



Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Fakultät II – Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften  
Department für Informatik

***Prognoseverfahren für den elektrischen  
Lastgang in maritimen Containerterminals***

Von der Fakultät für Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften der Carl von Ossietzky  
Universität Oldenburg zur Erlangung des Grades und Titels eines

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat)

angenommene Dissertation von

Norman Ihle, M.Sc.  
geboren am 23.10.1980 in Hoya/Weser

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Axel Hahn

Universität Oldenburg

Department für Informatik, Abteilung Systemanalyse und -optimierung

Weiterer Gutachter:

Prof. Dr. Sebastian Lehnhoff

Universität Oldenburg

Department für Informatik, Abteilung Energieinformatik

Tag der Disputation: 04. Oktober 2018

# Zusammenfassung

Die Prognose des elektrischen Lastgangs wird in der Wissenschaft schon seit geraumer Zeit untersucht und verschiedenste Ansätze aus dem Bereich der Zeitreihenanalyse oder aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz wurden mit der Zeit entwickelt und publiziert. Den meisten Verfahren ist dabei gemein, dass sie für die Anwendung in elektrischen Netzen oder Teilnetzen mit einer Vielzahl von Verbrauchern entwickelt und getestet wurden. Mit dem Aufkommen von Demand Response und Demand Side Management in modernen Energiesystemen bekommt die kurzfristige Lastgangprognose (engl.: Short-Term Load Forecasting, kurz: STLF) für sogenannte Microgrids und für einzelne große Letztverbraucher einen erhöhten Stellenwert. Für Industriebetriebe und Logistiksysteme, die im Rahmen eines betrieblichen Energiemanagements und der Teilnahme an Demand-Side-Management-Maßnahmen ihren zukünftigen Verbrauch prognostizieren wollen, erscheint es vielversprechend, das Wissen über die eigenen geplanten Betriebsabläufe des nächsten Tages in den Prognoseprozess zu integrieren. Moderne Seehafencontainerterminals, als Beispiel für Logistiksysteme an der Schnittstelle zwischen maritimen und landgebundenen Verkehrsnetzwerken, haben inzwischen einen überwiegenden Teil ihrer Umschlagprozesse elektrifiziert. Die Planung der Betriebsprozesse der Terminals basiert in großen Teilen auf der Liste der Schiffsankünfte und -abfahrten und den damit verbundenen Containerumschlägen pro Schiff.

Die vorliegende Arbeit untersucht systematisch, wie die geplanten Betriebsdaten eines maritimen Containerterminals in verschiedene Lastgangprognoseverfahren integriert werden können. Dazu werden Ansätze aus dem Bereich der Zeitreihenanalyse, der Künstlichen Intelligenz und der Simulation betrachtet. Zusätzlich wird ein eigener Ansatz entwickelt, der die Methoden des Fallbasierten Schließens (engl.: Case-Based Reasoning) aufnimmt. Fallbasiertes Schließen, ein maschinelles Lernverfahren aus der Klasse der Lazy Learner, nutzt Domänenwissen während des Prognoseprozesses und benötigt eine entsprechende Modellierung.

Die Integration des Wissens über die zukünftigen Betriebsabläufe kann direkt aus den Schiffslisten oder nach einer Generierung eines Containerumschlagprofils erfolgen. Zudem können Kontextinformationen zu Wetterbedingungen und kalendarische Informationen für den Prognoseprozess auf unterschiedliche Weise genutzt werden. Sowohl die Auswirkungen der Wissensintegration als auch die Prognoseergebnisse der einzelnen Ansätze werden anhand einer Fallstudie miteinander verglichen. Neben der Prognosegüte werden auch Kriterien wie die Übertragbarkeit oder die Nachvollziehbarkeit der Ansätze betrachtet. Es kann gezeigt werden, dass die Integration von Wissen über die zukünftigen Betriebsprozesse eines Containerterminals die Prognosegüte erhöhen und insbesondere eine Prognose mittels Künstlicher Neuronaler Netze bessere Ergebnisse erzeugt als naive Methoden. Künstliche Neuronale Netze benötigen aber eine große Anzahl historischer Daten und sind damit nicht kurzfristig anpassbar an sich ändernde Gegebenheiten. Die Fallbasierte Lastgangprognose hat hingegen Vorteile bei der Nachvollziehbarkeit und Anpassbarkeit der Prognoseerstellung, während die Simulation neben der Lastgangprognose auch noch das Testen von verschiedenen Betriebsstrategien und deren Auswirkungen auf den Lastgang ermöglicht.

