

Berücksichtigung des Kundenverhaltens bei der Lagerbestandsplanung mehrstufiger, geschlossener Ersatzteilkreisläufe

Vom Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Daniel Schneider

Gutachterinnen: Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht, Universität Bremen

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, Karlsruher Institut für Technologie

Tag der mündlichen Prüfung: 27. März 2017

Berichte aus dem Bremer Institut für Strukturmechanik und
Produktionsanlagen

Band 1/2017

Daniel Schneider

**Berücksichtigung des Kundenverhaltens
bei der Lagerbestandsplanung mehrstufiger,
geschlossener Ersatzteilkreisläufe**

D 46 (Diss. Universität Bremen)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Bremen, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5385-2

ISSN 2196-2391

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (bime) der Universität Bremen. Frau Prof. Dr.-Ing. Kirsten Tracht danke ich für die fachliche und persönliche Betreuung und stetige Förderung der Forschungsarbeit sehr herzlich. Die von ihr gebotenen Freiräume sowie ihre konstruktiven Hinweise ermöglichten mir die Erstellung dieser Dissertation.

Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza danke ich für die Übernahme des Koreferats, die kritische Durchsicht und die fachliche Beurteilung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhfuß gilt mein Dank für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Bei allen Kollegen möchte ich mich für die schöne Zeit am Institut bedanken. Herrn Dipl.-Wirt.-Ing. Lars Funke und Herrn M.Sc. Peter Schuh danke ich für die regelmäßigen konstruktiven Diskussionen sowie die Verbesserungsvorschläge bei der Erstellung des Dokuments. Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Hogreve danke ich für seine Ratschläge vor der Veröffentlichung der Dissertation, um ihr den letzten Schliff zu geben. Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Florian Weikert spreche ich meinen Dank für die langjährige freundschaftliche Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen als Bürokollegen aus.

Weiterer Dank gilt meinen studentischen Hilfskräften Tim Lid und Alexander Bader, die mich bei dem Aufbau des Simulationsmodells und der Erarbeitung der wissenschaftlichen Ergebnisse unterstützten.

Ebenfalls möchte ich einen Dank an meine Eltern aussprechen, die mir die Ausbildung ermöglichten und mich bei meinem Werdegang stets förderten.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Frau Julia für ihre uneingeschränkte Unterstützung und das Verständnis bedanken, das sie mir entgegengebracht hat. Mit ihrem Rückhalt, ihrer Ruhe und Geduld trug sie zum Gelingen meiner Promotion bei.

Bremen, im März 2017

Daniel Schneider

Kurzfassung

Berücksichtigung des Kundenverhaltens bei der Lagerbestandsplanung mehrstufiger, geschlossener Ersatzteilkreisläufe

Für die Lagerung hochpreisiger Ersatzteile kommen mehrstufige, geschlossene Ersatzteilkreisläufe zum Einsatz. Zur Lagerbestandsplanung dieser Kreisläufe, in denen Teile nach einem Defekt repariert und dem Lager wieder zugeführt werden, existiert eine Vielzahl an Modellen und Methoden. Den Modellen liegt die Annahme zugrunde, dass die am Ersatzteilkreislauf beteiligten Partner, bestehend aus dem Ersatzteildienstleister und den Kunden, im Sinne des Gesamtoptimums handeln. Nicht optimales Kundenverhalten, welches das Vorhalten eigener, im Eigentum des Kunden befindlicher Bestände sowie Liegezeiten vor dem Versand von defekten Bauteilen in die Werkstatt beinhaltet, findet in keinem der bisher bekannten Modelle der Lagerbestandsplanung geschlossener Ersatzteilkreisläufe Berücksichtigung.

Die entwickelte und im Folgenden vorgestellte Methode zur Einbeziehung kundeneigener Bestände sowie der Liegezeit nach Defekt stellt ein Lösungswerkzeug für die beschriebene Problemstellung dar. Die entwickelte Methode zum Einbezug des Kundenverhaltens in die Planung geschlossener Ersatzteilkreisläufe (KugEr) besteht aus einem Modul zur Abbildung der kundeneigenen Bestände, einem Modul zur Abbildung des verspäteten Versands sowie einer Heuristik zur Steuerung. Die Methode wird in ein Simulationsmodell eines Ersatzteilkreislaufs integriert, um ihre Funktionsweise zu prüfen und die Validität nachzuweisen. Die Untersuchungen mit der KugEr-Methode zeigen, dass das Kundenverhalten in der Lagerbestandsplanung geschlossener Ersatzteilkreisläufe erheblichen Einfluss auf die Höhe der ermittelten Lagerbestände hat.

