



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Eva Bosch

**Simulationsgestützte Optimierung
des Demontagegrads und Lagerorts
modularer, intelligenter Werkzeuge
in der Werkstattfertigung**

**Schriftenreihe des PTW
„Innovation Fertigungstechnik“**

Herausgeber
Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich
Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

PTW
TU DARMSTADT

Simulationsgestützte Optimierung des Demontagegrads und Lagerorts modularer,
intelligenter Werkzeuge in der Werkstattfertigung

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Eva Bosch, M. Sc.

aus Engelskirchen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl

Tag der Einreichung: 28.06.2021

Tag der mündlichen Prüfung: 12.10.2021

Darmstadt 2021

D17

Schriftenreihe des PTW: "Innovation Fertigungstechnik"

Eva Bosch

**Simulationsgestützte Optimierung des
Demontagegrads und Lagerorts modularer,
intelligenter Werkzeuge in der Werkstattfertigung**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Düren 2022

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8402-3

ISSN 1864-2179

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

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

Vorwort des Herausgebers

Im Zuge der zunehmenden Digitalisierung der Produktion wird das Werkzeugmanagement häufig vernachlässigt. Aufgrund der hohen Relevanz dieses Themas zur Gewährleistung einer reibungslosen Produktion verdient das Werkzeugmanagement jedoch eine genauere Betrachtung. Dabei fehlt es an Ansätzen zur Optimierung des Werkzeugmanagements, um den Werkzeugkreislauf zu optimieren und dadurch die Kosten für das Werkzeugmanagement zu reduzieren.

Daher widmet sich die Autorin diesem Thema. Konkret werden Handlungsempfehlungen zur Optimierung des Demontagegrads und Lagerorts modularer, intelligenter Werkzeuge zur Reduktion der Werkzeugkreislaufkosten hergeleitet. Der Fokus liegt auf Unternehmen, die in Werkstattfertigung arbeiten, da sie aufgrund ihrer hohen Werkzeugvielfalt und der häufigen Werkzeugwechsel besonderen Herausforderungen gegenüberstehen. Zur Entwicklung dieser Handlungsempfehlungen werden alle relevanten Bausteine des Werkzeugkreislaufs modelliert und anschließend in einem Simulationsmodell implementiert. Mithilfe des Optimierungsalgorithmus können der Demontagegrad und Lagerort der modularen, intelligenten Werkzeuge gezielt optimiert werden. Die Anwendung des Modells in der industriellen Praxis zeigt, dass Einsparpotentiale in Höhe von ca. 5 % der Werkzeugkosten verwirklicht werden können, ohne den Produktfluss negativ zu beeinflussen.

Darmstadt, im Dezember 2021

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Vorwort der Verfasserin

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der TU Darmstadt.

An erster Stelle danke ich Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele für die Übernahme des Referats, die in diesem Zusammenhang erfolgte Unterstützung sowie die gewährten Freiheiten bei Themenfindung und -bearbeitung. Zugleich danke ich ihm auch für die vielen guten Gespräche – insbesondere im Rahmen der Institutsleitungsrunden. Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl danke ich für sein Interesse an der Arbeit und für die Übernahme des Koreferats.

Ein großer Dank gilt auch Prof. Dr.-Ing. Joachim Metternich, Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold und dem gesamten Führungskreis für die stets sehr gute Zusammenarbeit, die positive Arbeitsatmosphäre und die offenen und konstruktiven Diskussionen. Weiterhin danke ich allen Kolleg:innen, mit denen ich im Laufe meiner Institutslaufbahn zusammengearbeitet habe. Viele haben einen entscheidenden Beitrag dazu geleistet, dass die Arbeit Spaß machte, ich viel gelernt habe und ich die Zeit am PTW in positiver Erinnerung haben werde. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle Herr Prof. Dr.-Ing. Stefan Seifermann für seine Unterstützung und kritische Durchsicht dieser Arbeit.

