 189         |
| 4.4 Anwendung von Neuronalen Netzen zur Prognose .....                                  | 207         |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>5 Neuronale Netze zur Disposition.....</b>                                           | <b>239</b>  |
| 5.1 Lernziele und Zielfunktionen von Neuronalen Netzen.....                             | 239         |
| 5.2 Zielfunktionen der statistischen Prognosefehler.....                                | 245         |
| 5.3 Zielfunktionen der betriebswirtschaftlichen Entscheidungskosten .....               | 261         |
| 5.4 Studie zur Einsatzfähigkeit von asymmetrischen Kostenfunktionen .....               | 282         |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>6 Empirischer Vergleich von Neuronalen Netzen zur Prognose und Disposition .....</b> | <b>313</b>  |
| 6.1 Gestaltung der Vergleichsstudie .....                                               | 313         |
| 6.2 Durchführung der Vergleichsstudie .....                                             | 318         |
| 6.3 Ergebnisse der Vergleichsstudie .....                                               | 358         |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>7 Schlussbetrachtung.....</b>                                                        | <b>405</b>  |
| 7.1 Zusammenfassung .....                                                               | 405         |
| 7.2 Ausblick .....                                                                      | 408         |
| <br>                                                                                    |             |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>                                                        | <b>409</b>  |
| <b>Anhang .....</b>                                                                     | <b>455</b>  |

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                  |             |
|------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>                               | <b>XVII</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis .....</b>                                 | <b>XXV</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>                               | <b>XXIX</b> |
| <b>Symbolverzeichnis .....</b>                                   | <b>XXXI</b> |
| <br>                                                             |             |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                        | <b>1</b>    |
| 1.1 Problemstellung .....                                        | 1           |
| 1.2 Gang der Untersuchung .....                                  | 6           |
| <br>                                                             |             |
| <b>2 Prognose und Disposition im Handel.....</b>                 | <b>9</b>    |
| 2.1 Grundlagen der Warendisposition .....                        | 9           |
| 2.1.1 Definition und Einordnung der Warendisposition .....       | 9           |
| 2.1.2 Warendisposition als Kernprozess des Handels .....         | 11          |
| 2.1.3 Dispositions- und Lagerstrukturen im Handel .....          | 14          |
| 2.1.4 Funktionsmodell der Warendisposition .....                 | 19          |
| 2.2 Modelle der Bedarfsrechnung .....                            | 22          |
| 2.2.1 Determinanten .....                                        | 22          |
| 2.2.1.1 Kennzeichnung des Bedarfs .....                          | 22          |
| 2.2.1.2 Modellauswahl .....                                      | 24          |
| 2.2.2 Deterministische Modelle .....                             | 26          |
| 2.2.3 Stochastische Modelle .....                                | 28          |
| 2.2.3.1 Modelle für stationären Bedarf .....                     | 28          |
| 2.2.3.2 Modelle für instationären Bedarf .....                   | 30          |
| 2.3 Modelle der Bestellmengenrechnung .....                      | 32          |
| 2.3.1 Determinanten .....                                        | 32          |
| 2.3.1.1 Entscheidungsvariablen .....                             | 32          |
| 2.3.1.2 Kostenparameter .....                                    | 34          |
| 2.3.1.3 Modellauswahl .....                                      | 39          |
| 2.3.2 Deterministische Modelle .....                             | 42          |
| 2.3.2.1 Modelle für stationär-deterministischen Bedarf .....     | 42          |
| 2.3.2.2 Modelle für instationär-deterministischen Bedarf .....   | 46          |
| 2.3.3 Stochastische Modelle .....                                | 47          |
| 2.3.3.1 Modelle für stationär-stochastischen Bedarf .....        | 47          |
| 2.3.3.1.1 Einperiodige stationär-stochastische Modelle .....     | 47          |
| 2.3.3.1.2 Mehrperiodige stationär-stochastische Modelle .....    | 54          |
| 2.3.3.2 Modelle für instationär-stochastischen Bedarf .....      | 59          |
| 2.4 Beurteilung von Dispositionsverfahren .....                  | 62          |
| 2.4.1 Deskriptive Maße der Dispositionsgüte .....                | 62          |
| 2.4.2 Zusammenhang von Prognosefehler und Dispositionsgüte ..... | 65          |
| <br>                                                             |             |
| <b>3 Methodische Grundlagen der Prognose .....</b>               | <b>67</b>   |
| 3.1 Determinanten der Prognosemodelle .....                      | 67          |
| 3.1.1 Merkmale der Prognose .....                                | 67          |
| 3.1.2 Determinanten von Prognosemodellen .....                   | 69          |
| 3.1.2.1 Gegenstand der Prognose .....                            | 69          |
| 3.1.2.2 Formalisierungsgrad der Modellbildung .....              | 72          |
| 3.1.2.3 Gestaltung der abhängigen Modellvariablen .....          | 74          |

|           |                                                                   |     |
|-----------|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.2.4   | Gestaltung der unabhängigen Modellvariablen.....                  | 77  |
| 3.1.3     | Auswahl von Prognosemodell und Prognoseverfahren.....             | 82  |
| 3.1.3.1   | Umfang des Erklärungsmodells.....                                 | 82  |
| 3.1.3.2   | Zeitlicher Prognosehorizont.....                                  | 85  |
| 3.1.3.3   | Verfahren der Bedarfsprognose.....                                | 88  |
| 3.1.3.4   | Prognoseverfahren im Handel.....                                  | 90  |
| 3.2       | Berechnung von Prognoseverfahren.....                             | 94  |
| 3.2.1     | Subjektive Prognoseverfahren.....                                 | 94  |
| 3.2.2     | Objektive Prognoseverfahren der Verteilungsschätzung.....         | 96  |
| 3.2.2.1   | Bestimmung der empirischen Verteilungsfunktion.....               | 96  |
| 3.2.2.2   | Approximation durch theoretische Verteilungsfunktionen.....       | 97  |
| 3.2.2.3   | Schätzung der Verteilungsparameter.....                           | 100 |
| 3.2.3     | Objektive Prognoseverfahren der Zeitreihenanalyse.....            | 103 |
| 3.2.3.1   | Zeitreihen als Grundlage der Prognose.....                        | 103 |
| 3.2.3.2   | Verfahren bei konstantem Bedarfsniveau.....                       | 111 |
| 3.2.3.2.1 | Naive Verfahren und Mittelwerte.....                              | 111 |
| 3.2.3.2.2 | Mittelwerte.....                                                  | 112 |
| 3.2.3.2.3 | Einfache Exponentielle Glättung.....                              | 113 |
| 3.2.3.2.4 | ARMA-Modelle.....                                                 | 115 |
| 3.2.3.3   | Verfahren bei trendbehaftetem Bedarfsverlauf.....                 | 118 |
| 3.2.3.3.1 | Naives Trendverfahren.....                                        | 118 |
| 3.2.3.3.2 | Doppelte Exponentielle Glättung.....                              | 118 |
| 3.2.3.3.3 | Lineare Exponentielle Glättung.....                               | 119 |
| 3.2.3.3.4 | Exponentielle Glättung mit gedämpftem Trend.....                  | 120 |
| 3.2.3.3.5 | ARIMA-Verfahren.....                                              | 121 |
| 3.2.3.4   | Verfahren bei saisonalem und trend-saisonalem Bedarfsverlauf..... | 122 |
| 3.2.3.4.1 | Naives Saisonales Verfahren.....                                  | 122 |
| 3.2.3.4.2 | Saisonale Exponentielle Glättung.....                             | 122 |
| 3.2.3.4.3 | Saisonale ARIMA-Verfahren.....                                    | 124 |
| 3.2.4     | Objektive Prognoseverfahren der Kausalanalyse.....                | 125 |
| 3.2.4.1   | Dynamische Regression.....                                        | 125 |
| 3.2.4.2   | Verfahren der Interventionsmodellierung.....                      | 126 |
| 3.3       | Beurteilung von Prognoseverfahren.....                            | 128 |
| 3.3.1     | Wirtschaftlichkeit und Prognosegenauigkeit.....                   | 128 |
| 3.3.2     | Beurteilung der Prognosegenauigkeit.....                          | 129 |
| 3.3.2.1   | Aspekte der Beurteilung.....                                      | 129 |
| 3.3.2.2   | Statistische Prognosefehler.....                                  | 131 |
| 3.3.2.3   | Statistische Fehlermaße.....                                      | 133 |
| 3.3.2.4   | Komparative statistische Fehlermaße.....                          | 137 |
| 3.3.3     | Durchführung von empirischen Vergleichsstudien.....               | 139 |
| 3.3.3.1   | Erkenntnisse aus Vergleichsstudien.....                           | 139 |
| 3.3.3.2   | Durchführung von Vergleichsstudien.....                           | 140 |
| 3.4       | Anwendung von Prognoseverfahren.....                              | 142 |
| 3.4.1     | Methodologien der Prognoseprozesse.....                           | 142 |
| 3.4.2     | Phasen des Prognoseprozesses.....                                 | 144 |
| 3.4.2.1   | Problemformulierung.....                                          | 144 |
| 3.4.2.2   | Informationsbereitstellung.....                                   | 145 |
| 3.4.2.2.1 | Identifikation und Sammlung der Daten.....                        | 145 |
| 3.4.2.2.2 | Datenvorverarbeitung.....                                         | 147 |
| 3.4.2.3   | Auswahl der Verfahren.....                                        | 149 |
| 3.4.2.3.1 | Explorative Datenanalyse.....                                     | 149 |

