# Algorithmus zur prognosebasierten vorausschauenden Lagerfachzuordnung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr
Hamburg
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktor-Ingenieurin
genehmigte

Dissertation

von

Anne Kathrin Piepenburg
aus Elmshorn

Hamburg 2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Dezember 2016

Gedruckt mit der Unterstützung der
Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg

Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik

Band 44

**Anne Kathrin Piepenburg**

# Algorithmus zur prognosebasierten vorausschauenden Lagerfachzuordnung

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.: Hamburg, Helmut-Schmidt-Univ., Diss., 2016

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 978-3-8440-5270-1
ISSN 1861-5260

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 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik der Helmut-Schmidt-Universität in Hamburg.

Im Besonderen möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Bruns bedanken. Ich danke ihm vor allem für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für viele wertvolle Gespräche, seine Anregungen, die konstruktive Kritik und letztendlich für seine Geduld, womit er das Entstehen dieser Arbeit möglich gemacht hat.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans danke ich für die bereitwillige Übernahme des Korreferats.

Meinen ehemaligen Arbeitskolleginnen und Arbeitskollegen Werner Albe, Bernfried Heinken, Holger Kumpfert, Kerstin Semcken, Loubna Doubli, Nicole Riemer, Elena Danilov, Linda Hallmann, Nils Busch, Alexander Frenkel, Melf Gerthsen, Konstantin Krivenkov, Oliver Höppner, Gunnar Rückner, Torsten Hahn, Holger Freyer, Timo Schilling und Jan Isermann danke ich für Ihre Inspiration und eine großartige und unvergessliche Zeit am Lehrstuhl.

Ich möchte mich bei meinen Eltern für Ihre unbegrenzte Unterstützung bedanken. Meinem Mann Björn Piepenburg danke ich dafür, dass er mir in jedem Stadium der Arbeit zur Seite stand und mich besonders in schwierigen Phasen mit seinem unvergleichbaren Humor aus sämtlichen Tiefs gezogen hat.

Zum Schluss möchte ich mich bei Maria Mayer bedanken.

Hamburg, im Februar 2017

Anne Kathrin Piepenburg

# Kurzfassung

Die Anforderungen an ein Lagersystem sind vielfältig. Insbesondere sind eine hohe Lagerkapazität, eine hohe Umschlagsleistung und ein geringer Energieverbrauch von Bedeutung. Eine Erhöhung der Umschlagsleistung kann zum einen durch technische Maßnahmen erfolgen, wie die Anpassung der Lagergeometrie oder die Erhöhung der Leistungsfähigkeit des Regalbediengerätes. Zum anderen kann die Umschlagsleistung eines Lagers durch intelligente Belegungsstrategien verbessert werden.
Gängige Belegungsstrategien berücksichtigen nicht alle Einflussgrößen auf die Leistungsfähigkeit der Strategie. Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher eine Belegungsstrategie zu entwickeln, die alle Einflussgrößen berücksichtigt. Aus diesem Grund wurden zunächst die Vorgänge in einer Regalfläche analysiert und aufbauend auf diesen Erkenntnissen ein analytisches Modell entwickelt, das die Leistungsfähigkeit von Belegungsstrategien beschreibbar macht. Außerdem wurden die zentralen Einflussgrößen auf die mittlere Spielzeit identifiziert.
Die gewonnenen Erkenntnisse aus der analytischen Modellbildung wurden anschließend in einer neuen Lagerstrategie, dem prognosebasierten Reservierungsverfahren, umgesetzt. In Abhängigkeit der prognostizierten Verweildauer und der aktuellen Lagerbelegung bestimmt das prognosebasierte Reservierungsverfahren den optimalen Lagerort für eine Ladeeinheit. Dazu werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Zwischenankunftszeiten und die Verweildauern herangezogen und prognostiziert, wie viele Ladeeinheiten in der Zukunft auftreten werden, die einen fahrzeitgünstigeren Lagerort benötigen als die aktuell einzulagernde Ladeeinheit. Für diese Ladeeinheiten werden die fahrzeitgünstigsten Lagerorte reserviert und die aktuell einzulagernde Ladeeinheit wird schließlich in das nächste freie, nicht reservierte Lagerfach mit der kürzesten Fahrzeit eingelagert.
Abschließend wurde das prognosebasierte Reservierungsverfahren zusammen mit anderen gängigen Lagerstrategien in einem parametrisierbaren Simulationsmodell umgesetzt. In den durchgeführten Simulationsstudien konnte die Leistungsfähigkeit des prognosebasierten Reservierungsverfahrens gezeigt werden. Besonders bei nicht Vollauslastung des Lagers und großer Ungleichverteilung im Sortiment ist die neue Strategie den gängigen Lagerstrategien überlegen.