Ein großer Dank geht zudem an die Unternehmenspartner, mit denen ich im Rahmen der Validierung der Dissertation zusammengearbeitet habe. Ich bin sehr froh ein Unternehmen gefunden zu haben, das meinen Anfragen so offen gegenüberstand und mich bei der Beschaffung der benötigten Informationen tatkräftig unterstützte.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie. Ich danke meinen Eltern, dass sie immer an mich glauben und für mich und meine Familie da sind. Meinem Papa danke ich zusätzlich für den fachlichen Input und das Korrekturlesen der Arbeit. Meiner Schwester und ihrer Familie danke ich insbesondere für die vielen Ablenkungen durch fast tägliche Telefonate. Meinen Schwiegereltern danke ich ebenfalls für die Unterstützung – allen voran dafür, dass sie es mir durch das Aufpassen auf unsere Tochter und die kulinarische Verpflegung ermöglicht haben, mich intensiv mit meiner Arbeit zu beschäftigen. Zu meiner Familie gehört selbstverständlich auch meine eigene kleine Familie: mein Mann Christian hat mit seinem Verständnis, seinem Rückhalt, dem Korrekturlesen der Arbeit und seiner Liebe wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Unserer Tochter Hanna danke ich dafür, dass sie mir jeden Tag zeigt, was wirklich wichtig im Leben ist. Und zuletzt danke ich unserem noch ungeborenen Kind dafür, dass es mir im Endspurt keine allzu großen Beschwerden bereitet hat und genau zum richtigen Zeitpunkt unsere Familie ergänzt.

Kelkheim, im Dezember 2021

Eva Bosch

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	1
2	Stand der Erkenntnisse in Wissenschaft und Praxis	5
2.1	Grundlegende Begrifflichkeiten	5
2.1.1	Werkzeuge	5
2.1.2	Werkzeugkreislauf	12
2.1.3	Werkzeugmanagement in der Werkstattfertigung	17
2.2	Grundlagen der Modellierung und Simulation	20
2.3	Simulationsmethoden	23
2.4	Ansätze aus wissenschaftlicher Forschung und industrieller Praxis	28
2.4.1	Ansätze mit Fokus auf die Strukturierung der Prozesse im Werkzeugmanagement	29
2.4.2	Ansätze mit Fokus auf die Optimierung der Prozesse im Werkzeugmanagement	32
2.4.3	Ansätze aus dem Bereich Industrie 4.0 im Werkzeugmanagement	36
2.4.4	Fazit zu den Ansätzen aus wissenschaftlicher Forschung und industrieller Praxis	39
3	Ziel, Vorgehen und Abgrenzung	43
3.1	Ziel des Forschungsvorhabens	43
3.1.1	Inhaltliche Anforderungen an das Modell	43
3.1.2	Formale Anforderungen an das Modell	44
3.2	Vorgehen im Rahmen des Forschungsvorhabens	46
3.3	Abgrenzung des Anwendungsbereichs	47
4	Modellierung und Simulation des Werkzeugkreislaufs	49
4.1	Auswahl der Simulationsmethoden zur Simulation des Werkzeugkreislaufs	49
4.2	Mathematisches Modell des Werkzeugkreislaufs	51
4.2.1	Zielfunktion des Modells	51
4.2.2	Nebenbedingungen des Modells	59
4.3	Eingangsgrößen des Modells	62
4.3.1	Beschreibung der Agenten des Werkzeugkreislaufs	62
4.3.2	Beschreibung der Prozessblöcke des Werkzeugkreislaufs	67

4.4	Fazit zum mathematischen Modell und den Eingangsgrößen -----	74
5	Ansätze zur Optimierung des Werkzeugkreislaufs-----	75
5.1	Entscheidungsgegenstand und Entscheidungsorte der Optimierung -----	75
5.1.1	Entscheidungsgegenstand -----	75
5.1.2	Entscheidungsorte im Werkzeugkreislauf -----	77
5.2	Einflussfaktoren auf die Bestimmung des optimierten Demontagegrads und Lagerorts -----	81
5.2.1	Einflussfaktoren am Entscheidungsort „Einsatz“-----	81
5.2.2	Einflussfaktoren am Entscheidungsort „Lager“-----	84
5.2.3	Fazit zu den Einflussfaktoren-----	88
5.3	Dispositionsstrategien zur Bestimmung des optimierten Demontagegrads und Lagerorts -----	89
5.3.1	Dispositionsstrategien am Entscheidungsort „Einsatz“-----	89
5.3.2	Dispositionsstrategien am Entscheidungsort „Lager“-----	97
5.3.3	Fazit zu den Dispositionsstrategien -----	102
5.4	Vorgehen zur Identifikation einer optimierten Dispositionsstrategie -----	102
5.4.1	Auswahl eines Optimierungsverfahrens-----	103
5.4.2	Anwendung des Optimierungsverfahrens-----	104
6	Modellimplementierung, -überprüfung und -anwendung -----	109
6.1	Implementierung des Modells -----	109
6.1.1	Allgemeine Struktur des Simulationsmodells -----	109
6.1.2	Auswahl des Simulators -----	115
6.2	Überprüfung des Modells-----	116
6.3	Anwendung des Modells in der industriellen Praxis-----	117
6.3.1	Werkzeuge und Werkzeugkreislauf beim Anwenderunternehmen-----	117
6.3.2	Optimierung des Werkzeugkreislaufs beim Anwenderunternehmen ----	121
7	Evaluierung des Modells-----	141
8	Zusammenfassung und Ausblick -----	145
8.1	Zusammenfassung -----	145
8.2	Ausblick -----	148
	Literaturverzeichnis -----	151
	Anhang -----	165
A.1	Validierung und Verifikation des Simulationsmodells -----	165