|           |                                                                       |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.4.2.3.2 | Modell- und Verfahrensselektion .....                                 | 151        |
| 3.4.2.3.3 | Verfahrensspezifische Datenvorverarbeitung .....                      | 153        |
| 3.4.2.4   | Durchführung der Verfahren .....                                      | 155        |
| 3.4.2.5   | Beurteilung der Verfahren .....                                       | 156        |
| 3.4.2.6   | Anwendung der Verfahren .....                                         | 156        |
| 3.4.3     | Fehlerquellen im Prognoseprozess .....                                | 157        |
| <b>4</b>  | <b>Neuronale Netze als Instrument der Prognose .....</b>              | <b>159</b> |
| 4.1       | Methodische Grundlagen von Neuronalen Netzen .....                    | 159        |
| 4.1.1     | Definition und Abgrenzung .....                                       | 159        |
| 4.1.2     | Motivation zur Analyse von Neuronalen Netzen .....                    | 161        |
| 4.1.3     | Historische Entwicklung .....                                         | 162        |
| 4.2       | Aufbau und Funktionsweise von Neuronalen Netzen .....                 | 164        |
| 4.2.1     | Biologisches Vorbild .....                                            | 164        |
| 4.2.2     | Technische Realisierung .....                                         | 167        |
| 4.2.3     | Signalverarbeitung in künstlichen Neuronen .....                      | 169        |
| 4.2.3.1   | Eingabefunktionen .....                                               | 169        |
| 4.2.3.2   | Aktivierungsfunktionen .....                                          | 170        |
| 4.2.3.3   | Ausgabefunktionen .....                                               | 175        |
| 4.2.3.4   | Kombination der Verarbeitungsfunktionen .....                         | 175        |
| 4.2.4     | Informationsverarbeitung in Netzwerken von Neuronen .....             | 179        |
| 4.2.4.1   | Netzwerktopologie .....                                               | 179        |
| 4.2.4.2   | Struktur der Verbindungsgewichte .....                                | 181        |
| 4.2.4.3   | Aktivierungsstrategien der Informationsverarbeitung .....             | 183        |
| 4.2.5     | Ausgewählte Architekturen .....                                       | 184        |
| 4.3       | Parametrisierung von Neuronalen Netzen .....                          | 189        |
| 4.3.1     | Grundlagen des Lernens .....                                          | 189        |
| 4.3.2     | Algorithmen des überwachten Lernens .....                             | 194        |
| 4.3.2.1   | Klassische Lernalgorithmen .....                                      | 194        |
| 4.3.2.2   | Der Backpropagation-Lernalgorithmus .....                             | 197        |
| 4.3.2.3   | Erweiterungen des Backpropagation-Algorithmus .....                   | 199        |
| 4.3.3     | Anwendung der Lernalgorithmen .....                                   | 203        |
| 4.4       | Anwendung von Neuronalen Netzen zur Prognose .....                    | 207        |
| 4.4.1     | Einsatzfähigkeit Neuronaler Netze zur Prognose .....                  | 207        |
| 4.4.1.1   | Eigenschaften von Neuronalen Netzen .....                             | 207        |
| 4.4.1.2   | Anwendungsbereiche von Neuronalen Netzen .....                        | 211        |
| 4.4.1.3   | Anwendungen von Neuronalen Netzen zur Prognose .....                  | 216        |
| 4.4.1.4   | Empirische Güte der Anwendung .....                                   | 223        |
| 4.4.2     | Netzwerkarchitekturen zur Prognose .....                              | 226        |
| 4.4.2.1   | Zeitreihenanalytische Modellierung .....                              | 226        |
| 4.4.2.2   | Kausalanalytische Modellierung .....                                  | 228        |
| 4.4.2.3   | Äquivalenz zu statistischen Prognoseverfahren .....                   | 231        |
| <b>5</b>  | <b>Neuronale Netze zur Disposition .....</b>                          | <b>239</b> |
| 5.1       | Lernziele und Zielfunktionen von Neuronalen Netzen .....              | 239        |
| 5.2       | Zielfunktionen der statistischen Prognosefehler .....                 | 245        |
| 5.2.1     | Quadratische Fehlerfunktionen .....                                   | 245        |
| 5.2.2     | Nicht-quadratische Fehlerfunktionen .....                             | 251        |
| 5.3       | Zielfunktionen der betriebswirtschaftlichen Entscheidungskosten ..... | 261        |
| 5.3.1     | Asymmetrische Kostenfunktionen in der Statistik .....                 | 261        |

|           |                                                                                       |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.1.1   | Erweiterung auf asymmetrische Kostenfunktionen .....                                  | 261        |
| 5.3.1.2   | Lineare asymmetrische Kostenfunktionen .....                                          | 266        |
| 5.3.1.3   | Nichtlineare asymmetrische Kostenfunktionen .....                                     | 269        |
| 5.3.1.4   | Anwendungsbereiche asymmetrischer Kostenfunktionen .....                              | 272        |
| 5.3.2     | Neuronale Netze und asymmetrische Kostenfunktionen .....                              | 275        |
| 5.3.2.1   | Parametrisierung bei asymmetrischen Kostenfunktionen .....                            | 275        |
| 5.3.2.2   | Erweiterung des Backpropagation-Algorithmus .....                                     | 277        |
| 5.3.2.3   | Auswirkungen von asymmetrischen Kostenfunktionen .....                                | 280        |
| 5.4       | Studie zur Einsatzfähigkeit von asymmetrischen Kostenfunktionen .....                 | 282        |
| 5.4.1     | Gestaltung des Versuchsaufbaus .....                                                  | 282        |
| 5.4.1.1   | Datenbasis der Studie .....                                                           | 282        |
| 5.4.1.2   | Ziel- und Kostenfunktionen .....                                                      | 285        |
| 5.4.1.3   | Modellierung der Verfahren .....                                                      | 286        |
| 5.4.2     | Ergebnisse .....                                                                      | 289        |
| 5.4.2.1   | Grafische Analyse und Interpretation .....                                            | 289        |
| 5.4.2.2   | Beurteilung der Einsatzfähigkeit .....                                                | 298        |
| 5.4.2.3   | Beurteilung der Entscheidungsgüte .....                                               | 303        |
| 5.4.3     | Zusammenfassung und Interpretation .....                                              | 308        |
| <b>6</b>  | <b>Empirischer Vergleich von Neuronalen Netzen zur Prognose und Disposition .....</b> | <b>313</b> |
| 6.1       | Gestaltung der Vergleichsstudie .....                                                 | 313        |
| 6.1.1     | Zielsetzung des Verfahrensvergleichs .....                                            | 313        |
| 6.1.2     | Aufbau der Vergleichsstudie .....                                                     | 315        |
| 6.2       | Durchführung der Vergleichsstudie .....                                               | 318        |
| 6.2.1     | Problemstellung .....                                                                 | 318        |
| 6.2.1.1   | Der Warenautomat als Betriebsform des Handels .....                                   | 318        |
| 6.2.1.2   | Prognose und Disposition an Warenautomaten .....                                      | 322        |
| 6.2.1.3   | Modelltheoretische Einordnung der Problemstellung .....                               | 324        |
| 6.2.2     | Datenanalyse .....                                                                    | 327        |
| 6.2.2.1   | Stichprobe der Zeitreihen .....                                                       | 327        |
| 6.2.2.2   | Explorative Datenanalyse .....                                                        | 330        |
| 6.2.2.2.1 | Datenanalyse je Abverkaufsstelle .....                                                | 330        |
| 6.2.2.2.2 | Datenanalyse je Zeitreihe .....                                                       | 336        |
| 6.2.2.2.3 | Kategorisierung der Zeitreihen .....                                                  | 339        |
| 6.2.2.3   | Aufteilung der Datenbasis .....                                                       | 344        |
| 6.2.3     | Verfahren zur Bedarfsprognose .....                                                   | 345        |
| 6.2.3.1   | Auswahl der Prognoseverfahren .....                                                   | 345        |
| 6.2.3.2   | Berechnung der statistischen Prognoseverfahren .....                                  | 348        |
| 6.2.3.3   | Berechnung der Neuronalen Netze zur Prognose .....                                    | 350        |
| 6.2.4     | Verfahren zur Bestellmengenrechnung .....                                             | 352        |
| 6.2.4.1   | Bestimmung des kostenoptimalen Servicelevels .....                                    | 352        |
| 6.2.4.2   | Bestellmengenrechnung für statistische Prognoseverfahren .....                        | 354        |
| 6.2.4.3   | Simultane Bestellmengenrechnung mit Neuronalen Netzen .....                           | 355        |
| 6.2.5     | Beurteilungsmaße .....                                                                | 356        |
| 6.2.5.1   | Fehlermaße der Prognosegenauigkeit .....                                              | 356        |
| 6.2.5.2   | Kostenmaße der Dispositionsgüte .....                                                 | 357        |
| 6.3       | Ergebnisse der Vergleichsstudie .....                                                 | 358        |
| 6.3.1     | Ergebnisse der Bedarfsprognose .....                                                  | 358        |
| 6.3.1.1   | Gesamtergebnisse .....                                                                | 358        |
| 6.3.1.2   | Ergebnisse nach Absatzstelle .....                                                    | 369        |

---

|          |                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.1.3  | Ergebnisse nach Zeitreihe .....                                        | 374        |
| 6.3.1.4  | Ergebnisse nach Zeitreihencharakteristika .....                        | 376        |
| 6.3.2    | Ergebnisse der Warendisposition .....                                  | 381        |
| 6.3.2.1  | Gesamtergebnisse .....                                                 | 381        |
| 6.3.2.2  | Ergebnisse nach Absatzstelle .....                                     | 389        |
| 6.3.2.3  | Ergebnisse nach Zeitreihen .....                                       | 394        |
| 6.3.2.4  | Ergebnisse nach Zeitreihencharakteristika .....                        | 395        |
| 6.3.3    | Zusammenhang zwischen Prognosegenauigkeit und Dispositionskosten ..... | 400        |
| <b>7</b> | <b>Schlussbetrachtung .....</b>                                        | <b>405</b> |
| 7.1      | Zusammenfassung .....                                                  | 405        |
| 7.2      | Ausblick .....                                                         | 408        |
|          | <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                      | <b>409</b> |
|          | <b>Anhang .....</b>                                                    | <b>455</b> |