Die Validität des Simulationsmodells mit der integrierten KugEr-Methode wird mit einem Vergleich zum Lagerbestandsplanungsmodell METRIC und mit einer Anwendung auf Unternehmensdaten nachgewiesen. Eine umfangreiche Systemanalyse mit dem Simulationsmodell unter variierenden Bedingungen schließt sich an. Aus den Ergebnissen der Systemanalyse werden Metamodelle mittels Regression abgeleitet, um die Planung der Lagerbestände ohne umfangreiche Simulationsstudien zu ermöglichen. Die Metamodelle bieten eine hohe Genauigkeit der Approximation und eignen sich für den Einsatz in der Lagerbestandsplanung unter Berücksichtigung des Kundenverhaltens.

Die KugEr-Methode erlaubt den Ersatzteildienstleistern die Lagerbestandsplanung geschlossener Ersatzteilkreisläufe unter realitätsnahen Bedingungen. Mit der Anwendung der KugEr-Methode können Ersatzteildienstleister eine situationsadäquate Planung der Lagerbestände durchführen und ihre Wettbewerbsfähigkeit gegenüber Konkurrenten verbessern. Die KugEr-Methode erhöht die Genauigkeit der geplanten Lagerbestände. Die Berücksichtigung der kundeneigenen Bestände senkt die Kosten der Ersatzteilversorgung, da die Lagerbestände im Zentrallager unter Einhaltung der vertraglich vereinbarten Versorgungssicherheit reduziert werden. Der Einbezug der Liegezeit nach Defekt in der Lagerbestandsplanung durch die Anwendung der KugEr-Methode verhindert Unterbestände und vermeidet Vertragsstrafen für den Ersatzteildienstleister.

Abstract

Consideration of Customer Behavior in Inventory Planning of Multi-echelon Repairable Item Systems

In case of high value spare parts multi-echelon repairable item systems are applied. Numerous approaches and models for determining stock levels in these systems exist. In repairable item systems items are repaired and put back into stock for future use as spare parts. Current models for inventory planning rely on the assumption that all partners in the system –comprising maintenance-, repair-, and overhaul-providers as well as customers– act towards an overall system optimum. Sub-optimal customer behavior like customer stock that belongs to the customer and delayed shipping of defective parts to the repair shop is not taken into account in any of the models for inventory planning in repairable item systems known to date.

The developed KugEr-method, which is presented in the following, considers customer stock as well as the laytime after a defect of a part, when determining inventory levels of the warehouses in the repairable item system. It encompasses a module for consideration of customer stock, a module for consideration of the laytime after defect and a heuristics for controlling the model. The method is integrated in a simulation model of a repairable item system to show its validity. Using the simulation model with the developed KugEr-method, parameter studies under varying input parameters are conducted. The analyses show that the customer behavior has significant impact on the determined inventory level.

A comparison of the simulation model with the integrated method and the METRIC model for inventory planning as well as a comparison to company data prove the validity of the method. Metamodels are derived from the results obtained by the simulation model, using linear regression. The metamodels allow for determination of inventory levels without extensive simulation studies. As the metamodels are very accurate, they are well suited for inventory planning under consideration of customer stock.