A.2	Vorgehensdiagramm zur Prüfung der Verfügbarkeit der Gesamtwerkzeuge	171
A.3	Vorgehensdiagramm zur Prüfung der Verfügbarkeit der Module-----	173
A.4	Vorgehensdiagramm zur Prüfung der Verfügbarkeit der Module in Gesamtwerkzeugen-----	174
A.5	Vorgehensdiagramm zur Prüfung der Verfügbarkeit der Komponenten ----	177
A.6	Vorgehensdiagramm zur Prüfung der Verfügbarkeit der Komponenten in Modulen-----	178
A.7	Vorgehensdiagramm zur Bestellung von Komponenten-----	181
A.8	Vorgehensdiagramm zur Anpassung der Reststandzeit bzw. -menge -----	182
A.9	Vorgehensdiagramm zur Auslagerung der Gesamtwerkzeuge-----	183
A.10	Vorgehensdiagramm zur Auslagerung der Module-----	184
A.11	Oberfläche Simulationsmodell: Statistiken -----	185
A.12	Eingangsgrößen des Simulationsmodells für den betrachteten Anwendungsfall-----	186
A.13	Simulierte Einsatzhäufigkeit der Gesamtwerkzeuge -----	191
A.14	Simulierte Bearbeitungszeit der Gesamtwerkzeuge -----	192
A.15	Simulierte Einsatzhäufigkeit der Werkzeugmodule -----	193
A.16	Lebenslauf der Verfasserin-----	196

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Struktur der vorliegenden Arbeit -----	4
Abbildung 2: Einordnung des Betrachtungsgegenstands der vorliegenden Forschungsarbeit -----	6
Abbildung 3: Modulares Umformwerkzeug -----	7
Abbildung 4: Klassifizierung der Gesamtwerkzeuge -----	9
Abbildung 5: Mit Data Matrix Code gekennzeichnetes Zerspanungswerkzeug -----	11
Abbildung 6: Werkzeugkreislauf -----	13
Abbildung 7: Funktionsbereiche des Werkzeugwesens -----	15
Abbildung 8: Werkstattfertigung -----	17
Abbildung 9: Systematik der Fertigungsorganisationstypen -----	18
Abbildung 10: Entwicklung der Anzahl simulationsbezogener Veröffentlichungen ----	22
Abbildung 11: Schematische Darstellung der Modellbildung und Simulation -----	47
Abbildung 12: Zuordnung der Daten -----	63
Abbildung 13: Zielfunktion und Eingangsgrößen des Modells -----	74
Abbildung 14: Möglichkeiten am Entscheidungsort „Lager“ -----	79
Abbildung 15: Möglichkeiten am Entscheidungsort „Einsatz“ -----	80
Abbildung 16: Visualisierung des Überdeckungsgrads -----	87
Abbildung 17: Zielfunktion, Eingangsgrößen und Einflussfaktoren des Modells -----	88
Abbildung 18: Vorgehen Prüfung Kapazität Magazin (links) und Dezentrallager (rechts) -----	89
Abbildung 19: Auswahl des Lagerorts des Gesamtwerkzeugs in Abhängigkeit der Einsatzhäufigkeit -----	90
Abbildung 20: Auswahl des Lagerorts des Moduls in Abhängigkeit der Einsatzhäufigkeit -----	91
Abbildung 21: Vorgehen Strategie nach Einsatzhäufigkeit -----	91
Abbildung 22: Auswahl des Lagerorts des Gesamtwerkzeugs in Abhängigkeit der Bearbeitungszeit -----	92
Abbildung 23: Auswahl des Lagerorts des Moduls in Abhängigkeit der Bearbeitungszeit -----	92
Abbildung 24: Vorgehen Strategie nach Bearbeitungszeit -----	93
Abbildung 25: Auswahl des Lagerorts Magazin des Gesamtwerkzeugs in Abhängigkeit der Einsatzhäufigkeit und Bearbeitungszeit -----	94
Abbildung 26: Auswahl des Lagerorts Dezentrallager des Gesamtwerkzeugs in Abhängigkeit der Einsatzhäufigkeit und Bearbeitungszeit -----	94
Abbildung 27: Auswahl des Lagerorts des Moduls in Abhängigkeit der Einsatzhäufigkeit und Bearbeitungszeit -----	95
Abbildung 28: Vorgehen Strategie nach Einsatzhäufigkeit und Bearbeitungszeit -----	95
Abbildung 29: Vorgehen bei der Auswahl einer Dispositionsstrategie am Entscheidungsort „Einsatz“ -----	96