## Abbildungsverzeichnis

|                 |                                                                                                                                                                      |    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2.1:  | Die Warendisposition als Objekt der Logistik, Materialwirtschaft, Beschaffung, Produktion und Distribution .....                                                     | 11 |
| Abbildung 2.2:  | Kernprozesse und Hauptfunktionen von Handelsbetrieben.....                                                                                                           | 12 |
| Abbildung 2.3:  | Konstituenten eines Lagerhaltungsproblems .....                                                                                                                      | 14 |
| Abbildung 2.4:  | Grundformen von Lagerstrukturen einer Handelsunternehmung .....                                                                                                      | 17 |
| Abbildung 2.5:  | Teilprozesse der Warendisposition im Handel .....                                                                                                                    | 20 |
| Abbildung 2.6:  | Modelle der Bedarfs- und Bestellmengenrechnung für die Determinanten des Bedarfs .....                                                                               | 24 |
| Abbildung 2.7:  | Stationäre Zeitreihen mit niedriger (a.), mittlerer (b.) und hoher Streuung (c.).....                                                                                | 29 |
| Abbildung 2.8:  | Beispiele instationärer Zeitreihen .....                                                                                                                             | 30 |
| Abbildung 2.9:  | Bestellkosten, Lagerungskosten und Gesamtkosten in Abhängigkeit von der Bestellmenge.....                                                                            | 43 |
| Abbildung 2.10: | Lagerbestandsentwicklung im deterministischen Modell nach HARRIS .....                                                                                               | 45 |
| Abbildung 2.11: | Lagerbestandsentwicklung bei stochastischem Bedarf (a.) und bei stochastischer Wiederbeschaffungszeit (b.).....                                                      | 48 |
| Abbildung 2.12: | Bestimmung der optimalen Bestellmenge $q^*$ im Newsboy-Modell .....                                                                                                  | 51 |
| Abbildung 2.13: | Bestimmung des Sicherheitsbestandes im Newsboy-Modell .....                                                                                                          | 52 |
| Abbildung 2.14: | Lagerbestandsentwicklung bei einer stochastischen ( $s, q$ )-Politik .....                                                                                           | 56 |
| Abbildung 2.15: | Lagerbestandsentwicklung bei einer stochastischen ( $r, S$ )-Politik .....                                                                                           | 57 |
| Abbildung 2.16: | Lagerbestandsentwicklung bei einer stochastischen ( $r, s, S$ )-Politik .....                                                                                        | 57 |
| Abbildung 2.17: | Fehlverlauf deskriptiver Gütemaße des <i>OOU</i> (a.), <i>OVU</i> (b.), <i>OOS</i> (c.) und <i>OVS</i> (d.) im Vergleich zum quadratischen Fehler <i>SE(e)</i> ..... | 63 |
| Abbildung 3.1:  | Strukturmodell der Einzelunternehmung.....                                                                                                                           | 70 |
| Abbildung 3.2:  | Prognoseobjekte der Absatzprognose und ihre Interaktion .....                                                                                                        | 72 |
| Abbildung 3.3:  | Modellbildung im Erklärungs- und Prognosezeitraum.....                                                                                                               | 78 |
| Abbildung 3.4:  | Prognosemodelle der Zeitreihenprognose, der Wirkungsprognose und der kausalen Prognose.....                                                                          | 80 |
| Abbildung 3.5:  | Abgrenzung von Zeitreihenprognose und Wirkungsprognose .....                                                                                                         | 80 |
| Abbildung 3.6:  | Absatzprognose im Produktlebenszyklus .....                                                                                                                          | 87 |
| Abbildung 3.7:  | Systematik objektiver Prognosemodelle und Prognoseverfahren.....                                                                                                     | 90 |
| Abbildung 3.8:  | Anwendung von Prognoseverfahren in der betrieblichen Praxis.....                                                                                                     | 91 |
| Abbildung 3.9:  | Anwendung von Prognoseverfahren im Handel .....                                                                                                                      | 92 |
| Abbildung 3.10: | Anwendung von Prognoseverfahren in Industrie und Handel.....                                                                                                         | 92 |

|                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 3.11: Dichtefunktionen und Verteilungsfunktionen der Normalverteilung, der Erlangverteilung und der Poissonverteilung.....            | 98  |
| Abbildung 3.12: Prozesskette der Bedarfsrechnung mit Verteilungsannahme.....                                                                    | 103 |
| Abbildung 3.13: Regelmäßige und unregelmäßige Komponenten von Zeitreihen.....                                                                   | 104 |
| Abbildung 3.14: Zeitreihenmuster nach der PEGELS-GARDNER-Klassifikation .....                                                                   | 106 |
| Abbildung 3.15: Instationäre Zeitreihen mit saisonalem Verlauf (a.) und trendbehaftetem Verlauf (b.).....                                       | 107 |
| Abbildung 3.16: Instationäre Zeitreihen mit Niveaushift (a.), Ausreißern (b.) und einem Strukturbruch im Trendverlauf (c.) .....                | 108 |
| Abbildung 3.17: Dekomposition einer Zeitreihe in ihre Komponenten .....                                                                         | 110 |
| Abbildung 3.18: Gewichtung der Beobachtungswerte in der Exponentiellen Glättung.....                                                            | 115 |
| Abbildung 3.19: Prognosemodell der dynamischen Regression zur kausalen Prognose.....                                                            | 126 |
| Abbildung 3.20: ARX( $p$ )-Prognosemodell zur kausalen Prognose mit Interventionen .....                                                        | 126 |
| Abbildung 3.21: Fehlerverlauf des einfachen (a.), absoluten (b.), quadratischen (c.) und der Wurzel des quadratischen Prognosefehlers (d.)..... | 132 |
| Abbildung 3.22: Kalibrations- und Teststichproben zur Beurteilung von Prognoseverfahren .....                                                   | 141 |
| Abbildung 3.23: Phasen des Prognoseprozesses.....                                                                                               | 144 |
| Abbildung 3.24: Informationsbereitstellung im Prognoseprozess .....                                                                             | 146 |
| Abbildung 3.25: Verfahrens unabhängige Datenvorverarbeitung im Prognoseprozess .....                                                            | 147 |
| Abbildung 3.26: Datenanalyse im Prognoseprozess.....                                                                                            | 150 |
| Abbildung 3.27: Modellselektion und Verfahrensselektion im Prognoseprozess .....                                                                | 151 |
| Abbildung 3.28: Baumdiagramm zur Modellselektion.....                                                                                           | 152 |
| Abbildung 3.29: Verfahrensspezifische Datenvorverarbeitung im Prognoseprozess.....                                                              | 154 |
| Abbildung 3.30: Beurteilung der Verfahrensgüte im Prognoseprozess.....                                                                          | 156 |
| Abbildung 4.1: Biologisches Neuron im Neuronenverbund.....                                                                                      | 165 |
| Abbildung 4.2: Zentrales Nervensystem und die Ebenen struktureller Organisation.....                                                            | 166 |
| Abbildung 4.3: Künstliches Neuron im Neuronenverbund.....                                                                                       | 167 |
| Abbildung 4.4: Aktivierungsfunktionen und Aktivierungszustände .....                                                                            | 172 |
| Abbildung 4.5: Aktivierungszustände von Aktivierungsfunktionen .....                                                                            | 174 |
| Abbildung 4.6: Signalverarbeitung im künstlichen Neuron .....                                                                                   | 176 |
| Abbildung 4.7: Grafische Notation der Informationsverarbeitung im Neuron .....                                                                  | 178 |
| Abbildung 4.8: Mehrschichtiges Neuronales Netz .....                                                                                            | 179 |
| Abbildung 4.9: Modellierung der Schwellwerte der Aktivierung durch ein Bias-Neuron .....                                                        | 180 |

|                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4.10: Topologien und Verbindungsmatrizen für vorwärtsgerichtete NN ohne (a.) und mit schichtübergreifenden Verbindungen (b.) .....             | 182 |
| Abbildung 4.11: Topologien und Verbindungsmatrizen für rückgekoppelte NN mit direkten (a.), indirekten (b.) und lateralen Rückkopplungen (c.) .....      | 183 |
| Abbildung 4.12: Funktionsverarbeitung in vorwärtsgerichteten Neuronalen Netzen .....                                                                     | 184 |
| Abbildung 4.13: Funktionsverarbeitung in rekurrenten Neuronalen Netzen .....                                                                             | 184 |
| Abbildung 4.14: Netzwerkarchitektur des Perceptron (a.) und ADALINE (b.) .....                                                                           | 185 |
| Abbildung 4.15: Prototypische Netzwerkarchitekturen des MLP (b.), (c.) und (d.), GFFN (d.), RBF NN (e.), HBF NN (f.), PNN (g.) und JNN (h.) .....        | 186 |
| Abbildung 4.16: Zusammenhang von Lernzielen und Lernalgorithmen [erweiterte Darstellung nach Rojas 1993] .....                                           | 189 |
| Abbildung 4.17: Lernen ohne Feedback (a.) und Lernen mit Feedback zur Fehlerkorrektur (b.) .....                                                         | 192 |
| Abbildung 4.18: Problemklassen der Modellierung und Architekturen Neuronaler Netze .....                                                                 | 193 |
| Abbildung 4.19: Netzwerkfehler als bivariate Fehlerfunktion mit einem globalen Minimum (a.) und als Gradienten der Fehlerfunktion (b.) .....             | 195 |
| Abbildung 4.20: Bivariate Fehlerfunktionen mit je einem globalen und lokalen Minimum (a.) sowie mit multiplen lokalen Minima der Fehlerfläche (b.) ..... | 200 |
| Abbildung 4.21: Bivariate Fehlerfunktion mit mehreren lokalen Minima (a.), Höhenlinien (b.) und Gradienten der Fehlerfunktion (c.) .....                 | 200 |
| Abbildung 4.22: Underfitting (a.), Fitting (b.) und Overfitting (c.) bei der Approximation von Funktionen durch Neuronale Netze .....                    | 204 |
| Abbildung 4.23: Verlauf der Trainings- und Validierungsfehler im Training .....                                                                          | 205 |
| Abbildung 4.24: Anwendungsbereiche von Neuronalen Netzen .....                                                                                           | 210 |
| Abbildung 4.25: Anwendungen von Neuronalen Netzen zur Entscheidungsunterstützung .....                                                                   | 213 |
| Abbildung 4.26: Wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Prognose mit Neuronalen Netzen .....                                                            | 216 |
| Abbildung 4.27: Betriebswirtschaftliche Veröffentlichungen zur Prognose mit Neuronalen Netzen .....                                                      | 219 |
| Abbildung 4.28: Architektur eines MLP zur zeitreihenanalytischen Einschritt-Prognose .....                                                               | 226 |
| Abbildung 4.29: Architektur eines MLP zur zeitreihenanalytischen Mehrschritt-Prognose .....                                                              | 228 |
| Abbildung 4.30: Architektur eines MLP zur univariaten, nichtlinearen Regression .....                                                                    | 229 |
| Abbildung 4.31: Architektur eines MLP zur dynamischen Regression .....                                                                                   | 230 |
| Abbildung 4.32: Architektur eines MLP zur kausalen Prognose mit Interventionsvariablen .....                                                             | 231 |