## Abstract

The forecasting of the electrical load curve has been investigated in science for quite some time and various approaches from the field of time series analysis or from the field of artificial intelligence have been developed and published over time. Most methods have in common that they have been developed and tested for use in electrical networks or sub-networks with a large number of consumers. With the emergence of Demand Response and Demand Side Management in modern energy systems, short-term load forecasting (STLF) is becoming increasingly important for microgrids and individual end users with high consumption patterns. For industrial companies and logistics systems that want to forecast their future consumption within the framework of operational energy management and participation in demand side management measures, it seems promising to integrate knowledge of their own planned operating procedures for the next day into the forecasting process. Modern seaport container terminals, as an example of logistics systems at the interface between maritime and land-based transport networks, have meanwhile electrified a large part of their handling processes. The planning of operational processes of the terminals is largely based on the list of ship arrivals and departures and the associated container transshipment per ship.

This thesis systematically examines how the planned operating data of a maritime container terminal can be integrated into various load curve forecasting procedures. For this purpose, approaches from the fields of time series analysis, artificial intelligence and simulation are considered. Additionally, a new approach is developed and presented that is based on Case-Based Reasoning (CBR) methods. CBR as a lazy learner utilizes domain knowledge during the forecasting process and requires appropriate modeling.

The integration of knowledge about future operations can be done directly from the ship lists or after the generation of a container handling profile. In addition, contextual information on weather conditions and calendar information can be used in the forecasting process in different ways. Both the effects of knowledge integration and the forecast results of the individual approaches are compared using a case study. In addition to the quality of the forecast, criteria such as the transferability or comprehensibility of the approaches are also considered. It can be shown that the integration of knowledge about the future operating processes of a container terminal increases the forecasting quality and in particular a forecast using artificial neural networks produces better results than naive methods. Artificial neural networks, however, require a large amount of historical data and are therefore not adaptable to changing conditions at short notice. The case-based load curve forecast, however, has advantages in the traceability and adaptability of the forecast generation, while the simulation also enables the testing of various operating strategies and their effects on the load curve in addition to the load curve forecast.

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| 1 Einleitung.....   | 1   |
| 1.1 Motivation.....   | 2   |
| 1.2 Problemstellung.....  | 6   |
| 1.3 Ziel der Arbeit.....  | 16  |
| 2 Grundlagen.....   | 18  |
| 2.1 Prognose von Zeitreihen.....  | 18  |
| 2.2 Lastgangprognose im energiewirtschaftlichen Kontext.....              | 19  |
| 2.3 Methoden der Lastgangprognose.....                                    | 22  |
| 2.4 Fallbasiertes Schließen.....  | 30  |
| 2.5 Lastgangprognose als Prozess.....                                     | 37  |
| 2.6 Bewertung von Lastgangprognoseverfahren.....                          | 38  |
| 3 Verwandte Arbeiten.....   | 42  |
| 3.1 Lastgangprognoseverfahren.....  | 42  |
| 3.2 Energetische Prozesse in Containerterminals.....                      | 44  |
| 3.3 Fallbasiertes Schließen in der Energiedomäne.....                     | 47  |
| 3.4 Fallbasiertes Schließen für die Prognose von Zeitreihen.....          | 50  |
| 4 Untersuchungen des Lastverhaltens eines Containerterminals.....         | 53  |
| 4.1 Meteorologische Einflüsse.....  | 53  |
| 4.2 Kalendarische Einflüsse.....  | 55  |
| 4.3 Einfluss der Betriebsprozesse .....                                   | 56  |
| 4.4 Langfristige Entwicklungen.....                                       | 58  |
| 4.5 Zusammenfassung.....  | 60  |
| 5 Konzepte für die Lastgangprognose maritimer Containerterminals.....     | 61  |
| 5.1 Betriebsdaten eines Containerterminals und deren Vorverarbeitung..... | 61  |
| 5.2 Vergleichstagverfahren.....   | 70  |
| 5.3 Fallbasierte Lastgangprognose.....                                    | 71  |
| 5.4 Zeitreihenanalyse.....  | 92  |
| 5.5 Künstliche Neuronale Netze.....                                       | 99  |
| 5.6 Simulation.....   | 108 |
| 5.7 Zusammenfassung.....  | 116 |
| 6 Evaluation am Fallbeispiel Container Terminal Altenwerder.....          | 118 |
| 6.1 Umsetzung.....  | 118 |
| 6.2 Studie 1: Effekte der Wissensintegration.....                         | 128 |
| 6.3 Studie 2: Prognosegüte.....   | 136 |
| 6.4 Studie 3: Effizienz und Robustheit.....                               | 145 |
| 6.5 Zusammenfassende Bewertung .....                                      | 153 |
| 7 Rekapitulation und Ausblick.....  | 156 |

|  |     |
|--|-----|
| 7.1 Rekapitulation.....                              | 156 |
| 7.2 Ausblick.....                                    | 160 |
| Anhang.....  | 162 |
| A) Monatliche Prognoseergebnisse je Verfahren.....   | 162 |
| B) Für die Implementierung genutzte Komponenten..... | 165 |
| Abkürzungsverzeichnis.....                           | 166 |
| Glossar.....   | 169 |
| Abbildungsverzeichnis.....                           | 175 |
| Tabellenverzeichnis.....                             | 177 |
| Literaturverzeichnis.....                            | 178 |