Applying the KugEr-method, maintenance-, repair- and overhaul-providers can set inventory levels according to the current system status and improve their competitiveness in comparison to other companies providing spare parts. The KugEr-method increases the accuracy of the planned inventory levels. Consideration of customer stock lowers the costs of spare part provisioning, because the inventory levels in the central depot can be decreased maintaining the ability to supply as per contract. The consideration of the laytime after defect of a part by the KugEr-method prevents low stock levels and penalty costs for the maintenance-, repair- and overhaul-providers. The presented method is an approach for inventory planning in multi-echelon repairable item systems, considering realistic constraints and input parameters. It allows for consideration of more realistic constraints than inventory planning models known to date.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Ausgangssituation | 1 |
| 1.2 | Problemstellung | 2 |
| 1.3 | Zielsetzung und Vorgehensweise | 3 |
| 2 | Einführung in die Lagerbestandsplanung von Ersatzteilen | 5 |
| 2.1 | Ersatzteile | 5 |
| 2.2 | Bestandsplanung innerhalb des Ersatzteilmanagements | 5 |
| 2.3 | Lagerbestandssysteme | 7 |
| 2.3.1 | Offene Ersatzteilversorgungssysteme | 7 |
| 2.3.2 | Geschlossene Ersatzteilkreisläufe | 8 |
| 2.4 | Mathematische Grundlagen der Lagerbestandsplanung | 10 |
| 2.4.1 | Exponentialverteilung | 10 |
| 2.4.2 | Poissonverteilung | 11 |
| 2.4.3 | Poissonprozess | 12 |
| 2.4.4 | Addition von Erwartungswerten und Varianzen | 13 |
| 2.5 | Definitionen | 13 |
| 2.5.1 | Artikel, Ersatzteile und Mengeneinheiten | 13 |
| 2.5.2 | Kennzahlen | 15 |
| 2.5.3 | Zielgrößen und Nebenbedingungen | 18 |
| 2.5.4 | Merkmale von Modellen der Lagerbestandsplanung | 19 |
| 3 | Logistische Kennlinien | 25 |
| 3.1 | Werkstatt | 25 |
| 3.1.1 | Durchlaufdiagramm | 25 |
| 3.1.2 | Ableitung der Produktionskennlinien | 30 |
| 3.2 | Lager | 31 |
| 3.2.1 | Lagerdurchlaufdiagramm | 31 |
| 3.2.2 | Ableitung der Lagerkennlinien | 33 |
| 3.3 | Logistiktheorie | 35 |
| 3.4 | Diskussion der Kennlinientheorie | 36 |
| 4 | Modelle der Lagerbestandsplanung | 39 |
| 4.1 | Modellierung von Warteschlangen in der Werkstatt | 39 |
| 4.2 | METRIC-Modell | 41 |
| 4.3 | Erweiterte Modelle der Lagerbestandsplanung | 46 |
| 4.3.1 | Ersatzteilversorgung mit unbeschränkter Werkstattkapazität | 47 |
| 4.3.2 | Ersatzteilversorgung mit beschränkter Werkstattkapazität | 53 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.4 | Diskussion der Lagerbestandsmodelle der Warteschlangentheorie | 56 |
| 4.5 | Problembeschreibung und Forschungsbedarf..... | 57 |
| 5 | Simulation | 59 |
| 5.1 | Modellierung von Systemen | 59 |
| 5.2 | Simulationsmodelle | 60 |
| 5.3 | Auswertung von Simulationsversuchen mit Parameterschätzung..... | 61 |
| 5.3.1 | Einschwingphasen und Genauigkeit der Ausgangsparameter | 62 |
| 5.3.2 | Konfidenzintervalle..... | 63 |
| 5.3.3 | Addition von Konfidenzintervallen | 64 |
| 5.3.4 | Regression und Bestimmtheitsmaß | 66 |
| 5.4 | Auswahl der Simulation als Untersuchungswerkzeug..... | 69 |
| 6 | Methode zur Lagerbestandsplanung unter Einbeziehung des Kundenverhaltens.71 | |
| 6.1 | Definition des zu untersuchenden Ersatzteilkreislaufs | 71 |
| 6.2 | Entwicklung der KugEr-Methode..... | 74 |
| 6.2.1 | Aufbau und Funktionsweise der Methode..... | 74 |
| 6.2.2 | Modul <i>Kundeneigene Bestände</i> | 76 |
| 6.2.3 | Modul <i>Liegezeit nach Defekt</i> | 78 |
| 6.2.4 | Ein- und Ausgangsparameter | 80 |
| 6.3 | Aufbau des Simulationsmodells | 81 |
| 6.3.1 | Annahmen und Vereinfachungen..... | 81 |
| 6.3.2 | Ersatzteilkreislauf | 83 |
| 6.3.3 | Modul <i>Kundeneigene Bestände</i> | 86 |
| 6.3.4 | Modul <i>Liegezeit nach Defekt</i> | 89 |
| 6.3.5 | Last- und Zentralisierungskennzahl | 91 |
| 6.4 | Validierung und Verifikation..... | 92 |
| 6.4.1 | Einführung in die Validierung und Verifikation | 92 |
| 6.4.2 | Validierung und Verifikation des Simulationsmodells..... | 94 |
| 6.4.3 | Vergleich der Ergebnisse des METRIC- und des Simulationsmodells | 95 |
| 6.4.4 | Vergleich mit Daten eines Ersatzteildienstleisters | 98 |
| 7 | Analyse des Systemverhaltens..... | 101 |
| 7.1 | Berücksichtigung kundeneigener Bestände | 101 |
| 7.1.1 | Kundeneigene Bestände..... | 101 |
| 7.1.2 | Kundeneigene Bestände und Metamodell | 104 |
| 7.2 | Liegezeit nach Defekt eines Bauteils | 110 |
| 7.2.1 | Keine Liegezeit und Liegezeit vor Lieferung des Ersatzteils..... | 110 |
| 7.2.2 | Lagerbestandsplanung mit und ohne Berücksichtigung der Liegezeit vor Lieferung des Ersatzteils..... | 113 |

| | |
|---|------------|
| 7.2.3 Liegezeit nach Lieferung des Ersatzteils..... | 116 |
| 7.2.4 Metamodell für Instandsetzungsdurchlaufzeiten mit Liegezeit nach Defekt . | 120 |
| 7.3 Beschränkte Werkstattkapazität..... | 122 |
| 7.4 Anwendung der KugEr-Methode bei einem Ersatzteildienstleister..... | 128 |
| 8 Schlussbetrachtung..... | 135 |
| 8.1 Zusammenfassung..... | 135 |
| 8.2 Ausblick | 136 |
| Glossar | 137 |
| Literaturverzeichnis | 141 |
| Abschlussarbeiten | 155 |