|                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 4.33: Architektur eines MLP zur Modellierung eines linearen AR(1)-Prozesses (a.), eines linearen AR( $p$ )-Prozesses (b.) und eines nichtlinearen AR( $p$ )-Prozesses (c.) .....                          | 232 |
| Abbildung 4.34: Architektur eines MLP zur Modellierung einer univariaten linearen Regression (a.), einer multivariaten linearen Regression (b.) und einer nichtlinearen logistischen Regression (c.) .....          | 233 |
| Abbildung 4.35: Architektur eines MLP zur Modellierung der Naiven Verfahren NF1 (a.), NF2 (b.) und NF3 (c.) .....                                                                                                   | 234 |
| Abbildung 4.36: Architektur eines MLP zur Modellierung eines gleitenden Mittelwertes (a.) und eines exponentiell gewichteten gleitenden Mittelwertes (b.) .....                                                     | 234 |
| Abbildung 4.37: Architektur eines MLP zur Modellierung eines linearen AR( $p$ )-Prozesses .....                                                                                                                     | 236 |
| Abbildung 5.1: Quadratische Fehlerfunktionen des $SE(e)$ , des skalierten quadratischen Fehlers $0,5 SE(e)$ und der Differenz $SE(e) - 0,5 SE(e)$ .....                                                             | 246 |
| Abbildung 5.2: Minkowski- $R$ -Fehlerfunktionen für $R = 1$ , $R = 2$ und $R = 4$ im eindimensionalen Fall (a.) sowie als Distanzen im zweidimensionalen Fall (b.) .....                                            | 252 |
| Abbildung 5.3: Fehlerfunktionen des absoluten Fehlers $AE(e)$ , des quadratischen Fehlers $SE(e)$ und der Differenz beider Fehlerfunktionen $AE(e) - SE(e)$ .....                                                   | 253 |
| Abbildung 5.4: Fehlerverlauf der $\ln(\cosh)$ -Fehlerfunktion, der absoluten Fehlerfunktion $AE(e)$ und der Differenz von $\ln(\cosh(e)) - AE(e)$ für $c = 10$ (a.) und für unterschiedliche $c$ (b.) .....         | 255 |
| Abbildung 5.5: Epsilon-insensitive Fehlerfunktion der Support Vector Regression .....                                                                                                                               | 258 |
| Abbildung 5.6: Fehlerfunktion und erste Ableitungen des quadratischen Fehler $SE(e)$ im Vergleich zu robusten Funktionen des $AE(e)$ , HUBERS winsorisierte Fehlerfunktion und TUKEYS Biweight-Fehlerfunktion ..... | 259 |
| Abbildung 5.7: Erste Ableitungen von HAMPELS Fehlerfunktion (a.) und einer gekappten Fehlerfunktion (b.) .....                                                                                                      | 260 |
| Abbildung 5.8: Asymmetrische $LINLIN(e)$ -Kostenfunktion im Vergleich zum quadratischen Fehler $SE(e)$ und die Differenz beider Funktionen $LINLIN(e) - SE(e)$ .....                                                | 267 |
| Abbildung 5.9: Optimaler Schätzer einer symmetrischen Verteilung bei symmetrischer Kostenfunktion (a.) und asymmetrischer Kostenfunktion (b.) .....                                                                 | 268 |
| Abbildung 5.10: Optimaler Schätzer einer asymmetrischen Verteilung bei einer asymmetrischen Kostenfunktion .....                                                                                                    | 269 |
| Abbildung 5.11: $QQC(e)$ -asymmetrische Kostenfunktion im Vergleich zur quadratischen Kostenfunktion $SE(e)$ und ihrer Differenz $QQC(e) - SE(e)$ .....                                                             | 270 |

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5.12: $LINEX(e)$ -Kostenfunktion im Vergleich zur Kostenfunktion $SE(e)$ und zur Differenz $LINEX(e) - SE(e)$ (a.) sowie unterschiedliche Parametrisierungen von $c, d$ für $LINEX(e)$ (b.)                   | 271 |
| Abbildung 5.13: Bivariate Fehlerflächen der Fehlerkosten für den quadratischen Fehler $SSE(e)$ (a.) und den modifizierten quadratischen Fehler $\frac{1}{2}SSE(e)$ (b.)                                                 | 280 |
| Abbildung 5.14: Bivariate Fehlerfläche der Fehlerkosten für eine asymmetrische Kostenfunktion $LINLIN(e)$ (a.) und der Differenz der Fehlergebirge von $SE(e)$ und $LINLIN(e)$ (b.)                                     | 281 |
| Abbildung 5.15: Histogramme der Wahrscheinlichkeitsverteilungen stationärer Zufallsvariablen mit unterschiedlicher Streuung und überlagerter Darstellung der Dichtefunktion der Normalverteilung                        | 283 |
| Abbildung 5.16: Ausschnitte der ersten 120 Werte stationärer Zeitreihen mit niedriger, mittlerer und hoher Nachfrageschwankung der Poissonverteilung, negativen Binomialverteilung und der Normalverteilung             | 284 |
| Abbildung 5.17: Ausschnitte der ersten 120 Werte saisonaler Zeitreihen mit niedrigen, mittleren und hohen Nachfrageschwankungen der Poissonverteilung, negativen Binomialverteilung und der Normalverteilung            | 285 |
| Abbildung 5.18: Originalzeitreihe und Prognosen des MLP. $SE$ auf den stationären Zeitreihen $NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $NV_{\text{hoch}}$ (c.)                                          | 290 |
| Abbildung 5.19: Streudiagramme der Prognosewerte auf Trainings-, Validierungs- und Testmenge durch MLP. $SE$ auf den Zeitreihen $NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $NV_{\text{hoch}}$ (c.)       | 291 |
| Abbildung 5.20: Originalzeitreihe und Prognosen des MLP. $SE$ auf den saisonalen Zeitreihen $S.NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $S.NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $S.NV_{\text{hoch}}$ (c.)                                     | 291 |
| Abbildung 5.21: Streudiagramme der Prognosewerte auf Trainings-, Validierungs- und Testmenge durch MLP. $SE$ auf den Zeitreihen $S.NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $S.NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $S.NV_{\text{hoch}}$ (c.) | 292 |
| Abbildung 5.22: Originalzeitreihe und Prognosen des MLP. $SE$ (a.), des MLP. $ACF_1$ (b.), des MLP. $ACF_2$ (c.) und des MLP. $ACF_3$ (d.) auf der stationären Zeitreihe $NV_{\text{mittel}}$                           | 292 |
| Abbildung 5.23: Originalzeitreihe und Prognosen des MLP. $AE$ (a.), des MLP. $ACF_1$ (b.), des MLP. $ACF_2$ (c.) und des MLP. $ACF_3$ (d.) auf der saisonalen Zeitreihe $S.NV_{\text{mittel}}$                          | 294 |
| Abbildung 5.24: Originalzeitreihe und Prognose des MLP. $ACF_3$ auf den stationären Zeitreihen $NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $NV_{\text{hoch}}$ (c.)                                        | 295 |
| Abbildung 5.25: Originalzeitreihe und Prognosen des MLP. $ACF_3$ auf den saisonalen Zeitreihen $S.NV_{\text{niedrig}}$ (a.), $S.NV_{\text{mittel}}$ (b.) und $S.NV_{\text{hoch}}$ (c.)                                  | 295 |
| Abbildung 5.26: Streudiagramme der Prognosewerte auf Trainings-, Validierungs- und Testmenge für alle Zielfunktionen und alle Zeitreihen mit normalverteiltem Bedarfsverlauf                                            | 297 |