# Inhaltsverzeichnis


**1 Einleitung** **1**
- 1.1 Motivation der Arbeit . . . 1
- 1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit . . . 2

**2 Stand der Wissenschaft** **5**
- 2.1 Lagern . . . 5
  - 2.1.1 Aufgaben des Lagerns . . . 5
  - 2.1.2 Lagerprozess und Lagerarten . . . 6
  - 2.1.3 Lagerverwaltung . . . 12
- 2.2 Spielzeitberechnung für Läger . . . 13
  - 2.2.1 Einzelspielzeitberechnung bei chaotischer Lagerung . . . 15
  - 2.2.2 Die Geschwindigkeitsgerade . . . 20
  - 2.2.3 Doppelspielzeitberechnung bei chaotischer Lagerung . . . 21
- 2.3 Belegungsstrategien . . . 23
  - 2.3.1 Praxisrelevante Belegungsstrategien . . . 24
  - 2.3.2 Belegungsstrategien in der Literatur . . . 25

**3 Spielzeitverteilung in einem Lager** **35**
- 3.1 Stochastische Einflussgrößen auf die Spielzeit . . . 35
  - 3.1.1 Die Verteilung der Zwischenankunftszeit . . . 36
  - 3.1.2 Die Verteilung der Verweildauer . . . 39
- 3.2 Spielzeitverteilung beim Einzelspiel . . . 44
  - 3.2.1 Dichtefunktion der Spielzeitverteilung bei einer diagonalen Geschwindigkeitsgerade und einer chaotischen Lagerung . . . 44
  - 3.2.2 Dichtefunktion der Spielzeitverteilung bei einer nicht diagonalen Geschwindigkeitsgerade und einer chaotischen Lagerung . . . 46
- 3.3 Spielzeitverteilung beim Doppelspiel . . . 50
  - 3.3.1 Isochronen des Doppelspiels . . . 50
  - 3.3.2 Spielzeitverteilung beim Doppelspiel bei einer diagonalen Geschwindigkeitsgerade und chaotischer Lagerung . . . 53

3.3.3 Spielzeitverteilung beim Doppelspiel bei einer nicht diagonalen Geschwindigkeitsgerade und chaotischer Lagerung . . . . . 63
3.3.4 Mittlere Doppelspielzeiten bei chaotischer Lagerung . . . . . 69

**4 Leistungsberechnungen von Belegungsstrategien 73**
4.1 Modellbildung der Leistungsberechnung beim Einzelspiel . . . . . 74
4.1.1 Grundlagen der Modellbildung . . . . . 74
4.1.2 Leistungsberechnung mit einem diskreten Modell . . . . . 77
4.1.3 Leistungsberechnung mit einem stetigen Modell . . . . . 78
4.1.4 Leistungsberechnung mit einem klassiert diskreten Modell . . . 78
4.1.5 Leistungsberechnung mit einem klassiert kontinuierlichen Modell 79
4.1.6 Modellvalidierung der Leistungsberechnung des Einzelspiels anhand einer chaotischen Lagerung . . . . . 80
4.1.7 Modellanwendung bei der dynamischen Zonierung am Beispiel einer gleichverteilten Verweildauer . . . . . 81
4.2 Modellbildung der Leistungsberechnung beim Doppelspiel . . . . . 83
4.2.1 Voraussetzungen und Annahmen zur Modellbildung . . . . . 84
4.2.2 Leistungsberechnung des Doppelspiels . . . . . 87

**5 Prognosebasierte vorausschauende Lagerfachzuordnung 89**
5.1 Bestimmung des optimalen Lagerfachs . . . . . 90
5.2 Die Umsetzung des prognosebasierten Reservierungsverfahrens . . . . . 92
5.2.1 Verweildauerprognose und Bestimmung der Erstauslagerungswahrscheinlichkeiten . . . . . 94
5.2.2 Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von $n$ Ladeeinheiten nach Reservierungskriterium . . . . . 97
5.2.3 Reservierung von Lagerfächern . . . . . 107
5.2.4 Einlagerung einer Ladeeinheit . . . . . 110