Abbildung 30: Dispositionsstrategien für den Entscheidungsort „Lager“-----	98
Abbildung 31: Vorgehen zur Auswahl eines Individuums -----	100
Abbildung 32: Vorgehen bei der Auswahl einer Dispositionsstrategie am Entscheidungsort „Lager“ -----	101
Abbildung 33: Zielfunktion, Eingangsgrößen, Einflussfaktoren und Dispositionsstrategien des Modells-----	102
Abbildung 34: Schematischer Kostenverlauf bei fester Einsatzhäufigkeitsgrenze----	105
Abbildung 35: Schematischer Kostenverlauf im Rahmen der Optimierung -----	107
Abbildung 36: Vorgehen zur Identifikation eines optimierten Werkzeugkreislaufs---	108
Abbildung 37: Darstellung der Struktur des Simulationsmodells -----	109
Abbildung 38: Entscheidungen des Gesamtwerkzeugs am Entscheidungsort „Einsatz“ -----	110
Abbildung 39: Entscheidungen des Moduls am Entscheidungsort „Einsatz“ -----	111
Abbildung 40: Implementierte Struktur der Agenten Auftrag und Werkzeuge -----	111
Abbildung 41: Abbildung des Prozesses „Reinigung“ im Simulationsmodell -----	112
Abbildung 42: Startseite Simulationsmodell zur Auswahl der Strategjen -----	115
Abbildung 43: Einordnung der verwendeten Validierungs- und Verifikations- Techniken -----	116
Abbildung 44: Gozintograph eines beispielhaften Werkzeugsatzes -----	118
Abbildung 45: Technische Zeichnung eines beispielhaften Werkzeugsatzes-----	119
Abbildung 46: Ersparnisse bei Anwendung der unterschiedlichen Strategien -----	134
Abbildung 47: Visualisierung der Aufenthaltsdauer der Komponenten-----	166
Abbildung 48: Visualisierung der Auslastung der Stationen des Werkzeugkreislaufs	167
Abbildung 49: Visualisierung der Lagerbestände als Funktion der Zeit -----	167