|                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 5.27: Verteilung der $\alpha$ -Servicegrade über alle MLP der Trainingsmenge (a.), der Validierungsmenge (b.) und der Testmenge (c.) für die Zielfunktionen $SE$ , $ACF_1$ , $ACF_2$ und $ACF_3$ ..... | 299 |
| Abbildung 5.28: Prozessketten der Disposition mit statistischen Prognoseverfahren (a.), MLP. $SE$ als Prognoseverfahren (b.) und MLP. $ACF$ mit asymmetrischen Zielfunktionen zur Disposition (c.).....          | 310 |
| Abbildung 6.1: Systematik zur Einteilung von Automatentypen .....                                                                                                                                                | 319 |
| Abbildung 6.2: Lagersystem der Warenautomaten.....                                                                                                                                                               | 322 |
| Abbildung 6.3: Prozess der Warendisposition und Befüllung an Warenautomaten .....                                                                                                                                | 323 |
| Abbildung 6.4: Konstituenten des Lagerhaltungsproblems an Warenautomaten .....                                                                                                                                   | 324 |
| Abbildung 6.5: Zeitreihen des aggregierten Absatzes aller Zeitreihen der Absatzstellen AU-1 (a.), AU-2 (b.), IN-1 (c.), IN-2 (d.) und IN-3 (e.) .....                                                            | 331 |
| Abbildung 6.6: ACF (a.) und PACF (b.) der Originalzeitreihe sowie ACF (c.) und PACF (d.) der ersten Differenzen des Absatzes an Abverkaufsstelle AU-1 .....                                                      | 333 |
| Abbildung 6.7: ACF (a.) und PACF (b.) der Originalzeitreihe sowie ACF (c.) und PACF (d.) der ersten Differenzen des Absatzes an Abverkaufsstelle AU-2 .....                                                      | 333 |
| Abbildung 6.8: ACF (a.) und PACF (b.) der Originalzeitreihe sowie ACF (c.) und PACF (d.) der ersten Differenzen des Absatzes an Abverkaufsstelle IN-1 .....                                                      | 334 |
| Abbildung 6.9: ACF (a.) und PACF (b.) der Originalzeitreihe sowie ACF (c.) und PACF (d.) der ersten Differenzen des Absatzes an Abverkaufsstelle IN-2 .....                                                      | 335 |
| Abbildung 6.10: ACF (a.) und PACF (b.) der Originalzeitreihe sowie ACF (c.) und PACF (d.) der ersten Differenzen des Absatzes an Abverkaufsstelle IN-2 .....                                                     | 335 |
| Abbildung 6.11: Zeitreihen von Artikeln mit langsamem Warenumsatz (AU-1-08 (a.) und AU-1-10 (b.)) und mit schnellem Warenumsatz (AU-1-01 (c.) und AU-1-09 (d.)).....                                             | 337 |
| Abbildung 6.12: ABC-Analyse des mittleren Absatzes über alle Abverkaufsstellen.....                                                                                                                              | 340 |
| Abbildung 6.13: Übersicht der Prognoseverfahren in der Vergleichsstudie.....                                                                                                                                     | 347 |
| Abbildung 6.14: Prognosefehler des $mwMAE$ aller Verfahren auf den Testdaten über alle Zeitreihen .....                                                                                                          | 359 |
| Abbildung 6.15: Box-Whisker-Grafiken des $mwMAE$ auf den Testdaten über alle Zeitreihen .....                                                                                                                    | 364 |
| Abbildung 6.16: Korrelationsdiagramm der Trainings-, Validierungs- und Testfehler des $mwMAE$ (a.) und des $Rang\ mwMAE$ (b.) über alle Zeitreihen. ....                                                         | 366 |
| Abbildung 6.17: Korrelationsdiagramm der Validierungs- und Testfehler des $mwMAE$ (a.) und des $Rang\ mwMAE$ (b.) über alle Zeitreihen.....                                                                      | 367 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 6.18: Kumulierte $mwMAE$ je Absatzstelle AU-1, AU-2, IN-1 und IN-2 auf der Testmenge .....                                                                                                | 371 |
| Abbildung 6.19: Prognosegüte der multivariaten Verfahren mv.MLP und mv.EXP.ES nach $MAE$ je Zeitreihe auf der Testmenge der Außenautomaten (a.) und der Innenautomaten (b.) .....                   | 375 |
| Abbildung 6.20: Prognosegüte der univariaten Verfahren MLP und ausgewählter statistischer Verfahren nach $MAE$ je Zeitreihe an Außenautomaten (a.) und Innenautomaten (b.) .....                    | 375 |
| Abbildung 6.21: Dispositionskosten der Prognoseverfahren nach $mwMLLC$ auf den Testdaten über alle Zeitreihen .....                                                                                 | 382 |
| Abbildung 6.22: Box-Whisker-Graphen der Dispositionskosten nach $mwMLLC$ der Testdaten über alle Zeitreihen .....                                                                                   | 384 |
| Abbildung 6.23: Dispositionsgüte der multivariaten Verfahren mv.MLP.ACF, mv.MLP und mv.EXP.ES nach $MLLC$ je Zeitreihe auf den Testmengen der Außenautomaten (a.) und der Innenautomaten (b.) ..... | 394 |
| Abbildung 6.24: Dispositionsgüte der univariaten Verfahren MLP, NF1, S.ES, und EXP.ES&ARIMA nach $MLLC$ je Zeitreihe an Außenautomaten (a.) und Innenautomaten (b.) .....                           | 395 |
| Abbildung 6.25: Streudiagramm der Prognosefehler nach $mwMAE$ und der Dispositionskosten nach $mwMLLC$ je Prognoseverfahren .....                                                                   | 400 |
| Abbildung 6.26: Streudiagramme der Prognosefehler nach $Rang\ mwMAE$ und der Dispositionskosten nach $Rang\ mwMLLC$ je Prognoseverfahren .....                                                      | 402 |

## Tabellenverzeichnis

|               |                                                                                    |     |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 2.1:  | Systematik der Bedarfsarten, Modelle und Verfahren der Bedarfsrechnung .....       | 26  |
| Tabelle 2.2:  | Systematik der Strukturdimensionen von Bestellmengenmodellen .....                 | 40  |
| Tabelle 2.3:  | Entscheidungsvariablen der Bestellmengenmodelle.....                               | 55  |
| Tabelle 2.4:  | Deskriptive Fehler zur Beurteilung der Dispositionsgüte.....                       | 62  |
| Tabelle 2.5:  | Deskriptive Fehlermaße zur Beurteilung der Dispositionsgüte.....                   | 64  |
| Tabelle 3.1:  | Kategorisierung statistischer Modelle nach dem Skalenniveau der Variablen.....     | 74  |
| Tabelle 3.2:  | Systematik der Determinanten von Erklärungs- und Prognosemodellen.....             | 85  |
| Tabelle 3.3:  | Fristen und Kalenderzeiträume von Prognosenverfahren.....                          | 86  |
| Tabelle 3.4:  | Prognosefehler zur Beurteilung der Prognosegenauigkeit.....                        | 131 |
| Tabelle 3.5:  | Statistische Fehlermaße zur Beurteilung der Prognosegenauigkeit.....               | 134 |
| Tabelle 4.1:  | Eingabefunktionen in Neuronen .....                                                | 170 |
| Tabelle 4.2:  | Kategorisierung Neuronaler Netze nach den Skalenniveaus der Variablen.....         | 215 |
| Tabelle 4.3:  | Publikationen zur Absatzprognose mit Neuronalen Netzen .....                       | 223 |
| Tabelle 5.1:  | Ausgabewerte und Konfusionsmatrix des $SE(e)$ für nominal skalierte Ausgaben ..... | 248 |
| Tabelle 5.2:  | Ausgabewerte und Konfusionsmatrix des $SE(e)$ für binäre Ausgaben.....             | 248 |
| Tabelle 5.3:  | Ausgabewerte und Konfusionsmatrix des $SE(e)$ für metrische Ausgaben.....          | 248 |
| Tabelle 5.4:  | Asymmetrische Kostenfunktionen zur Beurteilung der Entscheidungskosten.....        | 271 |
| Tabelle 5.5:  | Parameter der asymmetrischen Zielfunktionen im Experiment.....                     | 286 |
| Tabelle 5.6:  | $\alpha$ -Servicegrade aller MLP je Datenmenge und Zeitreihe .....                 | 298 |
| Tabelle 5.7:  | $\alpha$ - Servicegrade aller MLP je Datenmenge und Zeitreihenmuster .....         | 300 |
| Tabelle 5.8:  | Fehlermaße und Kostenmaße aller MLP je Datenmenge über alle Zeitreihen .....       | 302 |
| Tabelle 5.9:  | Ausgewählte Prognosemodelle je Zeitreihe durch das Expertensystem .....            | 304 |
| Tabelle 5.10: | Servicegrade und Dispositionskosten der Verfahren auf stationären Zeitreihen ..... | 305 |
| Tabelle 5.11: | Servicegrade und Dispositionskosten der Verfahren auf saisonalen Zeitreihen .....  | 306 |

|               |                                                                                                        |     |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 5.12: | Mittlere Dispositionskosten der Verfahren nach Verlauf und Verteilung der Zeitreihe .....              | 307 |
| Tabelle 5.13: | Mittlere Ränge der Dispositionskosten der Verfahren nach Verlauf und Verteilung der Zeitreihe .....    | 308 |
| Tabelle 6.1:  | Statistik der Verpflegungsautomaten in Europa (ohne Zigarettenautomaten) .....                         | 321 |
| Tabelle 6.2:  | Determinanten der Disposition an Warenautomaten .....                                                  | 327 |
| Tabelle 6.3:  | Stichprobe der Absatzstellen und Zeitreihen .....                                                      | 329 |
| Tabelle 6.4:  | Parameter der aggregierten Zeitreihen je Absatzstelle nach Standort .....                              | 330 |
| Tabelle 6.5:  | Kolmogorov-Smirnow-Tests der Absatzzeitreihen auf unterschiedliche Verteilungsformen .....             | 338 |
| Tabelle 6.6:  | Korrelationskoeffizienten nach SPEARMANS rho der Zeitreihen der Absatzstelle AU-1 .....                | 339 |
| Tabelle 6.7:  | Lageparameter und Klassifikation der Zeitreihen nach Absatzstellen .....                               | 341 |
| Tabelle 6.8:  | Mittlere Lageparameter und Zeitreihenverläufe nach Absatzstelle und Standort .....                     | 342 |
| Tabelle 6.9:  | Mittlere Lageparameter der Kategorien von Zeitreihen .....                                             | 343 |
| Tabelle 6.10: | Systematik der Zeitreihen Kategorien .....                                                             | 344 |
| Tabelle 6.11: | Dimensionen des Verfahrensvergleichs nach Prognosemodell und -verfahren .....                          | 345 |
| Tabelle 6.12: | Übersicht der Verfahren zur Absatzprognose in der Vergleichsstudie .....                               | 352 |
| Tabelle 6.13: | Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests auf Unterschiede in den Prognosefehlern des <i>mwMAE</i> .....          | 360 |
| Tabelle 6.14: | Fehlermaße und Rang der Fehlermaße des MAE über alle Absatzstellen .....                               | 362 |
| Tabelle 6.15: | Korrelationen von Trainings-, Validierungs- und Testfehler der <i>mwMAE</i> .....                      | 366 |
| Tabelle 6.16: | Fehlermaße und Rang der Fehlermaße des <i>MAPE</i> über alle Absatzstellen .....                       | 368 |
| Tabelle 6.17: | Summe, Mittelwert und Rang des <i>MAE</i> je Absatzstelle .....                                        | 370 |
| Tabelle 6.18: | <i>mdMAE</i> und Rang <i>mdMAE</i> nach Absatzstellen .....                                            | 372 |
| Tabelle 6.19: | Summen des Rang <i>mwMAE</i> und entsprechende Rangordnung je Absatzstelle .....                       | 373 |
| Tabelle 6.20: | Korrelationen der Trainings-, Validierungs- und Testfehler der <i>mwMAE</i> nach Absatzstelle .....    | 374 |
| Tabelle 6.21: | <i>mwMAE</i> und <i>mdMAE</i> über alle Zeitreihen nach Absatzverlauf .....                            | 377 |
| Tabelle 6.22: | <i>mwMAE</i> , <i>mdMAE</i> und Rangordnung über alle Absatzstellen nach Umschlaggeschwindigkeit ..... | 378 |