**6 Simulationsgestützte Berechnung der mittleren Fahrzeit 117**
6.1 Das Simulationsmodell . . . . . 118
6.1.1 Aufbau des Simulationsmodells . . . . . 118
6.1.2 Verweildauerverteilung und Verteilung der Zwischenankunftszeit im Modell . . . . . 119
6.1.3 Grundinitialisierung und Lieferlisten . . . . . 121
6.1.4 Implementierte Belegungsstrategien . . . . . 124
6.1.5 Statistische Auswertung der Simulationsläufe . . . . . 127
6.2 Modellverifizierung . . . . . 130
6.3 Simulationsstudien . . . . . 131
6.4 Ergebnisse der Simulation und Vergleich der Belegungsstrategien . . . . 133

**7 Zusammenfassung und Ausblick** **149**
7.1 Zusammenfassung . . . . . 149
7.2 Ausblick . . . . . 151

**Abbildungsverzeichnis** **XXV**

**Tabellenverzeichnis** **XXIX**

**A Glossar** **XXXI**

**B Dichtefunktion der Spielzeitverteilung bei einer diagonalen Geschwindigkeitsgerade** **XXXVII**

**C Dichtefunktion der Spielzeitverteilung bei einer nicht diagonalen Geschwindigkeitsgerade** **XXXIX**

**D Fehlereinschätzung für den Algorithmus zur Reduzierung des Rechenaufwandes** **XLIII**

**E Sortimente der Simulationsstudien** **XLIX**

# Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Erklärung |
|---|---|
| CPO | Cube-per-Order (-Index) |
| DynZon | Dynamische Zonierung |
| FIFO | First In, First Out |
| HRL | Hochregallager |
| KFZ | Kürzeste-Fahrzeit (-Strategie) |
| LB | Lagerbestand |
| LE | Ladeeinheit |
| LF | Lagerfach |
| LIFO | Last In, First Out |
| PRV | Prognosebasiertes Reservierungsverfahren |
| RBG | Regalbediengerät |
| VWD | Verweildauer |
| WA | Warenausgang |
| WE | Wareneingang |
| ZE | Zeiteinheit |