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ausprägungen des Werkzeugmanagements in Abhängigkeit des Fertigungsorganisationstyps -----	19
Tabelle 2: Zuordnung Fertigungsarten und Fertigungsorganisationstypen -----	20
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Merkmale von DES und ABS -----	28
Tabelle 4: Übersicht über den Erfüllungsgrad bisheriger Ansätze -----	41
Tabelle 5: Anforderungen an das Modell -----	45
Tabelle 6: Anforderungen an die Simulationsmethode -----	50
Tabelle 7: Merkmale der Gesamtwerkzeuge -----	63
Tabelle 8: Merkmale der Module -----	64
Tabelle 9: Merkmale der Komponenten -----	64
Tabelle 10: Merkmale der Aufträge -----	65
Tabelle 11: Charakteristika der betrachteten Lagerorte -----	68
Tabelle 12: Relevante Merkmale der Lagerung -----	68
Tabelle 13: Relevante Merkmale der Kommissionierung -----	69
Tabelle 14: Relevante Merkmale der Montage -----	69
Tabelle 15: Relevante Merkmale der Voreinstellung/Vermessung -----	70
Tabelle 16: Relevante Merkmale des Einsatzes -----	71
Tabelle 17: Relevante Merkmale der Reinigung -----	71
Tabelle 18: Relevante Merkmale der Prüfung -----	72
Tabelle 19: Relevante Merkmale der Demontage -----	72
Tabelle 20: Relevante Merkmale der Aufbereitung -----	73
Tabelle 21: Relevante Merkmale der Einlagerung -----	73
Tabelle 22: Transportstrecken, Transportgüter und Personal -----	74
Tabelle 23: Beispiel Standmenge und Zusammensetzung Gesamtwerkzeuge -----	85
Tabelle 24: Beispiel Standmengen und Zusammensetzung Module -----	85
Tabelle 25: Beispiel Standmengen Komponenten -----	85
Tabelle 26: Grenzwerte für die Dispositionsstrategien am Entscheidungsort „Einsatz“	96
Tabelle 27: Grenzwerte für die Dispositionsstrategien am Entscheidungsort „Lager“	101
Tabelle 28: Kosten unterschiedlicher Reststandmengengrenzen -----	105
Tabelle 29: Veränderung der Kosten bei Veränderung des Grenzwertes -----	106
Tabelle 30: Eingabegrößen des Modells -----	113
Tabelle 31: Verwendung von Validierungs- und Verifikations-Techniken -----	117
Tabelle 32: Ausschnitt der Stückliste eines beispielhaften Werkzeugsatzes -----	120
Tabelle 33: Eingabegrößen für das Modell des Anwenderunternehmens -----	124
Tabelle 34: Vorbereitungskosten in Abhängigkeit der Reststandmengengrenze für Gesamtwerkzeuge -----	131
Tabelle 35: Ausgelagerte Werkzeuge in Abhängigkeit der gewählten Strategie (1/2)	132
Tabelle 36: Ausgelagerte Werkzeuge in Abhängigkeit der gewählten Strategie (2/2)	133
Tabelle 37: Kosten unterschiedlicher Strategien -----	134

Tabelle 38: Kostenvergleich bei Standardisierung der Gesamtwerkzeuge-----	135
Tabelle 39: Montierte und demontierte Gesamtwerkzeuge mit und ohne Standardisierung-----	135
Tabelle 40: Ausgelagerte Werkzeuge mit und ohne Standardisierung der Werkzeugmodule-----	137
Tabelle 41: Werkzeugkreislaufkosten bei Demontage von Modulen in Abhängigkeit des Lagerkostenzinssatzes -----	139
Tabelle 42: Werkzeugkreislaufkosten in Abhängigkeit von Einsatzhäufigkeitsgrenze und Lagerkostenzinssatz -----	139
Tabelle 43: Übersicht über die Ergebnisse der Experimente -----	140
Tabelle 44: Anforderungen an das Modell und ihre Umsetzung im Modell -----	141
Tabelle 45: Charakteristika der befragten Unternehmen-----	143
Tabelle 46: Beispielhafte Trace-Analyse eines Auftrags -----	168
Tabelle 47: Beispielhafte Trace-Analyse einer Komponente -----	169

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

2D/3D	2-dimensional/3-dimensional
ABS	Agentenbasierte Simulation
AO	Aufenthaltort
BZ	Bearbeitungszeit
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPS	Cyber-Physische Systeme
DBMS	Datenbankmanagementsystem
DES	Discrete Event Simulation
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DL	Dezentrallager
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EH	Einsatzhäufigkeit
etc.	et cetera
G	Gesamtwerkzeug
GPSS	General Purpose Simulation Systemen
HSK	Hohlschaftkegel
ID	Identifikation
KI	Künstliche Intelligenz
LWK	Strategie zur Entnahme der Komponenten am Entscheidungsort Lager
LWM	Strategie zur Entnahme der Module am Entscheidungsort Lager
Max.	Maximal
Min.	Minimal
Mrd.	Milliarden
MTM	Methods Time Measurement
Nr.	Nummer
RFID	Radio Frequency Identification
RT	Reststandzeit
SD	Systemdynamik

SK	Steilkegel
TMS	Tool Management System
Typnr	Typnummer
V&V	Validierung und Verifikation
vgl.	vergleiche
WK	(Werkzeug-)Komponente
WM	(Werkzeug-)Modul
WZ	Werkzeug
WZM	Werkzeugmaschine
z.B.	zum Beispiel
ZL	Zentrallager