|               |                                                                                                   |     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabelle 6.23: | <i>mwMAE</i> und <i>mdMAE</i> über alle Zeitreihen nach Artikelklassifikation.....                | 380 |
| Tabelle 6.24: | Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test auf Unterschiede in den Dispositionskosten nach <i>mwMLLC</i> ..... | 383 |
| Tabelle 6.25: | <i>MLLC</i> Kosten der Warenbestände und Rang nach <i>MLLC</i> über alle Absatzstellen.....       | 386 |
| Tabelle 6.26: | Mittlere Servicegrade, Abweichungen vom 96,5%-Soll-Servicegrad und Rang über alle Zeitreihen..... | 388 |
| Tabelle 6.27: | Summen und Mittelwerte der <i>MLLC</i> der Warenbestände je Absatzstelle.....                     | 390 |
| Tabelle 6.28: | Mediane der <i>MLLC</i> der Warenbestände je Absatzstelle.....                                    | 391 |
| Tabelle 6.29: | Summe der Ränge nach <i>sumMLLC</i> der Warenbestände je Absatzstelle.....                        | 392 |
| Tabelle 6.30: | Mittlere Servicegrade, Abweichungen vom 96,5%-Soll-Servicegrad und entsprechender Rang.....       | 393 |
| Tabelle 6.31: | <i>mwMLLC</i> und <i>mdMLLC</i> über alle Zeitreihen nach Absatzverlauf.....                      | 396 |
| Tabelle 6.32: | <i>mwMLLC</i> und <i>mdMLLC</i> über alle Absatzstellen nach Umschlagsgeschwindigkeit.....        | 398 |
| Tabelle 6.33: | <i>mwMLLC</i> und <i>mdMLLC</i> über alle Zeitreihen nach Artikelklassifikation.....              | 399 |

**Abkürzungsverzeichnis**

|         |                                                      |
|---------|------------------------------------------------------|
| Abb.    | Abbildung                                            |
| ABC     | Artikelklassifikation als A-, B- oder C-Artikel      |
| ACF     | Asymmetrische Kostenfunktion                         |
| ADALINE | adaptive linear element                              |
| ADF     | Augmented Dickey Fuller                              |
| ADL     | Autoregressive Distributed Lag                       |
| AKF     | Autokorrelationsfunktion                             |
| ANOVA   | Analysis of Variance                                 |
| APICS   | The Association for Operations Management            |
| AR      | Autoregressive                                       |
| ARCH    | Autoregressive Conditional Heteroscedasticity        |
| ARIMA   | Autoregressive Integrierte Moving Average            |
| ARIMAX  | ARIMA mit kausalen Interventionen X                  |
| ARIS    | Architektur Integrierter Informationssysteme         |
| ARMA    | Autoregressive Moving Average                        |
| ARX     | Regressionsmodell mit Interventionsmodellierung      |
| ATM     | Automat                                              |
| AU      | Außenautomat                                         |
| Aufl.   | Auflage                                              |
| Bd.     | Band                                                 |
| BDV     | Bundesverband der Deutschen Vending-Unternehmen      |
| bzw.    | beziehungsweise                                      |
| cdf     | cumulative distribution function                     |
| CM      | Category Management                                  |
| CPFR    | Collaborative Planning Forecasting and Replenishment |
| D.ES    | Doppelte Exponentielle Glättung                      |
| d.h.    | das heißt                                            |
| DGOR    | Deutsche Gesellschaft für Operations Research        |
| DHI     | Deutsches Handelsinstitut                            |
| Diss.   | Dissertation                                         |
| DM      | Deutsche Mark                                        |
| DPR     | Direkte Produktrentabilität                          |
| DT.ES   | Dampened Trend Exponential Smoothing                 |
| ECR     | Efficient Consumer Response                          |
| Ed.     | Edition                                              |
| EHl     | Europäisches Handelsinstitut                         |
| engl.   | englisch                                             |
| ENNS    | European Neural Network Society                      |
| EOQ     | Economic Order Quantity                              |
| ES      | Exponentielle Glättung                               |
| et al.  | et alii                                              |
| etc.    | et cetera                                            |
| EV      | Erlangverteilung                                     |
| EXP     | Expertensystem                                       |
| f.      | folgende Seite                                       |
| FDI     | Association of Food Distributors International       |
| ff.     | fortlaufend folgende Seiten                          |
| FL      | Filiallager                                          |
| FMI     | Food Marketing Institute                             |

|          |                                                        |
|----------|--------------------------------------------------------|
| GB       | Gigabyte                                               |
| GE       | Geldeinheiten                                          |
| GFFN     | Generalised-Feed-Forward Neural Network                |
| ggf.     | gegebenenfalls                                         |
| GHz      | Gigahertz                                              |
| GMA      | Association of the Grocery Manufacturers of America    |
| GOR      | Deutsche Gesellschaft für Operations Research          |
| GRNN     | General Regression Neural Network                      |
| HBF NN   | Hyper-Basisfunktions-Neuronales Netz                   |
| Hrsg.    | Herausgeber                                            |
| hrsg.    | herausgegeben                                          |
| i. A.    | im Allgemeinen                                         |
| i. d. R. | in der Regel                                           |
| i. e. S. | im engeren Sinn                                        |
| i. w. S. | im weiteren Sinn                                       |
| IBF      | Institute of Business Forecasting                      |
| ICANN    | International Conference on Artificial Neural Networks |
| Id       | Identitätsfunktion                                     |
| IEEE     | Institute of Electrical Engineers (auch Ieee)          |
| IIF      | International Institute of Forecasting                 |
| IJCNN    | International Joint Conference on Neural Networks      |
| IJF      | International Journal of Forecasting                   |
| IN       | Innenautomat                                           |
| INNS     | International Neural Network Society                   |
| IT       | Informations- und Kommunikationstechnologie            |
| Jg.      | Jahrgang                                               |
| JNN      | Jordan Neural Network                                  |
| KS       | Kolmogorov-Smirnow                                     |
| Kurt     | Kurtosis von Beobachtungen                             |
| KW       | Kalenderwoche                                          |
| L.ES     | Lineare Exponentielle Glättung                         |
| LMS      | Least Mean Squares                                     |
| Log      | Logistische Funktion                                   |
| LTD      | Lead Time Demand                                       |
| LVQ NN   | Learning Vector Quantisation Neural Network            |
| MA       | Moving-Average                                         |
| MDE      | Mobile Datenerfassung                                  |
| ME       | Mengeneinheiten                                        |
| MLP      | Multilayer Peceptron                                   |
| mv       | multivariate                                           |
| MW       | Prognoseverfahren eines Mittelwertes                   |
| NAMA     | National Automatic Merchandising Association           |
| NB       | Negative Binomialverteilung                            |
| NF1      | Naives Prognoseverfahren ohne Trend und Saison         |
| NF2      | Naives Prognoseverfahren für Trend                     |
| NF3      | Naives Prognoseverfahren für Saison                    |
| NN       | künstliche Neuronale Netze                             |
| Nr.      | Nummer                                                 |
| NuP %    | Anteil der Nullperioden von Beobachtungen              |

---

|         |                                                          |
|---------|----------------------------------------------------------|
| NuP     | Anzahl der Nullperioden der Zeitreihe                    |
| NV      | Normalverteilung                                         |
| o. S.   | ohne Seitenangabe                                        |
| o. V.   | ohne Verfasserangabe                                     |
| OOS     | out of stock                                             |
| PAKF    | Partielle Autokorrelationsfunktion                       |
| PC      | Personal Computer                                        |
| pdf     | probability density function                             |
| pmf     | probability mass function                                |
| PNN     | Probabilistisches Neuronales Netz                        |
| POS     | point of sale                                            |
| PV      | Poissonverteilung                                        |
| RBF NN  | Radiale Basisfunktions Neuronales Netz                   |
| RL      | Regionallager                                            |
| RV      | Zufallsvariable                                          |
| S&OP    | Sales and Operations Planning                            |
| S.      | Seite                                                    |
| S.ES    | Einfache Exponentielle Glättung                          |
| SARIMAX | Saisonale ARIMA-Modelle mit kausalen Interventionen      |
| SCM     | Supply Chain Management                                  |
| SE      | Squared Error                                            |
| Skew    | Skewness von Beobachtungen                               |
| SKU     | stock keeping unit                                       |
| sog.    | sogenannt                                                |
| STAR    | Smooth Transition Autoregression                         |
| StdAb   | Standardabweichung von Beobachtungen                     |
| Sum     | Summe                                                    |
| SVR     | Support Vector Regression                                |
| Tab.    | Tabelle                                                  |
| TanH    | Hyperbolischer Tangens                                   |
| TDNN    | Time Delay Neural Network                                |
| TOUR    | Tourenfahrzeug                                           |
| u. a.   | unter anderem                                            |
| u. U.   | unter Umständen                                          |
| UPoS    | unattended point of sale                                 |
| US      | United States of America, Vereinigte Staaten von Amerika |
| usw.    | und so weiter                                            |
| VaKo    | Variationskoeffizient von Beobachtungen                  |
| VAR     | Vector Autoregressive                                    |
| vgl.    | vergleiche                                               |
| VMI     | Vendor Managed Inventory                                 |
| Vol.    | Volume                                                   |
| VR      | Verkaufsraum                                             |
| XOR     | logisches „Entweder-oder“-Problem                        |
| z. B.   | zum Beispiel                                             |
| z. T.   | zum Teil                                                 |
| ZE      | Zeiteinheiten                                            |
| ZL      | Zentrallager                                             |
| ZNS     | Zentrales Nervensystem                                   |