# Symbolverzeichnis

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $A_\psi$ | Artikel $\psi$ |
| $a_x$ | horizontale Beschleunigung des Regalbediengerätes |
| $a_y$ | vertikale Beschleunigung des Regalbediengerätes |
| $\alpha_B$ | Einflussfaktor zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit einer Lagerstrategie |
| $B$ | positives Ereignis der zweiten Ebene des Entscheidungsbaumes |
| $\bar{B}$ | komplementäres Ereignis von $B$ |
| $B_1$ | Teil-Dichtefunktion der Spielzeiten in einer Lagerfläche mit nicht diagonaler Geschwindigkeitsgerade |
| $B_2$ | Teil-Dichtefunktion der Spielzeiten in einer Lagerfläche mit nicht diagonaler Geschwindigkeitsgerade |
| $b$ | Baumtiefe des Wahrscheinlichkeitsbaumes |
| $b_x$ | horizontale Verzögerung des Regalbediengerätes |
| $b_y$ | vertikale Verzögerung des Regalbediengerätes |
| $C_c$ | Teilmengen (Klassen) von Lagerfächern |
| $c$ | Laufindex für die Klassen von Lagerfächern |
| $\Delta LB_\psi$ | Differenz aus dem Maximalbestand und dem Minimalbestand eines Artikels $\psi$ |
| $dx$ | Lagerfachbreite nach Kontinuierung der Regalfläche |
| $\Delta x$ | horizontaler Verfahrweg des Regalbediengerätes |
| $dy$ | Lagerfachhöhe nach Kontinuierung der Regalfläche |
| $\Delta y$ | vertikaler Verfahrweg des Lastaufnahmemittels |
| $E_{GL}$ | Grundlastverbrauch des Regalbediengerätes |
| $E_{kin,Fahr}$ | kinetische Energie des Fahrantriebes des Regalbediengerätes |
| $E_{kin,Hub}$ | kinetische Energie des Hubantriebes des Regalbediengerätes |
| $E_{pot}$ | potentielle Energie des Hubantriebes des Regalbediengerätes |
| $E\left(t_{vd,S}\right)$ | sortimentsbezogener Erwartungswert der Verweildauer |
| $E_{xr}$ | Reibungsenergie des Fahrantriebes des Regalbediengerätes |
| $E_{yr}$ | Reibungsenergie des Hubantriebes des Regalbediengerätes |
| $\eta$ | Laufindex für Lieferungen eines Artikels |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $\eta_r$ | Wirkungsgrad der Energierückgewinnung |
| $\eta_x$ | Gesamtwirkungsgrad des Fahrantriebes des Regalbediengerätes |
| $\eta_y$ | Gesamtwirkungsgrad des Hubantriebes des Regalbediengerätes |
| $F_{A\psi}$ | artikelbezogene Verteilungsfunktion der Verweildauer |
| $F_F$ | Fahrzeitverteilungsfunktion |
| $F_{\phi k}$ | Verteilungsfunktion der Zeitdauern bis zur Auslagerung des $k$-ten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $F_S$ | sortimentsbezogene Verweildauerverteilung |
| $F_{vd}$ | Verteilungsfunktion der Verweildauer |
| $F_{s0}$ | Verteilungsfunktion der Spielzeit bei diagonaler Geschwindigkeitsgerade |
| $f_{s0}$ | Dichtefunktion der Spiel- bzw. Fahrzeit bei einem Lager mit diagonaler Geschwindigkeitsgerade |
| $f_{s1}$ | Dichtefunktion der Spiel- bzw. Fahrzeit bei einem Lager mit nicht diagonaler Geschwindigkeitsgerade |
| $f_{vd}$ | Dichtefunktion der Verweildauer |
| $f_{\phi 1}$ | Dichtefunktion der Zeitdauern bis zur Auslagerung des ersten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $f_{\phi k}$ | Dichtefunktion der Zeitdauern bis zur Auslagerung des $k$-ten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $f_{\tilde{t}vd}$ | Dichtefunktion der Verweildauer |
| $f_{\tilde{t}z}$ | Dichtefunktion der Zwischenankunftszeit |
| $H$ | Lagerhöhe |
| $h_c$ | Anzahl Lagerfächer der Klasse $C_c$ / absolute Häufigkeit von Lagerfächern |
| $h_{c,rel}$ | relative Häufigkeit von Lagerfächern der Klasse $C_c$ |
| $h_{DS}$ | absolute Häufigkeit für ein Doppelspiel |
| $h_{DS,rel}$ | relative Häufigkeit für ein Doppelspiel |
| $h_k$ | absolute Häufigkeit einer Klasse |
| $h_{k,rel}$ | relative Häufigkeit einer Klasse |
| $h_{tvd,rel}$ | relative Häufigkeit der Verweildauer $t_{vd}$ |
| $h_{tz,rel}$ | relative Häufigkeit der Zwischenankunftszeit $t_z$ |
| $i$ | Laufindex der Lagerfächer in horizontaler Richtung |
| $j$ | Laufindex der Lagerfächer in vertikaler Richtung |
| $K$ | Anzahl Teilmengen bzw. Gruppen von Lagerfächern |
| $k$ | $k$-ter Nachfolger der aktuellen Ladeeinheit nach Erstauslagerungswahrscheinlichkeit |
| $L$ | Lagerbreite |
| $\bar{LB}$ | mittlerer Lagerbestand |
| $LB_{max,\psi}$ | Maximalbestand eines Artikels $\psi$ |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $LB_{min,\psi}$ | Minimal- / Sicherheits- / Meldebestand eines Artikels $\psi$ |
| $LE_{\gamma}$ | aktuelle Ladeeinheit |
| $LE_{\gamma+1}$ | erster Nachfolger der aktuellen Ladeeinheit |
| $LE_{\xi,\eta,\psi}$ | Ladeeinheit $\xi$ der Lieferung $\eta$ des $\psi$-ten Artikels |
| $LF_{ij}$ | Lagerfach des Einzelspiels bzw. erstes Lagerfach des Doppelspiels |
| $LF_{qr}$ | zweites Lagerfach des Doppelspiels |
| $l$ | Laufindex der Nachfolger der aktuellen Ladeeinheit nach Erstauslagerungswahrscheinlichkeit |