FORMELZEICHENVERZEICHNIS

G	Anzahl der Gesamtwerkzeuge
G_D	Anzahl der demontierten Gesamtwerkzeuge
G_E	Anzahl der gerüsteten Gesamtwerkzeuge
G_{EL}	Anzahl der eingelagerten Gesamtwerkzeuge
G_K	Anzahl der kommissionierten Gesamtwerkzeuge
G_L	Anzahl der im Lager vorhandenen Gesamtwerkzeuge
G_M	Anzahl der montierten Gesamtwerkzeuge
G_P	Anzahl der geprüften Gesamtwerkzeuge
G_R	Anzahl der gereinigten Gesamtwerkzeuge
G_T	Anzahl der transportierten Gesamtwerkzeuge
G_{VV}	Anzahl der voreingestellten/vermessenen Gesamtwerkzeuge
$HMSS$	Hilfsmittelstundensatz
$I(\alpha, \gamma)$	Schätzintervall
Kap_L	Kapazität des Lagers L
K	Kosten
K_B	Bestandskosten
K_D	Demontagekosten
K_E	Einsatzkosten
K_{EL}	Einlagerungskosten
K_K	Kommissionierkosten
K_L	Lagerbestandskosten
K_M	Montagekosten
K_N	Nachbereitungskosten
K_P	Prüfkosten
K_R	Reinigungskosten
K_T	Transportkosten
K_{TP}	Personalkosten für den Transport
K_{TS}	Kosten der Transportsysteme
K_U	Umlaufbestandskosten
K_V	Vorbereitungskosten
K_{VV}	Voreinstell-/Vermessungskosten

K_W	Wechselkosten
K_{WZK}	Werkzeugkreislaufkosten
l	Zurückgelegte Entfernung
LB_{WK}	Lagerbestand der Werkzeugkomponenten
LB_{WM}	Lagerbestand der Werkzeugmodule
LB_G	Lagerbestand der Gesamtwerkzeuge
LKS	Lagerkosten(zins)satz
MA	Anzahl Mitarbeitende
n	Anzahl Replikationen
p	Preis bzw. Wert
PSS	Personalstundensatz
RSS	Reinigungsstundensatz
RT_{WK}	Reststandzeit der Werkzeugkomponente
RT_{WM}	Reststandzeit des Werkzeugmoduls
RT_G	Reststandzeit des Gesamtwerkzeugs
s	Anzahl zurückgelegter Schritte
$S^2(n)$	Varianz der Stichprobe
t	Zeit
t_{ARu}	Abrüstzeit
t_{BZ}	Bearbeitungszeit
t_D	Demontagezeit
t_E	Einsatzzeit
t_{EL}	Einlagerungszeit
t_K	Kommissionierzeit
t_M	Montagezeit
t_{MA}	Arbeitszeit der Mitarbeitenden
t_N	Nachbereitungszeit
t_P	Prüfzeit
t_R	Reinigungszeit
$t_{R,RM}$	Reinigungszeit auf der Reinigungsmaschine
$t_{R,man}$	Manuelle Reinigungszeit
t_{Ru}	Rüstzeit
t_T	Transportzeit

t_V	Vorbereitungszeit
t_{VV}	Zeit für das Voreinstellen/Vermessen des Gesamtwerkzeugs
t_W	Wechselzeit
$t(n - 1, 1 - \frac{\alpha}{2})$	$1 - \frac{\alpha}{2}$ -Quantil der Standardnormalverteilung
TSS	Transportstundensatz
v_T	Transportgeschwindigkeit
$VVSS$	Voreinstell- und Vermessungsstundensatz
WK	Anzahl der Werkzeugkomponenten
WK_{EL}	Anzahl der eingelagerten Werkzeugkomponenten
WK_K	Anzahl der kommissionierten Werkzeugkomponenten
WK_L	Anzahl der im Lager vorhandenen Werkzeugkomponenten
WK_T	Anzahl der transportierten Werkzeugkomponenten
WM	Anzahl der Werkzeugmodule
WM_D	Anzahl der demontierten Werkzeugmodule
WM_{EL}	Anzahl der eingelagerten Werkzeugmodule
WM_K	Anzahl der kommissionierten Werkzeugmodule
WM_L	Anzahl der im Lager vorhandenen Werkzeugmodule
WM_M	Anzahl der montierten Werkzeugmodule
WM_T	Anzahl der transportierten Werkzeugmodule
WM_W	Anzahl der während des Einsatzes ausgetauschten Werkzeugmodule
X_i	Zufallsvariable ($i = 1, \dots, n$)
$\bar{X}(n)$	Mittelwert der Stichprobe
$1 - \alpha$	Konfidenzniveau
γ	Schätzfehler
$\delta(n, \alpha)$	Halbe Länge des Konfidenzintervalls
μ	Mittelwert