## Symbolverzeichnis

### Warendisposition

|              |                                                                                         |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| $a$          | Anfangsbestand des Lagers am Periodenanfang [ME]                                        |
| $\alpha$     | Maßzahl des $\alpha$ -Servicegrades von Fehlmengen                                      |
| $\beta$      | Maßzahl des $\beta$ -Servicegrades von Fehlmengen                                       |
| $C_B$        | Bestellkosten in [GE]                                                                   |
| $C_F$        | Fehlmengenkosten in [GE]                                                                |
| $C_{F,L}$    | Fehlmengenkosten im Verlustfall in [GE]                                                 |
| $C_{F,V}$    | Fehlmengenkosten im Vormerkfall in [GE]                                                 |
| $C_L$        | Lagerungskosten [GE]                                                                    |
| $c_B$        | variable Stückkosten der Bestellung in [GE / ME]                                        |
| $c_{F,L}$    | Fehlmengenkosten des entgangenen Gewinns im Verlustfall [GE / ME]                       |
| $c_{F,V}$    | Fehlmengenkosten der Lieferverzögerungen im Vormerkfall [GE / ME]                       |
| $c_{G,V}$    | Fehlmengenkosten des Goodwill-Verlustes im Verlustfall [GE / ME]                        |
| $c_{G,V}$    | Fehlmengenkostensatz des Goodwill-V. im Vormerkfall [GE / ME * ZE]                      |
| $c_L$        | variable Lagerhaltungskosten [GE/ME*ZE]                                                 |
| $c_o$        | Kosten der Bedarfsüberdeckung                                                           |
| $c_u$        | Kosten der Bedarfsunterdeckung                                                          |
| $g$          | Schrottwert [GE/ME]                                                                     |
| $l$          | Lagerkostensatz in Prozent des gebundenen Kapitals [% / ZE]                             |
| $p$          | Einstandspreis der Ware pro Stück [GE / ME], auch Verkaufspreis                         |
| $q$          | konstante Bestellmenge (Losgröße) über alle Planungsperioden [ME]                       |
| $q^*$        | optimale Bestellmenge [ME]                                                              |
| $q_F$        | Höhe der Fehlmenge in [ME]                                                              |
| $q_i$        | Bestellmenge in der Planungsperiode $i$ [ME]                                            |
| $r$          | Bestellrhythmus in [ZE], bei konstanten Bestellzyklen $\tau_i = \tau_{i+1} = \dots = r$ |
| $S$          | Bestellniveau des Lagerbestandes [ME]                                                   |
| $S^*$        | optimales Bestellniveau des Lagerbestandes [ME]                                         |
| $s$          | Bestellpunkt [ME]                                                                       |
| $s^*$        | optimaler Bestellpunkt [ME]                                                             |
| $\tau$       | Bestellzyklus in [ZE], als Zeit zwischen zwei Bestellterminen $t_i$ und $t_{i+1}$       |
| $\tau^*$     | optimaler Bestellzyklus in [ZE]                                                         |
| $t$          | Zeitpunkt [ - ], von $t=1, 2, \dots, T$ , auch Planungsperiode                          |
| $t_i$        | Zeitpunkt in der Planungsperiode $i$ [ - ], z. B. ein Bestelltermin                     |
| $t'_i$       | Wareneingangstermin der Bestellung in $t_i$ in [ - ]                                    |
| $\Delta t_A$ | Auftragsvorbereitungszeit in [ZE]                                                       |
| $\Delta t_E$ | Einlagerungszeit in [ZE]                                                                |
| $\Delta t_F$ | zeitliche Dauer einer Fehlmengensituation im Vormerkfall in [ZE]                        |
| $\Delta t_L$ | Lieferzeit in [ZE]                                                                      |
| $\Delta t_U$ | Überprüfungsintervall in [ZE]                                                           |
| $\Delta t_W$ | Wiederbeschaffungszeit in [ZE]                                                          |
| $W$          | Restbestand des Lagers am Periodenende [ME]                                             |
| $Y$          | Zufallsvariable des Bedarfs                                                             |
| $y_t$        | Bedarf in der Periode $t$ in [ME/ZE] (ebenso Absatz bzw. Nachfrage)                     |

**Prognose**

|                |                                                                               |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $AE_{t+h}$     | Statistisches Fehlermaß des <i>absolute error</i>                             |
| $APE_{t+h}$    | Statistisches Fehlermaß des <i>absolute percent error</i>                     |
| $AR(p)$        | Autoregressiver Prozess der Ordnung $p$                                       |
| $a_i$          | Parameter eines Mittelwertes, für $i=1, 2, \dots, I$                          |
| $ACF$          | Kostenmaß der asymmetrischen Kosten                                           |
| $\alpha$       | Alpha-Glättungsparameter für das Niveau der Zeitreihe zur ES                  |
| $b_i$          | Parameter eines Regressionsmodells, für $i=1, 2, \dots, I$                    |
| $b_0$          | Konstanter Regressionsparameter                                               |
| $B$            | Backshift-Operator der ARIMA-Notation                                         |
| $\beta$        | Beta-Glättungsparameter für den Trend der Zeitreihe zur ES                    |
| $d$            | Grad der Integration der Zeitreihen $I(d)$ Prozesses                          |
| $D$            | Grad der saisonalen Integration der Zeitreihen $SI(D)_s$ Prozesses            |
| $e_t$          | Prognosefehler im Zeitpunkt $t$                                               |
| $E_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>simple error</i>                               |
| $E(Y)$         | Erwartungswert von $Y$                                                        |
| $E_t$          | irreguläre Komponente einer Zeitreihe                                         |
| $\varepsilon$  | Zufallsvariable, unerklärter Rest der Modellierung                            |
| $F_Y(y)$       | kumulierte Verteilungsfunktion (cdf) des Auftretens von $y$                   |
| $\phi$         | Parameter eines $AR(p)$ -Prozesses                                            |
| $\Phi_i$       | Parameter eines saisonalen $SAR(p)$ -Prozesses                                |
| $GMRAE_{m,h}$  | Komparatives Fehlermaß des <i>geometric mean relative absolute error</i>      |
| $\gamma$       | Gamma-Glättungsparameter für das Niveau der Zeitreihe zur ES                  |
| $\gamma(x, y)$ | Kovarianz von $x$ und $y$ , auch: $cov(x, y)$                                 |
| $H_i$          | Nullhypothese $i$                                                             |
| $h$            | Prognosehorizont [ZE], mit $h=1, 2, \dots, H$                                 |
| $PV(\mu)$      | Poissonverteilung mit dem Parameter $\mu$                                     |
| $f_Y(y)$       | Wahrscheinlichkeitsfunktion (PDF) des Auftretens von $y$                      |
| $I(d)$         | Integration der Zeitreihe der Ordnung $d$                                     |
| $i$            | Index, u. a. für Planungsperiode [ - ]                                        |
| $I_t$          | Informationsgrad im Zeitpunkt $t$                                             |
| $k$            | Sicherheitsfaktor für standardisierte Verteilungstabellen                     |
| $L_t$          | Zeitreihenkomponente des Niveaus                                              |
| $l$            | Lag der zeitlichen Verzögerung [ZE], mit $l=1, 2, \dots, L$                   |
| $l_i$          | Grad $i$ der Verlustfunktion, auch $R$ in Minkowski- $R$ -Norm                |
| $l_1$          | Lineare Verlustfunktion des $AE(e)$                                           |
| $l_2$          | Quadratische Verlustfunktion des $SE(e)$                                      |
| Max            | Maximum von Beobachtungen                                                     |
| $MA(q)$        | Moving-Average-Prozess der Ordnung $q$                                        |
| $MACF$         | Kostenmaß der mittleren asymmetrischen Kosten                                 |
| $MAD_{t+h}$    | Statistisches Fehlermaß des <i>mean absolute deviation</i> , auch $MAE_{t+h}$ |
| $MAE_{t+h}$    | Statistisches Fehlermaß des <i>mean absolute error</i> , auch $MAD_{t+h}$     |
| $MAPE_{t+h}$   | Statistisches Fehlermaß des <i>mean absolute percent error</i>                |
| $MdAPE_{t+h}$  | Statistisches Fehlermaß des <i>median absolute percent error</i>              |
| $md$           | Median, auch Med                                                              |
| $ME_{t+h}$     | Statistisches Fehlermaß des <i>mean error</i>                                 |
| $mw$           | Arithmetisches Mittel, auch Mw                                                |
| Med            | Median von Beobachtungen, auch md                                             |