| $links$ | Index für die linke Begrenzung des Teilbaums bei der Reduzierung des Rechenaufwands |
| $\lambda_{ges}$ | Gesamtdurchsatz des betrachteten Systems |
| $\lambda_{ij}$ | Durchsatz des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $\lambda_{in}$ | Durchsatz am Eingang eines Materialflussobjektes (beispielsweise einer Bedienstation) / eines Materialflusssystems |
| $\lambda_{m}$ | örtlich gemittelter Durchsatz bzw. Erwartungswert des Durchsatzes einer Regalfläche |
| $\lambda_{out}$ | Durchsatz am Ausgang eines Materialflussobjektes (beispielsweise einer Bedienstation) / eines Materialflusssystems |
| $\lambda_{qr}$ | Durchsatz des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $\lambda_{\psi}$ | Durchsatz des $\psi$-ten Artikels |
| $M$ | Anzahl der Lagerfächer in Lagerbreite |
| $m$ | Anzahl der durchgeführten Faltungen |
| $m_{ges}$ | Gesamtmasse des Regalbediengerätes |
| $m_{hub}$ | Hubmasse des Lastaufnahmemittels des Regalbediengerätes |
| $\mu_{G}$ | Erwartungswert einer gleichverteilten Verweildauer |
| $\mu_{ges}$ | sortimentsbezogener Erwartungswert der Verweildauer |
| $N$ | Anzahl der Lagerfächer in Lagerhöhe |
| $n$ | Anzahl Ladeeinheiten nach Reservierungskriterium |
| $P(A_{\psi})$ | Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Artikels $\psi$ |
| $P(B)$ | Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Ereignis $B$ |
| $P_{Ak}$ | Erstauslagerungswahrscheinlichkeit des $k$-ten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $P_{A,links}$ | Produkt der Erstauslagerungswahrscheinlichkeiten links vom Umschlagspunkt |
| $P_{A,rechts}$ | Produkt der Erstauslagerungswahrscheinlichkeiten rechts vom Umschlagspunkt |
| $P_{A,US,oben}$ | Erstauslagerungswahrscheinlichkeit am Umschlagspunkt |
| $P_{A,US,unten}$ | Komplementärwahrscheinlichkeit am Umschlagspunkt |
| $P_{Ft}$ | Summe der berechneten Pfadwahrscheinlichkeiten |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $P_G$ | geforderte Berechnungsqualität der Summe der $P_n$-Wahrscheinlichkeiten bei der Reduzierung des Rechenaufwandes |
| $P_{GL}$ | Grundlast des Regalbediengerätes |
| $P_{ij}$ | Anfahrwahrscheinlichkeit des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $P_{ijqr}$ | Anfahrwahrscheinlichkeit des Lagerfaches $LF_{qr}$ unter der Voraussetzung der vorherigen Anfahrt des Lagerfaches $LF_{ij}$ in einem Doppelspiel |
| $P_n$ | Wahrscheinlichkeit, dass $n$ Ladeeinheiten nach Reservierungskriterium im Lager ankommen |
| $P_{qr}$ | bedingte Anfahrwahrscheinlichkeit des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $P_W$ | Pfadwahrscheinlichkeiten im Wahrscheinlichkeitsbaum |
| $\phi_k$ | Zeitdauer bis zur Auslagerung des $k$-ten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $P_{W,max,oben}$ | maximale Pfadwahrscheinlichkeit oberer Pfad |
| $P_{W,max,unten}$ | maximale Pfadwahrscheinlichkeit unterer Pfad |
| $\Psi$ | Anzahl an Artikeln eines Sortiments |
| $\psi$ | Laufindex für die Artikel eines Sortiments |
| $rechts$ | Index für die rechte Begrenzung des Teilbaums bei der Reduzierung des Rechenaufwands |
| $\bar{\rho}(x,y)$ | mittlerer Auslastungsgrad des Lagerfaches $LF_{xy}$ im stetigen Modell |
| $\bar{\rho}_c$ | mittlerer Auslastungsgrad der Fächergruppe $C$ |
| $\bar{\rho}(i,j)$ | mittlerer Auslastungsgrad des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $\bar{\rho}(q,r)$ | mittlerer Auslastungsgrad des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $\bar{\rho}(t_s)$ | mittlerer Auslastungsgrad der Fächergruppe $t_s$ im stetigen Modell |
| $T$ | Realisierung Zeitpunkt |
| $\tilde{T}$ | Zufallsgröße Zeitpunkt |
| $\tilde{T}_{A\gamma}$ | prognostizierter Auslagerungszeitpunkt der aktuellen Ladeeinheit |
| $\tilde{T}_{A\gamma+1}$ | prognostizierter Auslagerungszeitpunkt des ersten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $T_{E\gamma}$ | Einlagerungszeitpunkt der aktuellen Ladeeinheit |
| $\tilde{T}_{E\gamma+1}$ | prognostizierter Einlagerungszeitpunkt des ersten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $t$ | Realisierung Zeitdauer |
| $\tilde{t}$ | Zufallsgröße Zeitdauer |
| $t_0$ | Zeitanteil einer Teilstrecke des Regalbediengerätes für das Beschleunigen und für das Abbremsen |
| $t_{0x}$ | Zeitanteil einer Teilstrecke des Regalbediengerätes für das Beschleunigen und für das Abbremsen in horizontaler Richtung |
| $t_{0y}$ | Zeitanteil einer Teilstrecke des Regalbediengerätes für das Beschleunigen und für das Abbremsen in vertikaler Richtung |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $t_A$ | spezielle Spielzeit bei einer Auslagerung des Einzelspiels |
| $t_a$ | Zeit zum Beschleunigen des Regalbediengerätes auf seine Maximalgeschwindigkeit |
| $t_b$ | Zeit zum Abbremsen des Regalbediengerätes von der Maximalgeschwindigkeit |
| $t_E$ | spezielle Spielzeit bei einer Einlagerung des Einzelspiels |
| $t_f$ | spezielle Fahrzeit in Sekunden |
| $t_{fm}$ | mittlere Fahrzeit eines Einzelspiels |
| $t_{KA}$ | unabhängiger Zeitanteil bei einer Auslagerung des Einzelspiels |
| $t_{KE}$ | unabhängiger Zeitanteil bei einer Einlagerung des Einzelspiels |
| $t_{konst}$ | Fahrzeit des Regalbediengerätes mit konstanter Geschwindigkeit |
| $\bar{t}_{leerij}$ | mittlere Leerzeit des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $t_s$ | spezielle Spielzeit beim Einzelspiel |
| $t_{s,AB}$ | spezielle maximale Einzelspielzeit im Lagerfachbereich, welcher von der Geschwindigkeitsgeraden abgedeckt wird |
| $t_s(x,y)$ | spezielle Einzelspielzeit des Lagerfaches $LF_{xy}$ im stetigen Modell |
| $t'_s$ | transformierte spezielle Spielzeit im Intervall $[0;1]$ beim Einzelspiel |
| $t_{sc}$ | Spielzeit der Fächergruppe $c$ |
| $t_{sD}$ | spezielle Spielzeit eines Doppelspiels |
| $t_{sij}$ | spezielle Einzelspielzeit des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $t_{sijqr}$ | spezielle Doppelspielzeit der Lagerfächer $LF_{ij}$ und $LF_{qr}$ |
| $t_{sm}$ | mittlere Spielzeit eines Einzelspiels |
| $t_{smax}$ | maximale Spielzeit |
| $t_{smin}$ | minimale Spielzeit |
| $t_{smD}$ | mittlere Spielzeit eines Doppelspiels |
| $t_{sqr}$ | spezielle Einzelspielzeit des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $t_{vd}$ | Verweildauer |
| $t_{vdc}$ | mittlere Verweildauer der Fächergruppe $c$ |
| $\bar{t}_{vd}(t_s)$ | mittlere Verweildauer der Fächergruppe $t_s$ nach Kontinuierung |
| $\bar{t}_{vd}(x,y)$ | mittlere Verweildauer des Lagerfaches $LF_{xy}$ im stetigen Modell |
| $t_{vd\gamma}$ | Verweildauer der aktuellen Ladeeinheit |
| $t_{vd,S}$ | sortimentsbezogene Verweildauer |
| $\bar{t}_{vdij}$ | mittlere Verweildauer des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $t_{vdmax}$ | maximale Verweildauer |
| $t_{vdmin}$ | minimale Verweildauer |
| $t_{vdmax,\psi}$ | maximale Verweildauer des Artikels $\psi$ |
| $t_{vdmin,\psi}$ | minimale Verweildauer des Artikels $\psi$ |
| $\bar{t}_{vdqr}$ | mittlere Verweildauer des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $t_{vd,\psi,\xi}$ | Verweildauer einer Ladeeinheit eines Artikels $\psi$ mit Beachtung des Sicherheitsbestandes |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $t_{vd,\psi,\xi,ohneMin}$ | Verweildauer einer Ladeeinheit eines Artikels $\psi$ ohne Beachtung des Sicherheitsbestandes |
| $t_W$ | Fahrzeit des Regalbediengerätes (horizontal und vertikal) einer Teilfahrt |
| $t_{W,seq.}$ | Fahrzeit des Regalbediengerätes (horizontal und vertikal) einer Teilfahrt bei sequentiellem Bewegungsablauf |
| $t_{W,par.}$ | Fahrzeit des Regalbediengerätes (horizontal und vertikal) einer Teilfahrt bei parallelem Bewegungsablauf |
| $t_{Wx}$ | Zeit zum horizontalen Verfahren einer Teilfahrt des Regalbediengerätes |
| $t_{Wy}$ | Zeit zum vertikalen Heben / Senken einer Teilfahrt des Lastaufnahmemittels |
| $t_{WHm.L.}$ | Zeitanteil der Hinfahrt bei einer Einlagerung (mit Last) des Einzelspiels |
| $t_{WHo.L.}$ | Zeitanteil der Hinfahrt bei einer Auslagerung (ohne Last) des Einzelspiels |
| $t_{WRm.L.}$ | Zeitanteil der Rückfahrt bei einer Auslagerung (mit Last) des Einzelspiels |
| $t_{WRo.L.}$ | Zeitanteil der Rückfahrt bei einer Einlagerung (ohne Last) des Einzelspiels |
| $t_{wb,\psi}$ | Wiederbeschaffungszeit eines Artikels $\psi$ |
| $t_z$ | Zwischenankunftszeit |
| $\bar{t}_{zij}$ | mittlere Zwischenankunftszeit des Lagerfaches $LF_{ij}$ |
| $t_{z,\eta,\psi}$ | Zwischenankunftszeit zwischen zwei Lieferungen $\eta$ und $\eta - 1$ eines Artikels $\psi$ |
| $\bar{t}_{zqr}$ | mittlere Zwischenankunftszeit des Lagerfaches $LF_{qr}$ |
| $\tilde{t}_{vd\gamma}$ | prognostizierte Verweildauer der aktuellen Ladeeinheit |
| $\tilde{t}_{vd\gamma+1}$ | prognostizierte Verweildauer des ersten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $\tilde{t}_{z\gamma+1}$ | prognostizierte Zwischenankunftszeit des ersten Nachfolgers der aktuellen Ladeeinheit |
| $\theta$ | Grenzwert bei der Bestimmung der Baumwahrscheinlichkeiten |
| $US$ | Umschlagspunkt bei der Reduzierung des Rechenaufwandes |
| $u$ | Geschwindigkeit des Regalbediengerätes in Hubrichtung |
| $u_{max}$ | Maximalgeschwindigkeit des Regalbediengerätes in Hubrichtung |
| $v$ | Geschwindigkeit des Regalbediengerätes in Fahrtrichtung |
| $v_{max}$ | Maximalgeschwindigkeit des Regalbediengerätes in Fahrtrichtung |
| $Var_G$ | Variationskoeffizient einer gleichverteilten Verweildauer |
| $Var(t_{vd,\psi})$ | Varianz der Verweildauer der Artikel |
| $Var(t_{vd,S})$ | Varianz der Verweildauer des Sortiments |