**Prognose (fortgesetzt)**

|                  |                                                                             |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Min              | Minimum von Beobachtungen                                                   |
| $MPE_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>mean percent error</i>                       |
| $MSE_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>mean squared error</i>                       |
| Mw               | Mittelwert von Beobachtungen                                                |
| $\mu$            | Mittelwert                                                                  |
| $N(\mu, \sigma)$ | Normalverteilung mit den Parametern $\mu$ , $\sigma$                        |
| $n$              | Gegenwartszeitpunkt, für $t = n$                                            |
| $n$              | Stichprobengröße der Anzahl von Beobachtungswerten                          |
| $OOS(e)$         | Deskriptives Fehlermaß des Auftretens einer Fehlmengensituation             |
| $OOU(e)$         | Deskriptives Fehlermaß der Anzahl unterbundener Verkäufe                    |
| $OVS(e)$         | Deskriptives Fehlermaß des Auftretens einer Überbevorratungssituation       |
| $OVU(e)$         | Deskriptives Fehlermaß der Anzahl überbevorrateter Mengen                   |
| $P$              | Ordnung des saisonalen autoregressiven $SAR(P)_s$ Prozesses                 |
| $p$              | Eintrittswahrscheinlichkeit                                                 |
| $p$              | Ordnung des autoregressiven $AR(p)$ Prozesses                               |
| $PB_{m,h}$       | Komparatives, statistisches Fehlermaß des <i>percent better</i>             |
| $PE_{t+h}$       | Statistisches Fehlermaß des <i>percent error</i>                            |
| $\rho_Y(y)$      | Wahrscheinlichkeitsfunktion (pmf) des Auftretens von $y$                    |
| $Q$              | Ordnung des saisonalen moving average $SMA(Q)_s$ Prozesses                  |
| $q$              | Ordnung des moving average $MA(q)$ Prozesses                                |
| $R$              | Grad der Minkowski- $R$ -Metrik, auch $i$ in $l_i$                          |
| $RAE_{t+h}$      | Komparatives, statistisches Fehlermaß des <i>relative absolute error</i>    |
| $RMSE_{t+h}$     | Statistisches Fehlermaß des <i>root mean squared error</i>                  |
| $RSE_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>root of squared error</i>                    |
| $s$              | Länge des Saisonzyklus                                                      |
| $SAE_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>sum of absolute errors</i>                   |
| $SE_{t+h}$       | Statistisches Fehlermaß des <i>squared error</i>                            |
| $SSE_{t+h}$      | Statistisches Fehlermaß des <i>sum of squared errors</i>                    |
| $S_t$            | Saisonfaktor                                                                |
| $S_t$            | Zeitreihenkomponente der Saison                                             |
| $s_Y$            | empirische Standardabweichung der Stichprobe von $Y$                        |
| $s_Y^2$          | empirische Varianz der Stichprobe von $Y$                                   |
| $sum$            | Summe                                                                       |
| $\hat{\sigma}_y$ | Prognose der Standardabweichung von $Y$                                     |
| $\sigma_y$       | Standardabweichung von $Y$                                                  |
| $\sigma_y^2$     | Varianz von $Y$ , auch: $\text{var}(Y)$                                     |
| $T_t$            | Zeitreihenkomponente des Trends                                             |
| $\theta_i$       | Parameter eines $MA(q)$ -Prozesses                                          |
| $\Theta_i$       | Parameter eines saisonalen $SMA(q)$ -Prozesses                              |
| $U_t$            | Komparatives, statistisches Fehlermaß der U-Statistik nach THEIL            |
| $WSE_{t+h}$      | Komparatives, statistisches Fehlermaß des <i>winsorised error</i>           |
| $x_{i,t}$        | unabhängige Variable $x_i$ in der Periode $t$ zur Erklärung des Bedarfs $y$ |
| $Y$              | Zufallsvariable des stochastischen Bedarfs                                  |
| $y_{t-l}$        | abhängige Variable des Bedarfs $y$ in der Periode $t-l$                     |
| $\bar{y}$        | empirischer Mittelwert des Bedarfs $y$                                      |
| $\hat{y}_Y$      | Prognose des Bedarfs $y$                                                    |
| $\hat{y}_{t+h}$  | Prognose des Bedarfs $y$ für die Periode $t+h$                              |

## Neuronale Netze

|               |                                                                     |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|
| $A$           | Parameter der Netzwerkarchitektur, mit $A=[V, T, W, K]$             |
| $B$           | Methode zur Steuerung des Lernprozesses                             |
| Bin           | Binäre Aktivierungsfunktion                                         |
| $DF$          | Direkte Feedback-Struktur der $w_{ij}$ , Spezifikation von $W$      |
| $\varepsilon$ | Epsilon-Parameter der Support Vector Regression                     |
| $\eta$        | Lernrate                                                            |
| $FF$          | Feed-Forward-Struktur der $w_{ij}$ , Spezifikation von $W$          |
| $F_H$         | Aktivierungsfunktion                                                |
| $F_I$         | Eingabefunktion                                                     |
| $F_O$         | Ausgabefunktion                                                     |
| $f_{act}$     | Aktivierungsfunktion                                                |
| $f_{out}$     | Ausgabefunktion                                                     |
| $G$           | Lernalgorithmus des NN                                              |
| Id            | Identitätsfunktion                                                  |
| $I^N$         | Anzahl der Initialisierungen                                        |
| $I^P$         | Prozedur zur Bestimmung der Startgewichte                           |
| $IF$          | Indirekte Feedback-Struktur der $w_{ij}$ , Spezifikation von $W$    |
| $K$           | Parameter der Aktivierungsstrategie                                 |
| $L$           | Parameter des Lernprozesses                                         |
| $LF$          | Laterale Feedback-Struktur von $w_{ij}$ , Spezifikation von $W$     |
| Log           | Logistische Funktion                                                |
| $N_{Hn}$      | Anzahl Neuronen in der $n$ -ten versteckten Schicht                 |
| $N_I$         | Anzahl Neuronen in der Eingabeschicht                               |
| $net_j$       | (Netz-)Eingabefunktion in das Neuron $j$                            |
| $O$           | Zielfunktion im Training eines NN                                   |
| $o_j$         | Ausgabewert des Neurons $j$                                         |
| $P_{T,L}$     | Lernparameter für jede Phase $T$ je Neuronenschicht $L$             |
| $S$           | Vorgehensweise zur Auswahl einer der Netzwerkinitialisierungen      |
| $SC$          | Schichtübergreifende $w_{ij}$ , Spezifikation von $W$               |
| Sum           | Summe                                                               |
| $\delta_j$    | Fehler der Netzwerkausgabe am Neuron $j$                            |
| $T$           | Parameter der Netzwerktopologie                                     |
| $T$           | Temperaturparameter zur Kontrolle der Steigung von Log              |
| TanH          | Hyperbolischer Tangens                                              |
| $t_j$         | Lerneingabe, Soll-Ausgabewert des Neurons $j$                       |
| $\theta_j$    | Schwellwert der Aktivierung des Neurons $j$                         |
| $u_i$         | Neuron $i$                                                          |
| $V$           | Parameter der Signalverarbeitung im Neuron, mit $V=[F_I, F_H, F_O]$ |
| $W$           | Gewichtsmatrix aller Verbindungsgewichte $w_{ij}$                   |
| $w_{ij}$      | Verbindungsgewicht zwischen Neuron $i$ und $j$                      |

## 1 Einleitung

Die wirtschaftliche Beschaffung und Bereitstellung von Waren zur Bedarfsbefriedigung der Kunden ist ein konstituierendes Merkmal aller Handelsbetriebe. Aufgrund der abweichenden zeitlichen, räumlichen und mengenmäßigen Struktur von Bedarf und Warenangebot ist eine effiziente Planung der Beschaffungsmengen und -zeitpunkte durch die Entscheidungen der Warendisposition erforderlich. Zu hohe Warenbestände führen zu einer Bereitstellung überflüssiger Güter, die als Überbestände Kapital binden, wertvollen Raum in Verkaufsflächen und Lagern belegen und aufgrund des Risikos von Beschädigungen, Diebstahl und Verderb zusätzliche Kosten verursachen. Sind die Bestände dagegen zu niedrig, entstehen Fehlmengen durch ausverkaufte Produkte, die zu Opportunitätskosten in Form von entgangenem Umsatz und Ertrag führen. Bei wiederholt auftretenden Fehlmengen führt die unbefriedigte Kundennachfrage ferner zu einer Beeinträchtigung der Kundenzufriedenheit, bis hin zu einer Verringerung der Einkaufsstättenloyalität und der strategischen Wettbewerbsfähigkeit. Das Treffen korrekter Dispositionsentscheidungen ist somit von besonderer Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg im Handel.

Das Entscheidungsproblem der Warendisposition im Handel erfordert zunächst die Prognose des stochastischen Bedarfs im anonymen Markt. Hierbei kommen unterschiedliche Modelle und Verfahren der Bedarfsprognose zum Einsatz, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Genauigkeit bei der Bedarfsvorhersage die Entscheidungsgüte entscheidend bestimmen. Nachfolgend wird die Verfahrensklasse der künstlichen Neuronalen Netze hinsichtlich ihrer Prognosegenauigkeit und Dispositionskosten untersucht und zur simultanen Bedarfsprognose und Bestellmengenrechnung im Sinne einer integrierten Warendisposition weiterentwickelt. Die Genauigkeit der Neuronalen Netze wird anschließend in einer objektiven empirischen Vergleichsstudie mit etablierten Verfahren der Bedarfsprognose verglichen.

### 1.1 Problemstellung

Handelsbetriebe wurden in den vergangenen Jahren mit einer zunehmenden Wettbewerbsintensität, niedrigen Ertragsspannen und hohem Kostendruck konfrontiert. Gleichzeitig sahen sie sich wachsenden, teils auch ganz neuartigen Anforderungen an die Warendisposition gegenüber, die insbesondere durch die Komplexität der Warenversorgung und die steigende Volatilität der Kundennachfrage verursacht wurden.

Durch das wachsende Preis-Leistungs-Bewusstsein und die sinkende Produkt- und Markenloyalität der Konsumenten verändern sich deren Konsummuster in Richtung auf ein hybrides und fragmentiertes Einkaufsverhalten: Die so genannten „smart shopper“ zeigen eine verringerte Einkaufsstättenloyalität [ECR Europe und Roland Berger 2003]. Die wachsende Konkurrenz um loyale Kundengruppen führt zu einem Zuwachs an Werbeaktivitäten in Industrie und Handel, die je nach Produktkategorie eine Vervielfachung der Nachfrage um bis zu 600 % im Aktionszeitraum bewirken und bei einzelnen Nahrungsmitteln bereits bis zu 75 % des Gesamtumsatzes generieren [Aberdeen Group 2005]. Hersteller und Handel führen neue Produkte in einer nie zuvor erreichten Geschwindigkeit und Menge ein [Aberdeen Group 2004]. Gleichzeitig verkürzen sich die Produktlebenszyklen, so dass Sortimente im Handel kontinuierlich erweitert und in immer kürzeren Zyklen erneuert werden. Die wachsende Sortimenttiefe und -breite führt aufgrund des beschränkten Verkaufsraums zu häufigen Ein- und Auslistungen von Produkten und Produktvarianten.<sup>1</sup> Als Resultat steigt die Volatili-

---

<sup>1</sup> Bei konstanten Konsumausgaben führt dies zu steigenden Logistikkosten und sinkenden Umsätzen je Artikel und somit zu einer weiteren Erhöhung des Kostendrucks.