| Symbol | Erklärung |
|---|---|
| $w_x$ | Widerstandsbeiwert des Fahrantriebes des Regalbediengerätes |
| $w_y$ | Widerstandsbeiwert des Hubantriebes des Regalbediengerätes |
| $\chi$ | Integrationsvariable der Faltung |
| $\chi_\alpha$ | Verweildauerquantil einer ankommenden Ladeeinheit |
| $x_0$ | Lage der Geschwindigkeitsgrenzgerade beim Fahren des Regalbediengerätes |
| $x_s$ | x-Position des Schnittpunktes der Geschwindigkeitsgerade mit der Lagergrenze |
| $\xi$ | Laufindex der Ladeeinheiten einer Artikellieferung |
| $y_0$ | Lage der Geschwindigkeitsgrenzgerade beim Heben des Lastaufnahmemittels |
| $y_s$ | y-Position des Schnittpunktes der Geschwindigkeitsgerade mit der Lagergrenze |
| $ZAZ_{0,\psi}$ | Anzahl der Ladeeinheiten einer Bestellung des Artikels $\psi$ mit einer Zwischenankunftszeit von 0 |
| $ZAZ_{0,S}$ | Anteil der Ladeeinheiten aller Artikel des Sortiments mit einer Zwischenankunftszeit von 0 |